Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2020

Isabelle Bloch, Zied Bouraoui, Stephan Brunessaux, Sylvie Doutre, Amal El Fallah-Seghrouchni, Sébastien Ferré, Frédéric Maris, Alexandre Niveau, Nicolas Sabouret, Yves Demazeau, et al.

▶ **To cite this version:**

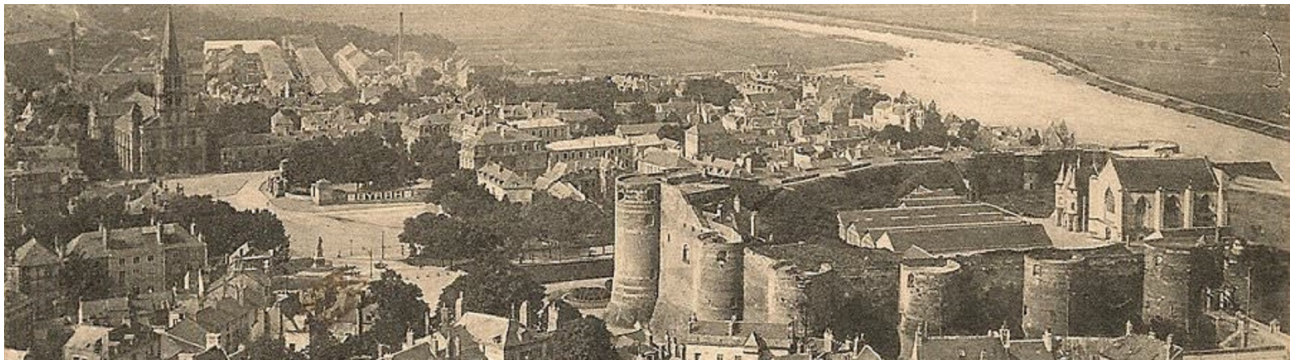
Isabelle Bloch, Zied Bouraoui, Stephan Brunessaux, Sylvie Doutre, Amal El Fallah-Seghrouchni, et al.. Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2020 : Activité AFIA 1er août 2018 – 31 juillet 2020. Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2020, Association Française d'Intelligence Artificielle, 2020. hal-02964840

HAL Id: hal-02964840
https://hal.science/hal-02964840

Submitted on 12 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2020

Sections Spéciales
Isabelle Bloch
Zied Bouraoui
Stephan Brunessaux
Sylvie Doutre
Amal Elfallah-Seghrouchni
Sébastien Ferré
Frédéric Maris
Alexandre Niveau
Nicolas Sabouret

Coordination AFIA
Yves Demazeau
Dominique Longin

AfIA
Association française pour l'Intelligence Artificielle

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle Année 2020

Actes CNIA 2020

Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle

Éditeurs : Président(e)s des CP de CNIA 2020

Table des matières

Mot des Présidents.
Angers, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain 5

Comités.
Comités 2020 de programmation, de programme, et d'organisation 7

Partenaires.
Partenaires PFIA 2020 13

J. Albouys-Perrois, N. Sabouret, Y. Haradji, M. Schumann, B. Charrier, C. Inard (JFSMA).
Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier à l'aide de la simulation multi-agent 15

H. Alqasir, D. Muselet, C. Ducottet (RJCIA).
Double adaptation de domaine pour la détection d'objets 23

T. Alves, J. Riviere, C. Allaux, Y. Le Comte, F. Singhoff, T. Duval, V. Rodin (RJCIA).
Modèle d'interruption pour la répartition des tâches : application pour une simulation de colonie d'abeilles 31

S. Belabbes, S. Benferhat (CNIA).
Ontologies légères inconsistantes partiellement pré-ordonnées en théorie des possibilités 39

C. Bernard, M. Villanova-Oliver, J. Gensel, Ph. Genoud, H. Dao (IC).
Immersion de divisions territoriales et description de leur évolution dans le Web sémantique 47

M. Bourgais, P. Taillandier, L. Vercouter (JFSMA).
BEN : Une architecture pour des agents cognitifs, affectifs et sociaux dans la simulation 57

F. Brandt, A. Wilczynski (JIAF).
On the convergence of swap dynamics to pareto-optimal matchings 65

R. Châtel, A.-I. Mouaddib (CNIA).
MDP augmentés pour la résolution de jeux de sécurité stochastiques 73

J. Chopin, J.-B. Fasquel, H. Mouchère, I. Bloch, R. Dahyot (RJCIA).
Méthode d'analyse sémantique d'images combinant apprentissage profond et relations structurelles par appariement de graphes 81

R. Conde Salazar, F. Liagre, I. Mougenot, J. Perez, A. Stokes (IC).
Vers une démarche ontologique pour la capitalisation des données de l'agroforesterie 89

A. Daoud, F. Balbo, P. Gianessi, G. Picard (RJCIA).
Approche décentralisée d'insertion avec amélioration continue de la qualité de la solution pour un système TAD 99

X. Goblet, C. Rey (APIA).
Suivi thérapeutique intelligent par recommandation à base d'ontologie et de règles 107

G. Guerard, H. Pousseur, M. Rivoire (APIA).
Inférence grammaticale pour la prévision de la consommation énergétique 115

G. Kassel (IC).
Événements abstraits et états d'affaires *occurent-facteurs* 123

A. Letard, T. Amghar, O. Camp, N. Gutowski (APIA).
Bandit et semi-bandit avec retour partiel : une stratégie d'optimisation du retour utilisateur 133

J. Mengin (JIAF).
A knowledge compilation map for conditional preference statements-based languages 141

P.-H. Paris, F. Hamdi, S. Si-Said Cherfi (IC).
Propagation contextuelle des propriétés pour les graphes de connaissances : une approche fondée sur les plongements de phrases 149

G. Picard, P. Rust (JFSMA).
Analyse des performances d'algorithmes DCOP pour l'association d'utilisateurs de réseaux HetNets 159

A. Rousset, P. Breugnot, B. Herrmann, C. Lang, L. Philippe (JFSMA).
Politiques de synchronisation dans les systèmes multi-agents distribués parallèles 167

S. Scheck, A. Niveau, B. Zanuttini (JFPDA).
Knowledge Compilation for Action Languages 176

Angers, au cœur de l'Intelligence Artificielle de demain

Patrick Albers, Igor Stephan,
Maître de Conférence ESEO, Maître de Conférence U. Angers
Co-Présidents du Comité d'Organisation de la Plate-Forme IA 2020

Yves Demazeau, Catherine Faron-Zucker, Dominique Longin
Directeur de Recherche CNRS, Maître de Conférence U. Nice Sophia Antipolis, Chargé de Recherche CNRS
Co-Présidents du Comité de Programmation de la Plate-Forme IA 2020

L'AFIA, l'ESEO et le LERIA organisent du 29 juin au 03 juillet 2020 la treizième Plate-Forme Intelligence Artificielle (PFIA 2020). Les précédentes éditions se sont tenues à Palaiseau (1999), Grenoble (2001), Laval (2003), Nice (2005), Grenoble (2007), Hammamet (2009), Chambéry (2011), Lille (2013), Rennes (2015), Caen (2017) Nancy (2018) et Toulouse (2019).

La plate-forme IA constitue un point de rencontre unique pour la communauté IA permettant de rapprocher les différentes disciplines qui la composent et d'établir des passerelles entre elles. A cette intention, la plate-forme IA s'adresse à l'ensemble de la communauté francophone en IA pour aborder des problématiques communes.

Pour son édition 2020, la Plate-Forme IA héberge les conférences suivantes ainsi que leurs ateliers associés :

APIA	6e Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'IA
CNIA	23e Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle, dont :
France @ International	Présentation d'articles français acceptés à AAAI, ECAI, IJCAI, PRICAI 2020
IC	31e Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances
JFPDA	15e Journées Francophone Planification, Décision et Apprentissage
JFSMA	28e Journées Francophones sur les Système Multi-Agents
JIAF	14e Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale
RJCIA	18e Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle

Mais aussi les autres événements :

J. Agronomie et IA	1e Journée Agronomie et IA, en partenariat avec l'INRAE
J. Internet des objets et IA	1e Journée Internet des Objets et IA, en partenariat avec l'IMT
J. Santé et IA	4e Journée Informatique Médicale et IA, en partenariat avec l'AIM

Dix collègues de renommée ont également été invités pour des conférences en début de chaque demi-journée

Nohza Boujemaa	INRIA Paris	France
Oscar Corcho	U. Polytechnique de Madrid	Espagne
Gouthi B. Hacene	IMT Atlantique	France
Jin-Kao Hao	U. Angers	France
Joerg Hoffmann	U. Saarland	Allemagne
J.-F. Lemoine	ESSCA Angers	France
Jialin Liu	SUSTech Shenzen	Chine
Jonathan Ozik	ANL Chicago	Etats-Unis d'Amérique
Fabian Suchanek	Telecom Paris	France
Renaud Vedel	MINEFI Paris	France

L'ensemble des informations sur ces événements est disponible à partir du site de la Plate-Forme IA 2020 (http://pfia2020.fr/) dont le contenu sera maintenu jusqu'à l'été 2024.

Nous remercions les présidents de comités de programme des conférences et journées hébergées, les membres de leurs comités de programme, les orateurs, les membres des comités de programmation et d'organisation, nos partenaires institutionnels et industriels, ainsi que tous les participants, pour leurs contributions précieuses à la réussite de cette plateforme.

©AfIA 2020

Comité de programmation

Conseil d'Administration de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle

Président
— Yves DEMAZEAU, LIG, CNRS

Membres
— Catherine FARON-ZUCKER, I3S, Université de Nice Sophia-Antipolis
— Dominique LONGIN, IRIT, CNRS

Comités de programme

Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA)

Présidents
— Amal ELFALLAH-SEGHROUCHNI, Sorbonne University
— Stéphan BRUNESSAUX, Airbus

Membres
— Ghislain ATEMEZING, Mondeca
— Jérôme AZÉ, LIRMM-UM-CNRS
— Assia Belbachir, IPSA
— Alain BERGER, Ardans
— Stéphan BRUNESSAUX, Airbus
— Amal ELFALLAH-SEGHROUCHNI, Sorbonne University
— Christophe GUETTIER – Safran
— Céline HUDELOT, Ecole Centrale Paris
— Christophe LABREUCHE, Thales
— Arnaud LALLOUET, Huawei
— Christine LARGOUËT, Irisa /Agrocampus Ouest
— Vincent LEMAIRE, Orange Labs
— Dominique LENNE, Heudiasyc – Université de Technologie de Compiègne
— Sylvain MAHE, EDF R&D
— Philippe MATHIEU, University of Lille 1
— Nada MATTA, University of Technology of Troyes
— Juliette MATTIOLI, Thales
— Philippe MORIGNOT, Aspertise
— Selmin NURCAN, Université Paris 1 Panthéon – Sorbonne
— Brigitte TROUSSE, Université Côte d'Azur, INRIA Sophia Antipolis – Méditerranée

Conférence Nationale en Intelligence Artificielle (CNIA)

Présidente
— Isabelle Bloch, LTCI, Télécom Paris

Membres
— Meghyn Bienvenu (LABRI, Université de Bordeaux)
— Olivier Boissier (Ecole des Mines de Saint-Etienne)
— Elise Bonzon (LIPADE, Paris Descartes)
— Jean Charlet (LIMICS)
— Sylvie Coste-Marquis (CRIL, Université d'Artois)
— Célia Da Costa Pereira (Université de Nice)
— Séverine Dubuisson (LIS, université Aix-Marseille)
— Florence Dupin De Saint Cyr (IRIT, Toulouse)
— Pietro Gori (LTCI, Télécom Paris)

©AfIA 2020

— Sébastien Konieczny (CRIL, CNRS)
— Florence Le Ber (ENGEES, Université de Strasbourg)
— Marie-Jeanne Lesot (LIP6, Sorbonne Université)
— Christophe Marsala (LIP6, Sorbonne Université)
— Nicolas Maudet (LIP6, Sorbonne Université)
— Abdel-Illah Mouaddib (GREYC, Université de Caen)
— Alasdair Newson (LTCI, Télécom Paris)
— Odile Papini (Université Aix-Marseille)
— Fabian Suchanek (LTCI, Télécom Paris)
— Bruno Zanuttini (GREYC, Université de Caen)
— Pierre Zweigenbaum (LIMSI, CNRS)

Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)

Président

— Sébastien FERRÉ – IRISA, Univ. Rennes 1

Membres

— Marie-Hélène Abel – Sorbonne Universités, UTC
— Xavier Aimé – Cogsonomy / LIMICS UMRS 1142 Inserm
— Yamine Ait Ameur – IRIT/INPT-ENSEEIHT
— Bruno Bachimont – Sorbonne Université
— Jean-Paul Barthès – UTC
— Aurélien Bénel – Université de technologie de Troyes
— Nacéra Bennacer Seghouani – LRI CentraleSupélec
— Bertrand Braunschweig – INRIA
— Nathalie Bricon-Souf – IRIT Université Paul Sabatier Toulouse
— Sandra Bringay – LIRMM
— Patrice Buche – INRA
— Davide Buscaldi – LIPN, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité
— Sylvie Calabretto – LIRIS
— Gaoussou Camara – Université Alioune Diop de Bambey – Sénégal
— Pierre-Antoine Champin – LIRIS, Université Claude Bernard Lyon1
— Jean Charlet – AP-HP & INSERM UMRS 1142
— Olivier Corby – INRIA
— Sylvie Despres – Laboratoire d'Informatique Médicale et de BIOinformatique (LIM&BIO)
— Jean-Pierre Evain – EBU
— Gilles Falquet – University of Geneva
— Catherine Faron Zucker – Université Nice Sophia Antipolis
— Cécile Favre – ERIC – Université Lyon 2
— Béatrice Fuchs – LIRIS, université de Lyon
— Frédéric Fürst – MIS – Université de Picardie – Jules Verne
— Alban Gaignard – CNRS
— Jean-Gabriel Ganascia – Pierre and Marie Curie University – LIP6
— Serge Garlatti – IMT Atlantique
— Alain Giboin – INRIA
— Ollivier Haemmerlé – IRIT, Univ. Toulouse le Mirail
— Mounira Harzallah – LS2N
— Nathalie Hernandez – IRIT
— Liliana Ibanescu – UMR MIA-Paris, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay
— Sébastien Iksal – LIUM – Le Mans Université
— Antoine Isaac – Europeana & VU University Amsterdam
— Clement Jonquet – University of Montpellier – LIRMM
— Mouna Kamel – IRIT – Université Paul Sabatier – Toulouse
— Gilles Kassel – University of Picardie Jules Verne
— Pascale Kuntz – Laboratoire d'Informatique de Nantes Atlantique
— Michel Leclère – LIRMM (CNRS – UM2)
— Marie Lefèvre – LIRIS, Université Claude Bernard Lyon 1

— Maxime Lefrançois – MINES Saint-Etienne
— Dominique Lenne – Heudiasyc, Université de Technologie de Compiègne
— Cédric Lopez – Emvista
— Pascal Molli – University of Nantes – LS2N
— Alexandre Monnin – Origens Medialab
— Isabelle Mougenot – Université Montpellier EspaceDev
— Fleur Mougin – ERIAS, INSERM U1219 – Université de Bordeaux
— Amedeo Napoli – LORIA Nancy (CNRS – Inria – Université de Lorraine)
— Jérôme Nobécourt – LIMICS
— Nathalie Pernelle – LRI – Universit Paris Sud
— Yannick Prié – LINA – University of Nantes
— Cédric Pruski – Luxembourg Institute of Science and Technology
— Sylvie Ranwez – LGI2P / Ecole des mines d'Alès
— Chantal Reynaud – LRI, Univ. Paris-Sud, CNRS, Université Paris-Saclay
— Catherine Roussey – Irstea Clermont-Ferrand Center
— Fatiha Saïs – LRI (Paris Sud University & CNRS 8623), Paris Saclay University
— Pascal Salembier – Université de Troyes
— Karim Sehaba – LIRIS – Université Lumière Lyon 2
— Konstantin Todorov – LIRMM / University of Montpellier
— Raphaël Troncy – EURECOM
— Haifa Zargayouna – University Paris 13

Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la conduite de systèmes (JFPDA)

Président

— Frédéric Maris (IRIT, Université Toulouse 3)

Membres

— Pegah Alizadeh (Pôle Léonard de Vinci)
— Aurélie Beynier (LIP6, Université Paris Sorbonne)
— Maroua Bouzid (GREYC, Université de Caen-Normandie)
— Olivier Buffet (INRIA, LORIA)
— Caroline Chanel (ISAE-SUPAERO)
— Martin Cooper (IRIT, Université Toulouse 3)
— Jilles Dibangoye (INSA Lyon)
— Alain Dutech (INRIA, LORIA)
— Humbert Fiorino (LIG)
— Laurent Jeanpierre (GREYC, Université de Caen-Normandie)
— Jérôme Lang (CNRS, LAMSADE, Université Paris-Dauphine)
— Laetitia Matignon (LIRIS CNRS, Université Lyon 1)
— Alexandre Niveau (GREYC, Université de Caen-Normandie)
— Cyril Pain-Barre (LIS, Université Aix-Marseille)
— Damien Pellier (LIG, Université Grenoble Alpes)
— Cédric Pralet (ONERA, Toulouse)
— Philippe Preux (INRIA, LIFL, Université de Lille)
— Emmanuel Rachelson (ISAE-SUPAERO)
— Pierre Régnier (IRIT, Université Toulouse 3)
— Régis Sabbadin (INRA)
— François Schwarzentruber (IRISA, ENS Rennes)
— Mathieu Serrurier (IRIT, Université Toulouse 3)
— Olivier Sigaud (ISIR, Université Paris Sorbonne)
— Florent Teichteil-Königsbuch (Airbus Central Research & Technology)
— Vincent Thomas (LORIA)
— Paul Weng (UM-SJTU Joint Institute)
— Bruno Zanuttini (GREYC, Université de Caen-Normandie)

©AfIA 2020

Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)

Président

— Nicolas Sabouret, LIMSI

Membres

— Emmanuel Adam, LAMIH
— Carole Adam, LIG
— Flavien Balbo, LHC
— Aurélie Beynier, LIP6
— Olivier Boissier, LHC
— Grégory Bonnet, GREYC
— Kei Brousmiche, SystemX
— Valérie Camps, IRIT
— Florent Carlier, CREN
— Anne-Cécile Caron, CRISTAL
— François Charpillet, LORIA
— Vincent Chevrier, LORIA
— Caroline Chopinaud, CRAFT
— Rémy Courdier, LIM
— Yves Demazeau, LIG
— Stéphane Galland, UTBM
— Marie-Pierre Gleizes, IRIT
— Emmanuelle Grislin, LAMIH
— Zahia Guessoum, LIP6
— Salima Hassas, LIRIS
— Cédric Herpson, LIP6
— Guillaume Hutzler, IBISC
— Jean-Paul Jamont, LCIS
— Elsy Kaddoum, IRIT
— Jean-Daniel Kant, LIP6
— Christophe Lang, LIUFC
— Domitile Lourdeaux, UTC
— Rene Mandiau, LAMIH
— Cristina Maniu, L2S
— Nicolas Marilleau, UMMISCO
— Philippe Mathieu, CRISTAL
— Bruno Mermet, GREYC
— Frederic Migeon, IRIT
— Maxime Morge, CRISTAL
— Gildas Morvan, LGI2A
— Jean-Pierre Muller, CIRAD
— Antoine Nongaillard, CRISTAL
— Michel Occello, LCIS
— Wassila Ouerdane, MICS
— Alexandre Pauchet, LITIS
— Denis Payet, LIM
— Sebastien Picault, CRISTAL
— Suzanne Pinson, LAMSADE
— Éric Platon, CosmosX
— Lilia Rejeb, ISG Tunis
— Valérie Renault, CREN
— Julien Saunier, LITIS
— Patrick Taillandier, COGIT
— Mahdi Zargayouna, IFSTTAR

Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale (JIAF)

Présidents

— Zied Bouraoui (CRIL, Univ Artois & CNRS)
— Sylvie Doutre (IRIT, Université Toulouse Capitole)

Membres

— Francesco Belardinelli (IBISC, Université d'Évry)
— Elise Bonzon (LIPADE, Université Paris Descartes)
— Tristan Cazenave (LAMSADE, Université Paris Dauphine)
— Nadia Creignou (LIS, Aix-Marseille Université)
— Tiago de Lima (CRIL, Lens)
— Jérôme Euzenat (LIG, INRIA)
— George Katsirelos (MIAT, INRA)
— Sébastien Konieczny (CRIL, CNRS)
— Jérôme Lang (LAMSADE, Université Paris Dauphine)
— Jean Lieber (LORIA, INRIA)
— Pierre Marquis (CRIL, Université d'Artois)
— Marie-Laure Mugnier (LIRMM, Université de Montpellier)
— Amedeo Napoli (LORIA, CNRS)
— Odile Papini (LIS, Aix-Marseille Université)
— Laurent Perrussel (IRIT, Universite Toulouse 1 Capitole)
— Sophie Pinchinat (IRISA, INRIA)
— Stéphanie Roussel (ONERA)
— Serena Villata (I3S, CNRS)
— Christel Vrain (LIFO, Université d'Orléans)
— Bruno Zanuttini (GREYC, UNICAEN)

Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA)

Président

— Alexandre Niveau, Université de Caen Normandie

Membres

— Céline Alec, Université de Caen Normandie
— Zied Bouraoui, Université d'Artois
— Mathieu Chollet, IMT Atlantique
— Quentin Cohen-Solal, Université Paris Dauphine
— Nicolas Cointe, Delft University of Technology (Pays-Bas)
— Jérôme Delobelle, Inria
— Géraud Fokou, Inria
— Hugo Gilbert, Gran Sasso Science Institute (L'Aquila, Italie)
— Pierre-François Gimenez, LAAS
— Juan Antonio Lossio-Ventura, Stanford University (États-Unis)
— Jean-Guy Mailly, Université Paris Descartes
— Abdelkader Ouali, Université de Caen Normandie
— Anastasia Paparrizou, Université d'Artois
— Éric Piette, University of Maastricht (Pays-Bas)
— Abdallah Saffidine, University of New South Wales (Australie)
— Michael Sioutis, Aalto University (Finland)
— Marta Soare, Université d'Orléans
— Michaël Thomazo, Inria
— Nicolas Verstaevel, Université Toulouse I Capitole
— Anaëlle Wilczynski, Technische Universität München (Allemagne)

©AfIA 2020

Comité d'organisation

ESEO & LERIA (Angers)

Présidents

— Patrick Albers (ESEO)
— Igor Stéphan (LERIA)

Gestion administrative

— Anne-Flore Jarry (ESEO)

Membres

— Touria Ait El Mekki (LERIA)
— Tassadit Amghar (LERIA)
— Vincent Barichard (LERIA)
— Olivier Beaudoux (ESEO)
— Olivier Camp (ESEO)
— Fabien Chhel (ESEO)
— Bétrice Duval (LERIA)
— Laurent Garcia (LERIA)
— David Genest (LERIA)
— Adrien Goeffon (LERIA)
— Nicolas Gutowski (ESEO)
— Jin-Kao Hao (LERIA)
— Olivier Hu (LERIA)
— Frédéric Lardeux (LERIA)
— Claire Lefèvre (LERIA)
— David Lesaint (LERIA)
— Frédéric Saubion (LERIA)
— Daniel Schang (ESEO)

PFIA
2020
ANGERS

#ANGERS
FRENCHTECH

angers loire
métropole
communauté urbaine

ESSCA
SCHOOL OF MANAGEMENT

INRAE

Inria

3iA Côte d'Azur
Institut interdisciplinaire
d'intelligence artificielle

Institut Mines-Télécom

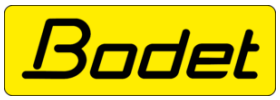
MIAI
Grenoble Alpes

université
angers

AIRBUS

ARDANS
Knowledge Consulting & Software Solutions

Berger
Levrault


Bodet

Cdiscount

CROSS DATA
croiser vos données avec le réel

DASSAULT
AVIATION

EURODECISION
ALGORITHMS FOR BUSINESS

HUAWEI

inbenta

interdigital

masa
www.masasim.com

MONDECA

Pacte|Novation

GROUPE RENAULT

sade

©AfIA 2020

Étude de différentes configurations d'autoconsommation collective de l'énergie à l'échelle du quartier à l'aide de la simulation multi-agent

J. Albouys-Perrois[1,2,3,4], N.Sabouret[2], Y. Haradji[3]
M.Schumann[3], B. Charrier[3], C.Inard[1,4]

[1] Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement, Université La Rochelle, France
[2] Université Paris-Saclay, CNRS, LIMSI, 91400, France
[3] EDF R&D, France
[4] 4evLab, EDF R&D, CNRS, LaSIE, La Rochelle Université, Avenue Michel Crépeau, La Rochelle Cedex 1, 17042, France

albouys@limsi.fr, nicolas.sabouret@limsi.fr, yvon.haradji@gmail.com, mathieu.schumann@edf.fr benoit.charier@edf.fr, chrstian.inard@univ-lr.fr

Résumé

Cet article présente un modèle de simulation multi-agent à deux niveaux d'autoconsommation collective de l'énergie. Le premier niveau de ce modèle est une simulation multi-agent de l'activité humaine couplée à une simulation thermique du bâtiment qui permet d'obtenir la consommation électrique d'un foyer. Le second niveau est une modélisation d'un groupement de foyers pratiquant l'autoconsommation collective d'énergie. Nous présentons une formalisation de cette notion de groupement ainsi que différentes organisations pour échanger de l'énergie. Nous étudions ensuite ces différentes organisations et montrons leur fort impact sur la répartition de l'énergie lorsque la production est faible face à la consommation

Mots-clés

Simulation multi-agent, Simulation, Consommation énergétique, Autoconsommation collective

Abstract

We present a multi-level multi-agent simulation of collective energy self-consumption. The first level of this model is a multi-agent simulation of human activity coupled with an energy simulation of the building, calculating the household's energy consumption. The second level is a model of a group of households practising collective self-consumption of energy. We present a formalisation of this notion of grouping as well as different organizations to exchange energy.

Last, we study these different organisations and show their strong impact on the distribution of energy when production is low compared to consumption.

Keywords

Multi-agent simulation, Energetic consumption, Collective self-consumption

1 Introduction

L'autoconsommation collective (ACC) d'énergie associe une production d'énergie électrique locale, par exemple avec des panneaux photovoltaïques (PV) ou une éolienne, avec la consommation de toute ou d'une partie de cette énergie par un ensemble de foyers situés à proximité des moyens de production [7, 8]. L'un des principaux intérêts est de maximiser la consommation d'énergie locale et renouvelable sans devoir faire appel à des sources d'énergie centralisées. Complémentaire avec les expérimentations sur site, la simulation numérique est un outil permettant d'étudier la pertinence technico-économique des nombreuses configurations d'ACC possibles et l'évolution des usages de l'énergie dans ces situations [8].

Dans nos précédents travaux [1, 2], nous avions déjà mis en avant la nécessité de prendre en compte la diversité de l'activité des habitants des foyers dans les problématiques de l'ACC, en mettant en évidence l'impact positif sur le taux d'autoconsommation collective, c'est-à-dire la part de la production électrique locale qui est consommée immédiatement sur place par les foyers. Cependant, les premiers résultats obtenus étaient basés sur une seule configuration d'ACC simplifiée : dans notre étude, les foyers s'échangeaient l'énergie produite localement de manière séquentielle i.e. un foyer B recevait l'énergie que le foyer A ne consommait pas. Il existe toutefois de nombreuses configurations possibles d'autoconsommation collective (en termes d'acteurs, d'organisation des échanges d'énergie, de cadre contractuel, ou d'équipements de production ou de stockage d'énergie) que notre étude précédente n'avait pas encore mis en avant.

Dans cet article, nous proposons un modèle de simulation multi-agent à deux niveaux, afin de rendre compte de la diversité des configurations d'ACC et d'étudier leur impact sur le taux d'autoconsommation. Comme nous l'avons montré dans nos travaux précédents [3], la prise en compte de l'activité humaine est importante pour étudier avec

©AfIA 2020

justesse la dynamique des consommations dans le secteur résidentiel. C'est pourquoi nous utiliserons, dans un premier niveau, la plateforme SMACH pour simuler les foyers et, par co-simulation, le modèle énergétique du bâtiment. Dans cet article nous présentons le second niveau de notre modèle qui est aussi un système multi-agent (SMA) et dont le rôle est de simuler le fonctionnement de la configuration d'ACC étudiée. L'objectif de ce niveau est de permettre de simuler un grand nombre configuration d'ACC différentes. Ceci permettra de fournir un outil aux experts de l'énergie afin d'étudier et d'anticiper les futures situations et problématiques liées à l'ACC, comme le dimensionnement des équipements liés à l'ACC.
Nous présentons la conception, la formalisation et l'implémentation actuelle de notre modèle. Dans la section 2, nous discutons des travaux antérieurs portant sur la simulation de regroupement d'agents et sur les problèmes d'allocation par des SMA. La section 3 est dédiée à la présentation de notre modèle d'ACC. La section 4 est dédiée aux modèles d'échange de l'énergie. Enfin, la section 5 présente un cas d'étude précis et ses résultats.

2 État de l'art

2.1 Agent, groupe et ACC

Une des caractéristiques de l'ACC est la possibilité pour des foyers de se regrouper afin d'échanger entre eux de l'énergie produite localement. En SMA, la formation de groupe d'agents et leur optimisation vis-à-vis d'un ou plusieurs objectifs sont des sujets largement étudiés, avec des notions comme les coalitions, les équipes ou encore les congrégations [6].
Cependant, dans nos travaux, les regroupements de foyers pratiquant l'ACC sont définis et fixés de manière contractuelle. Nous ne cherchons donc pas à optimiser ces regroupements pratiquant l'ACC, mais à fournir un outil visant à étudier l'impact de différents types de groupement (en termes de foyers, d'habitants, de moyens de production et d'échange d'énergie). Nous ne sommes ni dans un problème de formation de coalition ni d'optimisation de la consommation.

2.2 Échanges de ressources

L'énergie produite localement sera amenée à être échangée entre les différents acteurs pratiquant l'ACC. L'échange (ou allocation) de ressources est un problème fréquemment étudié dans les systèmes multi-agents. Un problème d'allocation peut être défini comme un problème dans lequel un ensemble d'agents (coopératifs ou non) doit trouver une répartition de ses ressources [4]. Cette répartition doit correspondre au mieux aux préférences des agents qui sont souvent en compétition.

Pour résoudre ces problèmes d'allocation, les auteurs de [4] proposent la mise en place d'un système multi-agent décentralisé basé sur les processus décisionnels de Markov (PDM). Dans ce modèle, les agents vont être capables de faire ou d'accepter des propositions d'échanges de ressources avec d'autres agents. L'objectif des PDM est de rechercher une optimisation et une planification des différents échanges de ressources. Or aujourd'hui, l'ACC impose une organisation contractuelle précise pour régir les échanges d'énergie entre les foyers. Dans nos travaux notre objectif est de voir comment différentes méthodes pour échanger de l'énergie impactent la consommation au sein d'un groupement sans chercher à les optimiser.

D'autres méthodes se sont intéressées à la mise en œuvre de systèmes centralisés afin de réaliser l'allocation de ressources. C'est le cas par exemple du « Contract-Net Protocol » [11]. Ce protocole consiste en l'interaction d'un manager qui va propager une offre i.e. un ensemble de ressources à d'autres agents qui réaliseront une proposition (d'achat par exemple) au manager. Le manager sélectionne ensuite la meilleure proposition puis va attribuer les ressources. Le fonctionnement avec des agents en concurrence pour l'obtention de ressources est similaire au fonctionnement des enchères dites scellées. Cependant, une seule ressource ne sera attribuée qu'à un seul acheteur. Cela ne correspond pas forcément à la façon dont l'énergie électrique peut être répartie dans le cas d'enchères. D'autres algorithmes existent visant à reproduire des systèmes d'enchères pour allouer des ressources entre vendeurs [12].

Constatant le besoin d'un modèle capable de répondre aux contraintes de l'ACC réelle, cet article présente le modèle que nous utilisons pour simuler l'ACC entre un ensemble de foyers, ainsi que les différentes organisations d'autoconsommation d'énergie associées à l'allocation de l'énergie produite localement entre les différents foyers. Ce modèle sera basé sur la simulation multi-agent à deux niveaux pour simuler l'ACC. Au centre de modèle, on retrouvera le **Groupement**. Un des apports de ce modèle est de permettre le test et la comparaison de différentes organisations d'ACC sur la consommation électrique des foyers et sur les flux financiers.

3 Le modèle de groupement

Dans cette section et dans la suivante, nous présentons notre modèle de configurations d'ACC. Nous présentons tout d'abord la notion de groupement et le modèle SMA à deux niveaux qui y est rattaché. La section 4 présentera l'organisation des échanges.

3.1 Le groupement : un SMA à deux niveaux

Les acteurs sont des agents présents dans le groupement, ces derniers représenteront les foyers. Les foyers sont des systèmes multi-agents qui sont simulés par la plateforme SMACH dont les développements successifs ont déjà été abordés [2]. La plateforme permet d'obtenir la consommation électrique des foyers en simulant l'activité humaine grâce à un système multi-agent. Dans ce SMA, chaque agent représente un habitant du foyer qui va sélectionner des tâches quotidiennes à réaliser. Les activités sélectionnées sont associées à des appareils qui consomment de l'énergie électrique. Nous pouvons ainsi obtenir la consommation électrique de chaque foyer. Les foyers peuvent ainsi avoir un besoin en énergie qui peut être comblé en partie ou totalement par un moyen de production individuel (situé au niveau du foyer). Cela est évalué par une nouvelle entité intégrée dans chacun des foyers pratiquant l'ACC : **le module d'auto-consommation**. Le rôle de ce module est de calculer le besoin ou le surplus en énergie du foyer et de le communiquer au groupement à un pas de temps défini. Les foyers peuvent également être copropriétaires d'un moyen

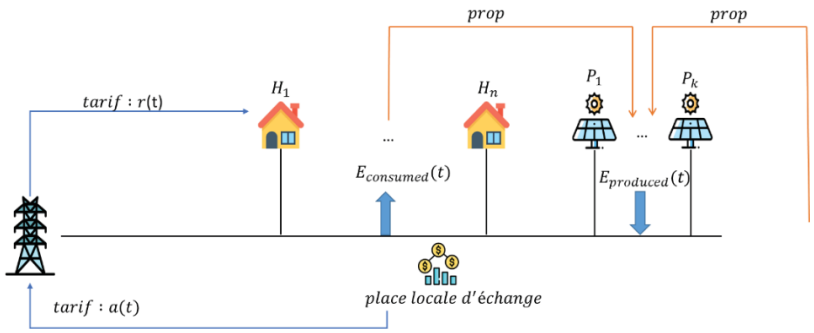


Figure 1 : Représentation schématique d'un groupement

de production d'énergie mutualisé, c'est-à-dire situé au niveau du groupement.

Un groupement est également composé d'équipements : moyens de production et de stockage. Les moyens de production à l'échelle du groupement sont dits mutualisés. Ces derniers sont à la disposition du groupement et l'ensemble de leur production d'énergie sera amenée à être répartie entre les foyers du groupement. Ces moyens de production sont modélisés grâce au langage Modelica et à la bibliothèque BuildSysPro comme présenté dans nos précédents travaux [9]. Pour ce faire, une co-simulation entre le groupement et les moyens de production mutualisés s'appuyant sur le standard d'interopérabilité logicielle FMI a été développée [1]. Ces moyens de production mutualisés peuvent appartenir à un ou plusieurs acteurs du groupement, c'est-à-dire que chacun a un taux de propriété qui sert à la répartition des bénéfices.

Enfin, la place locale d'échange (PLE) est un agent présent dans notre groupement, dont le rôle principal est de définir comment l'énergie produite au sein du groupement est répartie entre les différents foyers. Pour cela, elle calcule la répartition de cette énergie en fonction de règles contractuelles définies entre les foyers. Cet ensemble de règles est appelé **organisation de l'autoconsommation** et pourra être différent d'un groupement à l'autre, mais toujours identique au sein d'un groupement. Une fois l'énergie produite localement répartie, la place locale d'échange calcule également la quantité d'énergie que chaque foyer a consommée auprès du réseau électrique.

3.2 Définition formelle du groupement

Soit H l'ensemble des foyers qui composent un groupement. Pour chacun de ces foyers, nous notons $e_{consumed}(h,t)$ la quantité d'énergie en kWh appelée par un foyer h sur le précédent pas de temps de notre simulation. Dans notre groupement, $Prod$ permet de représenter l'ensemble des moyens de production mutualisés du groupement. Nous notons $e_{produced}(t): Prod \rightarrow R^+$la quantité d'énergie en kWh produite par un moyen de production mutualisé du groupement sur le pas de temps précédent. Nous notons également $prop: H \times Prod \rightarrow [0,1]$, le taux de propriété d'un acteur du groupement envers un moyen de production. Ce taux de propriété permettra de calculer la répartition des bénéfices. Par définition, les valeurs de $prop$ doivent toujours satisfaire la contrainte suivante : $\forall j \in Prod, \sum_{i \in H} prop(i,j) = 1$.

Nous notons également $E_{produced}(t) = \sum_{j \in Prod} e_{produced}(j,t)$ la quantité totale d'énergie produite par l'ensemble des moyens de production du groupement sur le pas de temps précédent.
Dans notre groupement, nous notons $r(t): H \rightarrow \mathbb{R}^+$ le prix de l'énergie provenant de l'extérieur du groupement pour un foyer au temps t. Nous notons également $a(t) \in \mathbb{R}^+$ le prix auquel l'énergie produite pourra être vendue à l'extérieur du groupement. Actuellement, nous considérons que seul le réseau peut vendre ou acheter de l'énergie depuis l'extérieur du groupement.

Pour un groupement, nous notons $pol = \{TauxFixe, TauxProportionnel, Concurrentielle\}$ l'organisation des échanges d'énergie mise en place dans le groupement, tel que défini dans la section 4.

Nous avons pour chaque foyer la fonction $e_{local}(t): H \rightarrow R^+$ qui représente la quantité d'énergie obtenue à l'aide des moyens de production mutualisés du groupement. Nous avons également la contrainte $e_{consumed}(t) \geq e_{local}(t)$, c'est-à-dire qu'un foyer ne peut pas recevoir plus d'énergie qu'il n'en consomme.
Le groupement (Figure 1) est donc une simulation à deux niveaux de l'ACC. Le premier niveau permet de simuler l'activité humaine et la consommation d'énergie à l'échelle des foyers. Le second permet la simulation des différentes configurations d'ACC.

4 Modélisation des échanges

4.1 Principe général

Dans cette section nous présentons la notion d'organisation des échanges d'énergie et comment ils sont implémentés. Formellement, nous définissons l'organisation des échanges d'énergie comme l'ensemble des règles contractuelles qui vont permettre d'échanger l'énergie produite localement au sein d'un groupement. En entrée, ces organisations prennent les quantités d'énergie produite et appelée dans le groupement. En sortie, une organisation doit fournir la répartition de l'énergie produite localement c'est-à-dire la quantité d'énergie que chaque foyer a reçu et, si cela s'applique, le prix payé par chacun des foyers pour cette énergie. Dans le groupement, c'est la place locale d'échange qui est responsable de la mise en place de ces règles.

Nos premières enquêtes et études [2] nous ont permis d'identifier trois types d'organisation des échanges entre les foyers que nous allons formaliser :

— Taux fixe : chaque foyer reçoit une quantité

©AfIA 2020

d'énergie selon un taux fixe défini à l'avance

— Taux proportionnel : chaque foyer reçoit une quantité d'énergie en fonction de sa consommation

— Concurrentielle : l'énergie est achetée ou vendue sur un marché où vendeurs et acheteurs interagissent entre eux.

4.2 Taux fixe

Dans le cadre d'une organisation à taux fixe, les différents foyers qui composent un groupement reçoivent une part de l'énergie d'un ou plusieurs moyens de production.
Nous définissons $taux_{énergie}$ une fonction telle que $taux_{énergie}: H \times \text{Prod} \rightarrow [0,1]$, correspondant au taux d'énergie qu'un foyer peut récupérer auprès d'un moyen de production, par rapport à sa production totale. Ce taux peut être contractuellement défini en fonction de différents paramètres : par exemple proportionnellement à la surface des foyers (au tantième) ou en fonction du nombre de foyers dans le groupement. Nous notons $\forall j \in Prod, \sum_{h \in H} taux_{énergie}(h,j) = 1$ la contrainte qui exprime le fait que pour un moyen de production donné, la somme de ses taux d'énergie doit être égale à 1.

Cependant, avec ce type d'organisation il peut arriver qu'un foyer reçoive plus d'énergie qu'il n'en a besoin. Ainsi, nous notons $surplus_{fixe}(t)$ le surplus d'énergie qui apparaît lorsque des foyers ne peuvent pas consommer toute l'énergie que le groupement leur fournit. Il faut alors développer une stratégie pour gérer ce surplus d'énergie. Nous avons identifié deux stratégies possibles : la revente complète du surplus ou une nouvelle répartition avec un algorithme itératif comme présenté à la Figure 2. Cet algorithme calcule le surplus une fois les échanges au sein du groupement réalisés puis va répartir ce surplus entre les foyers ayant encore des besoins.

```
1  Soit n le nombre de foyer tel que besoin(h,c) > 0;
2  Soit surplus_fixe(c) > 0;
3  tant que surplus_fixe(c) ≥ 0 et n ≥ 0 faire
4      residu = surplus_fixe(c);
5      pour chaque foyer h faire
6          si besoin(h,c) > surplus_fixe(c)/n alors
7              besoin(h,c) -= surplus_fixe(c)/n;
8              residu -= surplus_fixe(c)/n;
9              e_local(h,c) = e_local(h,c) + surplus_fixe(c)/n;
10         fin
11         sinon si besoin(h,c) ≥ 0 alors
12             e_local(h,c) = e_local(h,c) + besoin(h,c);
13             besoin(h,c) = 0;
14             residu -= besoin(h,c);
15             n = n - 1;
16         fin
17     fin
18     surplus_fixe(c) = residu
19 fin
```

Figure 2 : Algorithme de répartition itérative du surplus d'énergie pour une organisation à échanges à taux fixe

Pour chaque foyer, nous calculons $avoir(h,t) = \sum_{j \in Prod}[taux_{énergie}(h,j) * e_{produced}(j,t)]$ la quantité d'énergie produite localement et qu'un foyer peut recevoir et $besoin(h,t)$ son besoin en énergie. Deux cas sont alors identifiables :

- $avoir(h,t) < besoin(h,t)$
  - $e_{local}(h,t) = avoir(h,t)$
- $avoir(h,t) > besoin(h,t)$
  - $e_{local} = besoin(h,t)$
  - $surplus(h,t) = avoir(h,t) - besoin(h,t)$

4.3 Taux proportionnel

Au sein d'un groupement pratiquant une organisation à taux proportionnel, les différents foyers reçoivent une partie de l'énergie produite localement proportionnellement à leur besoin en énergie.
Pour la mise en place de cette organisation nous utilisons $E_{produced}(t)$ la quantité totale d'énergie produite au sein d'un groupement. Nous utilisons également $E_{consumed}(t)$ la quantité totale d'énergie consommée par les foyers du groupement.
Nous sommes alors confrontés à deux cas pour répartir l'énergie :
$E_{consumed}(t) > E_{produced}(t)$, dans ce cas pour chaque foyer nous avons :

$$e_{local}(h,t) = \frac{besoin(h,t)}{E_{consumed}(t)} * E_{produced}(t)$$

$E_{consumed(t)} \leq E_{produced}(t)$, dans ce cas pour chaque foyer nous avons :

$$e_{locale}(h,t) = e_{consumed}(h,t)$$

Ce type d'organisation permet de répartir toute l'énergie entre les foyers sans leur attribuer plus que ce qu'ils ne demandent.

4.4 Concurrentielle

Dans une organisation concurrentielle, les différents foyers s'échangent de l'énergie à travers un marché et des processus d'achat et de vente. Nous considérons deux fonctionnements possibles dans nos travaux. Un premier dans lequel les prix sont fixés par les acheteurs et un second qui considère que les vendeurs fixent les prix. Dans les deux cas, nous considérons deux tableaux : $offres_{achat}$ et $offre_{vente}$ contenant chacune des offres de vente et d'achat d'énergie.
Positionnons-nous par exemple dans le cas où les acheteurs fixent les prix. Le tableau $offres_{achat}$ sera composé d'ensembles : $achat = < acheteur, quantité_{achat}, prix >$
Le tableau $offre_{vente}$ quant à lui sera composé d'ensembles : $vente = < vendeur, quantité_{vente} >$.
L'algorithme de calcul de cette organisation va faire correspondre les offres d'achat proposant le prix le plus élevé avec les différents acheteurs. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'énergie à vendre ou que les offres des acheteurs soient satisfaites.

Le processus est identique dans le cas où les vendeurs fixent les prix, sauf que ce sont les offres de vente avec les prix de vente les plus bas qui seront considérées en priorité.
Cette organisation pose également la question de la formation des prix pour les acheteurs et les vendeurs. Nous n'abordons pas cette problématique dans cet article, mais un mécanisme de formation des prix sera intégré dans le futur. Par mesure de simplification, les prix sont pour le moment sélectionnés aléatoirement dans un ensemble donné.
L'organisation concurrentielle proposée ici est un modèle simple, d'autres systèmes concurrentiels seront intégrés dans le futur comme des enchères à doubles carnets d'ordres [12] pour permettre l'étude de différentes organisations concurrentielles d'échanges.

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
Surface	115m²	68m²	72m²	50m²	257m²	95m²	55m²	206m²	59m²	77m²
Réglementation thermique	2020_H1H2	2012	1989	Avant 1974	2000_H1H2	1974	1974	BBC	1974	2000H1H2
Chauffage électrique	Non	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
ECS électrique	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Heures creuses	Base	22h30-6h30	23h00-7h00	23h30-7h30	Base	22h30-6h30	23h30-7h30	22h30-6h30	Base	2h00-7h00 / 14h00 17h00
Panneaux PV	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Nb. Habitants	1	1	2	1	3	4	2	3	1	3
Présence en journée	oui	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui

Tableau 1 : Paramètres des foyers

5 Cas d'étude et résultats

5.1 Contexte de la simulation

Nous considérons un groupement composé de 10 foyers dans la ville de Nice. Dans le Tableau 1 nous donnons les principaux paramètres des foyers étudiés. En plus des caractéristiques du bâtiment, nous fournissons deux informations sur les familles à savoir le nombre d'habitants et s'il y a au moins un retraité ou une personne inactive, c'est-à-dire présente dans le foyer pendant les jours ouvrés. Les activités des individus de ces foyers ont été générées en s'appuyant sur l'Enquête Emploi du Temps de l'INSEE [10].

Dans le groupement, les foyers A, B et C produisent de l'énergie locale grâce à des panneaux PV. Ces trois foyers possèdent chacun une installation PV identique avec les caractéristiques suivantes :

- Surface : 20 m²
- Inclinaison : 30°
- Azimut : Sud

La puissance électrique de chacune de ces installations est de 2,5 kWc (kilowatt-crête). Ces foyers acceptent d'échanger le surplus d'énergie produite avec leurs voisins au sein du groupement. En utilisant ce cas d'étude et notre modèle de groupement, nous évaluons l'impact des différentes organisations des échanges d'énergie sur la consommation d'énergie des foyers et du groupement, ainsi que sur le taux d'autoconsommation.

5.2 Impact de l'organisation des échanges sur l'autoconsommation d'énergie

Dans un premier temps nous allons analyser l'impact des différentes organisations des échanges à l'échelle du groupement. La Figure 3 montre la consommation d'électricité totale au sein du groupement ainsi que la production locale pour le mois de juillet 2019. Pour le mois simulé, le groupement a consommé un total de **1935 kWh** et produit **1638 kWh** grâce aux panneaux PV.

Deux variables sont observées afin d'évaluer l'impact des stratégies d'échanges d'énergie. Tout d'abord, **le taux d'autoconsommation** qui permet de connaître la proportion de la production locale directement consommée par les foyers. Ensuite, **le taux d'autoproduction** d'électricité calculé de la façon suivante :

$$taux_{autoproduction} = \frac{consommation_{locale}}{consommation_{totale}}$$

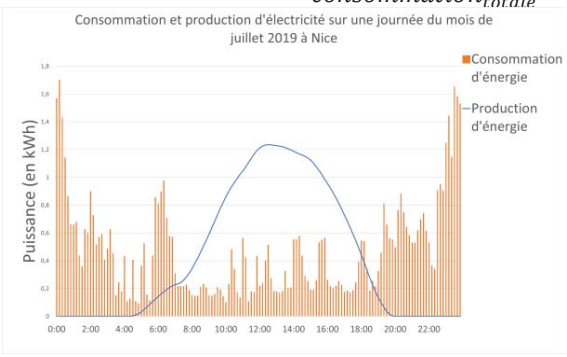


Figure 3 : Consommation et production d'électricité pour une journée de juillet 2019 à Nice

Les taux d'autoproduction du groupement (Tableau 3) sont relativement proches, quelle que soit l'organisation des échanges d'énergie au sein du groupement. Ce résultat provient du fait que les échanges répartissent le maximum d'énergie possible entre les foyers, quelle que soit l'organisation mise en place.

Le Tableau 2 donne le taux d'autoproduction des foyers en fonction de la façon dont les échanges sont réalisés par la PLE. Ces taux sont relativement proches, quelle que soit la façon dont nous organisons les échanges. Cela s'explique principalement par le fait que dans notre cas d'étude, la quantité d'énergie produite par les trois installations PV est largement suffisante pour couvrir les besoins en énergie du groupement en journée.

	Taux d'autoproduction	Taux d'autoconsommation
Taux fixe : tantième	31%	36%
Proportionelle	31%	36%
Concurentielle : au plus offrant	30%	35%

Tableau 3 : Impact des différentes organisations des échanges de l'énergie au sein du groupement

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
Taux fixe : tantième	42%	17%	20%	21%	54%	18%	30%	40%	61%	34%
Proportionnel	40%	16%	20%	23%	51%	19%	30%	37%	60%	37%
Concurrentiel : au plus offrant	37%	19%	21%	21%	49%	17%	28%	35%	58%	35%

Tableau 2 : Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec trois panneaux PV pour le mois de juillet 2019 à Nice

©AfIA 2020

	Foyer A	Foyer B	Foyer C	Foyer D	Foyer E	Foyer F	Foyer G	Foyer H	Foyer I	Foyer J
Taux fixe : tantième	5,64%	0,70%	1,50%	5,25%	7,13%	8,66%	5,61%	15,41%	5,24%	7,30%
Proportionnel	0,80%	0,45%	0,31%	0,82%	0,83%	0,76%	0,81%	1,07%	1,43%	0,77%
Concurrentiel : au plus offrant	15,00%	0,35%	0,25%	0,65%	0,66%	0,60%	0,66%	0,85%	1,21%	0,62%

Tableau 4 : Taux d'autoproduction d'électricité des foyers avec un seul panneau PV pour le mois de décembre 2019 à Lille

Cela se confirme en analysant la consommation en énergie du groupement pendant la journée. Durant cette période, on constate que les foyers ont consommé au total **937 kWh** d'énergie, ce qui est bien inférieur à la production d'électricité du groupement qui est de **1638 kWh**.

Cette simulation met en avant le fait que lorsque la production d'énergie dans un groupement est supérieure à la consommation de celui-ci, l'organisation choisie pour les échanges n'a qu'un faible impact sur la quantité d'énergie reçue par chaque foyer. La quantité d'énergie locale non consommée est alors relativement importante, dans ce cas **1033 kWh** sur la durée totale de la simulation. Cette énergie sera ensuite revendue à l'extérieur du groupement au fournisseur d'électricité.

Afin d'étudier la situation limitante où la quantité d'énergie produite dans le groupement est fortement inférieure à la consommation de ce dernier, nous avons simulé un second cas constitué de 10 foyers situés à Lille pour le mois de décembre 2019. Ici, seul le foyer A possède un moyen de production locale. La Figure 4 montre une journée de simulation dans cette nouvelle configuration, où la production d'énergie locale est très faible par rapport à la consommation totale du groupement.

Les taux d'autoproduction d'électricité des foyers donnés dans le Tableau 4 sont très faibles et on constate des différences entre les différentes stratégies d'échange de l'énergie.

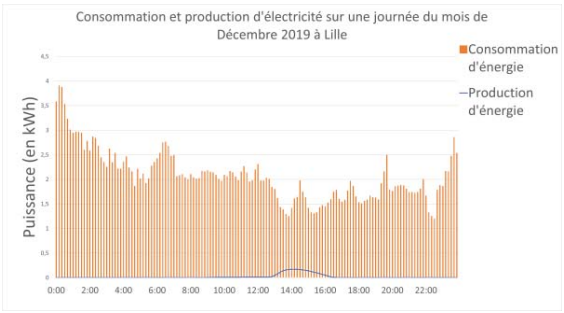


Figure 4 : Consommation et production d'électricité pour une journée de décembre 2019 à Lille

Par exemple, pour le foyer H une organisation à taux fixe basé sur les tantièmes i.e. la surface totale des foyers, permet de multiplier par 15 son taux d'autoproduction d'électricité par rapport à une organisation proportionnelle. La raison principale est que pour la première organisation (taux fixe), les foyers reçoivent l'énergie en fonction de leur surface alors que dans la seconde ils la reçoivent en fonction de leur consommation. Malgré sa surface importante, la consommation du foyer H reste faible car il ne possède pas de chauffage électrique. Ceci contribue fortement à la différence entre les deux politiques d'échange. Une autre différence importante entre les taux d'autoproduction se retrouve pour le foyer A. En effet, le taux d'autoproduction d'électricité pour une organisation concurrentielle augmente grandement par rapport aux deux autres organisations. Cela s'explique par le fait que le foyer A consomme l'énergie qu'il produit en priorité avant de mettre ce qu'il ne consomme pas en vente. D'autres critères pourraient être envisagés pour comparer les résultats entre les foyers en s'appuyant sur des métriques sociales du domaine [5].

Cette simulation a permis de montrer que, dans une situation où l'énergie produite localement est faible par rapport à la consommation d'énergie du groupement, la façon dont les échanges sont organisés a un impact primordial sur l'énergie que chaque foyer recevra. Au-delà de la consommation d'énergie seule, ces différences impacteront également les flux financiers au sein du groupement, ce qui en fera un critère de choix de l'organisation optimale.

6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons présenté une simulation à deux niveaux pour l'étude de configurations d'ACC collective de l'énergie : un ensemble de SMA basés sur la plateforme SMACH simulant l'activité humaine et la consommation électrique de chacun des foyers, et le groupement, un second système multi-agent dont le rôle est de permettre l'échange d'énergie. Nous présentons également différentes possibilités pour échanger de l'énergie. Les résultats semblent indiquer que ces différentes organisations d'échange de l'énergie ont un impact sur la consommation des foyers. L'impact est faible lorsque la production suffit à subvenir aux besoins. Au contraire, la modalité d'échange de l'énergie a un impact plus fort lorsque la production locale d'énergie est faible par rapport à la consommation totale d'énergie.

Les résultats de notre étude ont également mis en avant qu'une grande quantité d'énergie produite n'a pas pu être utilisée lorsque la production est importante. Pour augmenter le taux d'autoconsommation, une solution est d'introduire des systèmes de stockage collectifs ou individuels dans le groupement, afin de rendre disponible l'énergie de manière différée. L'ajout de tels systèmes s'accompagnerait de la mise en œuvre d'une politique spécifique de stockage, à savoir un ensemble de règles au sein du groupement et des foyers pour définir le contrôle des séquences de stockage et de déstockage. L'implémentation de systèmes et politiques de stockage est la suite directe de notre travail.

L'autoconsommation collective peut impacter la politique énergétique des foyers individuels, c'est-à-dire leur relation à la consommation d'énergie et les processus de décision associés à leur utilisation des appareils électriques. La modélisation de politiques d'échange et de consommation spécifiques à cette situation est donc également à envisager. Il pourra s'agir de politiques impactant le comportement des habitants, notamment en leur faisant déplacer certaines activités consommatrices d'énergie, ou leur rôle dans les échanges en choisissant par exemple de stocker leur surplus pour une utilisation individuelle future.

Remerciements

Ce travail a été financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER)

Référence

[1] Albouys-Perrois, J. et al. 2019. A Co Simulation Of Photovoltaic Power Generation And Human Activity For Smart Building Energy Management And Energy Sharing. *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*. 16, (2019).

[2] Albouys-Perrois, J. et al. 2019. Simulation multi-agent de l'autoconsommation collective en relation avec l'activité des foyers. *JFSMA 2019. Systèmes distribués, embarqués et diffus*. (2019).

[3] Amouroux, E. et al. 2013. SMACH: Simuler l'activité humaine pour limiter les pics de consommation électrique. *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*. (2013).

[4] Beynier, A. and Estivie, S. 2013. Optimizing distributed resource exchanges in multiagent systems under uncertainty. *Distributed and Multi-Agent Planning*. (2013), 8.

[5] Brams, S.J. and King, D.L. 2005. Efficient Fair Division: Help the Worst off or Avoid Envy? *Rationality and Society*. 17, 4 (Nov. 2005), 387–421. DOI:https://doi.org/10.1177/1043463105058317.

[6] Horling, B. and Lesser, V. 2005. A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms. *The Knowledge Engineering Review*. (2005), 281–316.

[7] Luthander, R. et al. 2015. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 142, (2015), 80–94. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028.

[8] Matallanas, E. et al. 2011. Analysis of the Self-Consumption Possibilities in Small Grid-Connected Photovoltaic Systems in Spain. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. (2011), 6.

[9] Plessis, G. et al. 2014. BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems. (2014). DOI:https://doi.org/10.3384/ECP140961161.

[10] Reynaud, Q. et al. 2017. Using Time-Use Surveys in Multi Agent Based Simulations of Human Activity. *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence - Volume 1: ICAART*. Icaart (2017), 67–77. DOI:https://doi.org/10.5220/0006189100670077.

[11] Smith, R.G. 1980. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on computers*. 12 (1980), 1104–1113. DOI:https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516.

[12] Vytelingum, P. et al. 2010. Trading agents for the smart electricity grid. *9th International Conference on AAMAS 2010*. (2010), 897–904.

©AfIA 2020

Double adaptation de domaine pour la détection d'objets

Hiba Alqasir, Damien Muselet, Christophe Ducottet[1]

[1] Université de Lyon, UJM-Saint-Etienne, CNRS, IOGS, Laboratoire Hubert Curien
UMR5516, F-42023, Saint-Etienne, France

Résumé

En apprentissage automatique, l'adaptation de domaine est nécessaire pour améliorer les performances d'un modèle lorsque les distributions des données d'apprentissage et de test sont différentes. Dans ce travail, nous abordons ce problème dans le cadre de la détection d'objets. Après une analyse détaillée du détecteur Faster R-CNN classique, nous montrons que l'adaptation du sous-réseau de proposition de région est cruciale et proposons une solution originale. Nous menons des expériences dans deux contextes d'application différents, la conduite autonome et la vidéo-surveillance des remontées mécaniques, et montrons que notre schéma d'adaptation améliore clairement les résultats de la solution précédente.

Mots-clés

Détection d'objets, adaptation de domaine, apprentissage en profondeur, Faster R-CNN .

Abstract

Domain adaptation is needed to be able to train a model performing well in a target domain with few or no annotations. In this work, we address this domain adaptation problem in the context of object detection. After a detailed analysis of the classical Faster R-CNN detector, we show that adapting the region proposal sub-network is crucial and propose an original way to do it. We run experiments in two different application contexts, namely autonomous driving and ski-lift video surveillance, and show that our adaptation scheme clearly outperforms the previous solution.

Keywords

Object detection, Domain Adaptation, Deep learning, Faster R-CNN.

1 Introduction

Object detection in images refers to the task of automatically finding all instances of given object categories outputting, for each instance, a bounding box and the object category. Recently, approaches based on deep Convolutional Neural Networks (CNNs) have invaded the field thanks to both their efficiency and their outstanding performances [18, 17]. To address a given computer vision problem, these methods require large training datasets with instance-level annotations. However, for most real world applications, few annotations are available due to the lack of image sources, copyright issues or annotation cost. To overcome this problem, a current trend consists in training the network on a large public annotated dataset (source domain), while adapting the network features to the tested dataset (target domain). This approach is called domain adaptation [14, 23]. If no annotations are available in the target domain, the domain adaptation is referred as unsupervised. In this context, the case of autonomous driving has been extensively addressed and a variety of datasets exists covering different urban scenes situations, illumination and weather conditions [4, 6]. In this paper, we are particularly interested in unsupervised domain adaptation in a ski lift video surveillance scenario. The purpose is to detect dangerous situations during chairlift boarding by detecting relevant objects of the scene (e.g. security bar, skiers). Instance level annotations are available for a reference chairlift where the chair model, the perspective view or boarding system may be different from the target chairlift [2].

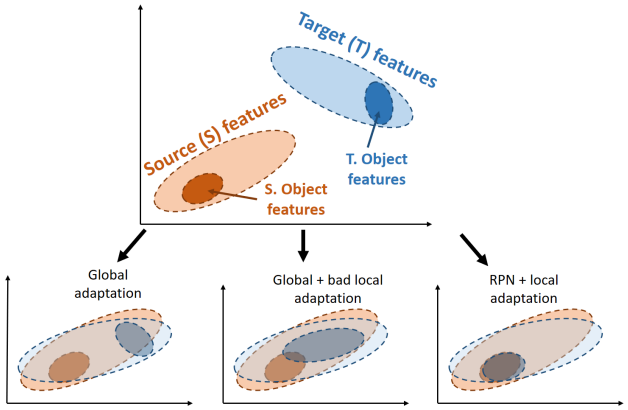


FIGURE 1 – Illustration of global, local and RPN adaptation (see text for details).

Surprisingly, few works explicitly address the problem of unsupervised domain adaptation for object detection. Most approaches study the supervised case basically by fine-tuning a model pre-trained on the source dataset with few annotated images from the target domain, eventually freezing some layers to concentrate the training on the last layers [8, 22]. Other recent approaches try to reduce the domain shift by transforming the source domain to make it close to the target one using style transfer [12]. The most significant contribution of domain adaptive object detection was proposed by [3]. Following [5], they added adversarial

©AfIA 2020

training components in the classical Faster R-CNN detector, in order to adapt both globally and locally the detector. Given the features from the two domains and considering the subset of features specific to the object (Fig. 1), a global adaptation, as illustrated in the bottom left of Fig. 1, may not match source and target object features. Thus, Chen et al. [3] also propose to adapt the features pulled from the regions returned by the Region Proposal Network (RPN). We argue that, since the RPN is trained on the source domain, the proposals from the target images may be wrongly detected and the local features used for the adaptation may be outside the target object features set (bottom center in Fig. 1). In this paper, we propose to adapt the RPN in order to ensure the features extracted from the target images overlap with the source object features. A local adaptation through adversarial learning will thus better align source and domain features (bottom right in Fig. 1).
Our contributions are threefold : 1) We present a new viewpoint about the domain shift problem in object detection. 2) We propose to adapt the RPN as a global feature adaptation and integrate this new adaptation module in Faster R-CNN. 3) We run extensive experiments in two different applications contexts : autonomous driving and ski lift video surveillance.

2 Related Work

Object Detection The first approaches proposed in the context of CNN were based on the region pooling principle [21, 8]. In R-CNN [8], candidate regions detected by selective search were represented by a subset of pooled features and evaluated by an instance classifier. This two-stages principle was further refined in Faster R-CNN [18] with a common CNN backbone to extract the whole image features and two different sub-pipelines : the first one called RPN to generate proposals of regions which are likely to contain objects and the second one which is basically a classification and regression network aiming to refine the location and size of the object and to find its class. Besides these two-stage approaches, one-stage approaches directly predict box location, size and class in a single pipeline either by using anchor boxes with different aspect ratios [13] or by solving a regression problem on the feature grid [17]. Interested readers can refer to the review of recent advances in object detection in [1]. Since Faster R-CNN [18] provides very accurate results and has been largely studied, we propose to consider this network as a baseline in this paper.

Domain Adaptation Unsupervised domain adaptation is needed when we want to learn a predictor in a target domain without any annotated training samples in this domain [14, 23]. Obviously, annotations are available in a source domain which is supposed to be close to the target one. Two main types of methods have been proposed in this context. The first one is to try to match the feature distribution in the source and target domains either by finding a transformation between the domains [15] or by directly adapting the features [10]. One noticeable example is the gradient reversal layer approach proposed by Ganin et al. [5] that attempts to match source and target feature distributions. They propose to jointly optimize the class predictor and the source-target domain disparity by back-propagation. The second type of methods relies on Generative Adversarial Networks (GANs) [11]. The principle is to generate annotated synthetic target images from the source images and to learn (or fine-tune) the network on these synthetic target data [12].

Domain adaptation for object detection Few works consider domain adaptation for object detection particularly in the unsupervised setting. [16] proposes class-specific subspace alignment to adapt RCNN [8] and [3] uses adversarial training inspired by [5] to adjust features at two different levels of a Faster R-CNN architecture. The adaptation at image level intends to eliminate the domain distribution discrepancy at the output of the backbone network while the instance level adaptation concerns the features which are pooled from a Region of Interest (RoI), before the final category classifiers. Following the same adversarial training approach, Saito et al. [19] argue that a global matching may hurt performance for large domain shifts. They thus propose to combine a strong alignment of local features and a weak alignment of global ones. To the best of our knowledge, none of the previous works considers the adaptation of the region proposal sub network of Faster R-CNN. They are then sensitive to any shift in the distribution of object bounding boxes between source and target domains.

In this work, we propose to incorporate two adversarial domain adaptation modules in Faster R-CNN : the first one at RPN-level to address the source-target domain shift of features of the region proposal module and the second one at instance-level to adapt the RoI-pooled features used in the final classification module.

3 Our approach

In order to explain our adaptation scheme, we have to explain in details the work-flow of Faster R-CNN [7], summarized in Fig. 2. Then, we present our approach to adapt this detector between different domains.

3.1 Faster R-CNN

Faster R-CNN is basically composed of two convolutional blocks called C_1 and C_2, providing two feature maps F_1 and F_2, respectively (cf. Fig. 2). Based on F_2, the RPN predicts a set of box positions used to crop the F_1 feature map using the RoI pooling layer (called RP layer, hereafter). It is worth mentioning that the gradient can not be back-propagated through the RP layer towards the RPN, because this step is not differentiable. The authors of Faster R-CNN resort to an alternating training to cope with this problem [7]. It is crucial to understand this point when one wants to apply domain adaptation to Faster R-CNN. It means that we can not just plug a domain adaptation module after the last layers of Faster R-CNN (namely F_{3i}) and adapt in one shot the classification layers and the convolution blocks C_1

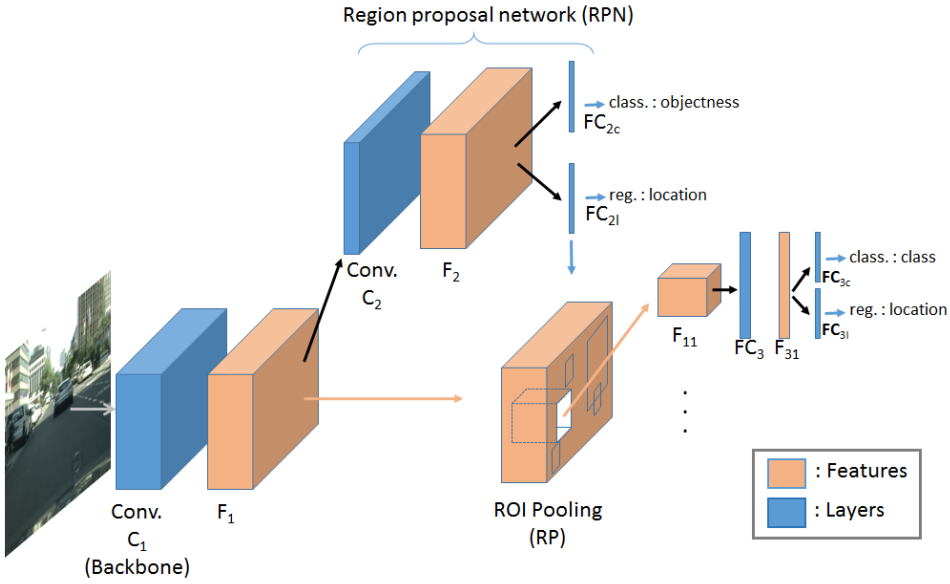


FIGURE 2 – Faster R-CNN Workflow.

and C_2.

Back to the workflow of Faster R-CNN, the outputs F_{1i}, $i = 1, ..., N_p$, of the RP layer are cropped and resized parts of the F_1 feature map. N_p is the number of proposals returned by the RPN. The feature maps F_{1i} are then sent to shared fully connected layers FC_3 whose outputs F_{3i} are used to take the final decision of class and location.

From this workflow, we note that the classification and regression layers take as inputs either F_2 or F_{3i}, which are the key feature maps of the detector. In the next section, we present how these feature maps can be adapted between the two domains.

3.2 Adapting Faster R-CNN

Let us consider a source domain $\mathcal{S}$ with $N_\mathcal{S}$ images $\{I_i^\mathcal{S}\}$, $i = 1, ..., N_\mathcal{S}$, each containing $n_i^\mathcal{S}$ objects, located at the positions $l_{ij}^\mathcal{S}$ and associated with the classes $c_{ij}^\mathcal{S}$, $j = 1, ..., n_i^\mathcal{S}$. Likewise, we denote $\mathcal{T}$ a target domain constituted of $N_\mathcal{T}$ target images $\{I_i^\mathcal{T}\}$, $i = 1, ..., N_\mathcal{T}$, each containing $n_i^\mathcal{T}$ objects, located at the positions $l_{ij}^\mathcal{T}$ and associated with the classes $c_{ij}^\mathcal{T}$, $j = 1, ..., n_i^\mathcal{T}$.

If the two domains are different (cameras, viewpoints, weather conditions,...), there exists a domain shift between the joint distributions $P(I^\mathcal{S}, l^\mathcal{S}, c^\mathcal{S})$ and $P(I^\mathcal{T}, l^\mathcal{T}, c^\mathcal{T})$. In this case, we can not train the detector on the source data and obtain good results on the target data, without adaptation. The aim of domain adaptation is to decrease this distribution discrepancy so that $P(I^\mathcal{S}, l^\mathcal{S}, c^\mathcal{S}) \approx P(I^\mathcal{T}, l^\mathcal{T}, c^\mathcal{T})$. In the context of unsupervised domain adaptation, the labels (locations and classes) of the target data are not available and this is not an easy task to decrease the joint distribution discrepancy. By applying the Bayes' rule on the joint distribution, we obtain, for the source domain :

$$P(I^\mathcal{S}, l^\mathcal{S}, c^\mathcal{S}) = P(l^\mathcal{S}, c^\mathcal{S}|I^\mathcal{S})P(I^\mathcal{S}) \quad (1)$$

Most of the domain adaptation approaches assume a covariate shift, which means that the shift between the source and target joint distributions is caused by the marginal distributions $P(I)$, while the conditional distributions $P(l, c|I)$ are constant across domains, i.e. $P(l^\mathcal{S}, c^\mathcal{S}|I^\mathcal{S}) = P(l^\mathcal{T}, c^\mathcal{T}|I^\mathcal{T})$. Under this assumption, in order to decrease the joint distribution discrepancy, we have just to decrease the marginal distribution shift, so that $P(I^\mathcal{S}) \approx P(I^\mathcal{T})$. In order to change the marginal distributions of the images, the classical approaches apply a transform T on the image features, so that $P(T(I^\mathcal{S})) \approx P(T(I^\mathcal{T}))$. Usually, the transform T is a part of a convolution neural network.

In this paper, we propose to consider and adapt different feature maps extracted from the images. By looking at Fig. 2, we note that two feature maps are used as input for classification and regression layers, namely the F_2 feature map and the F_{3i} feature vectors. So, in order to adapt the detector to the source domain, we have to adapt the marginal distributions of F_2 and F_{3i}, so that $P(F_2^\mathcal{S}) \approx P(F_2^\mathcal{T})$ and $P(F_{3i}^\mathcal{S}) \approx P(F_{3i}^\mathcal{T})$.

In order to enforce these distributions to be closer, we propose to resort to an adversarial domain adaptation approach [5] called GRL for gradient reversal layer. Note that any other adversarial domain adaptation algorithms could have been used, we just use this one for a fair comparison with DA-Faster [3]. When plugged on a feature map F_k, the idea of GRL is to minimize the discrepancy between the feature distributions over the source and target domains $P(F_k^\mathcal{S})$ and $P(F_k^\mathcal{T})$ [5]. If the GRL is able to perfectly overlap these two distributions, we can conclude that the features extracted at this point of the network (F_k) are domain invariant and so can be applied either on the source or target domain with equivalent accuracies.

From the previous analysis, it is obvious that two GRL modules should be inserted in the detector : one after the

©AfIA 2020

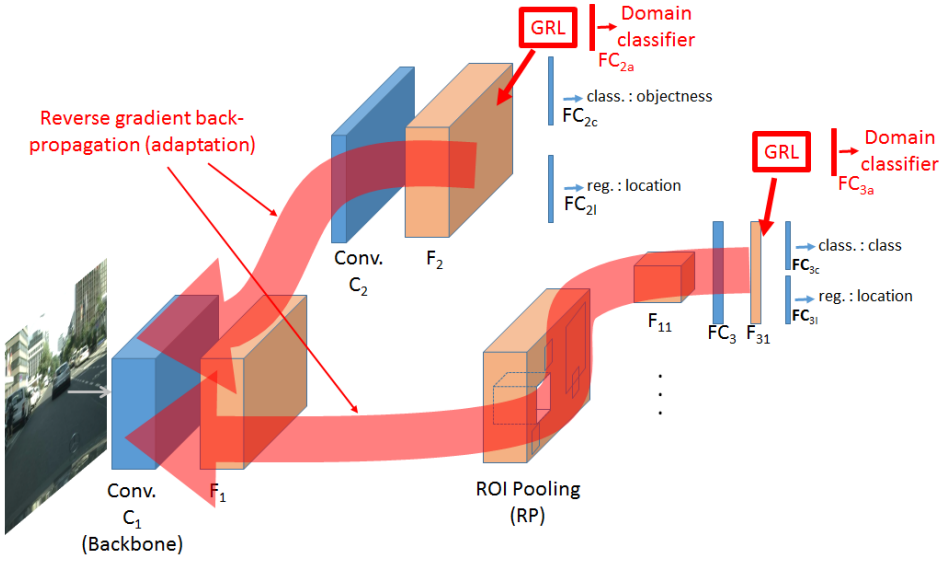


FIGURE 3 – Our domain adaptation for Faster R-CNN. See text for details

feature map F_2 and one after the feature vector F_{3i}. It is worth mentioning that, when we plug a GRL module to a feature map, we back-propagate the (reverse-)gradient until the first layer of the C_1 convolutional block. Thus, the main advantage of our approach is that the reversal gradients are back-propagated through all the layers of the detector. Consequently, the backbone, the RPN and the local features are all adapted (see Fig. 3).

Formally, at training time, the total loss corresponding to a given training image $I_k \in I^{\mathcal{S}} \cup I^{\mathcal{T}}$ from domain $d_k \in \{\mathcal{S}, \mathcal{T}\}$ is given by :

$$L = L_{Fst} - \lambda \sum_{i,j} L_H \left(FC_{2a}(F_2^{i,j}(I_k)), d_k \right) - \lambda \sum_{i=1}^{N_p} L_H \left(FC_{3a}(F_{3i}(I_k)), d_k \right) \quad (2)$$

where L_{Fst} denotes the original Faster R-CNN loss activated only if $I_k \in I^{\mathcal{S}}$, L_H denotes the cross-entropy loss, λ denotes the trade-off parameter to balance Faster R-CNN loss and domain adaptation losses, FC_{2a} and FC_{3a} denote the fully connected predictors for domain adaptation, $F_2^{i,j}(I_k)$ denotes the feature vector at location (i, j) of feature map F_2 for image I_k, and $F_{3i}(I_k)$ denotes the feature vector corresponding to the proposal region i of image I_k.

We note that the recent domain adaptive detection approaches ([3, 19]) have not tried to adapt the RPN layer and we think that this is a strong weakness of these approaches. Indeed, as mentioned in [3] (called DA-Faster hereafter), the image-level adaptation is enforcing the F_1 target and source feature distributions to be closer but it is very hard to perfectly align them. This is one of the reasons why DA-Faster approach also applies instance level adaptation. But, it is clear in Fig. 2, that if F_1 features are not well adapted between the domains, the output of the RPN will also be different between the domains and consequently, the locations where the boxes F_{1i} are cropped from F_1 will be domain dependent. Therefore, the instance-level adaptation on F_{3i} features will not help to adapt the object detector between domains, since it will work on local features which are not equivalent between the domains (see Fig. 1).

4 Experiments

4.1 Experiment Setup

To evaluate the efficiency of our approach we conduct experiments in two contexts : autonomous driving and video surveillance of ski lifts. In each case, we train on a source dataset and test on a target dataset from a different domain. During training, likewise the other domain adaptive approaches, we use also images from the target domain, but without any label, while the source dataset images are provided with their bounding boxes instance annotations.

The baseline is Faster R-CNN model trained only on the source dataset. As mentioned earlier, our solution is inspired from DA-Faster [3] but our contribution is in the analysis of the domain shift in Faster R-CNN, conducting to the solution that the domain adaptation module (GRL) should be plugged at the RPN level. Consequently, the aim of these experiments is to compare DA-Faster with our approach in order to check the validity of our contribution in practice. Thus, adapting the RPN in other solutions such as [19], or using other adaptation modules than GRL such as [14, 23] might have provided better results, but it is out of the scope of this paper. Thus, for all the experiments, we compare our approach with DA-Faster [3].

As mentioned in [19], the results provided by the authors of DA-Faster are unstable and Saito et al. proposed to re-implement their own code for DA-Faster, conducting to lower results than the original paper [3]. So likewise [19], we report the results of DA-Faster with the implementa-

TABLE 1 – Detection results on Foggy Cityscapes (trained on Cityscapes dataset). The AP50 is reported for each class as well as the average APcoco, AP50 and AP75 over all classes.

	person	rider	car	truck	bus	train	mcycle	bicycle	APcoco	AP50	AP75
Faster R-CNN	18.8	20.5	24.2	17.0	8.0	6.2	7.2	5.0	06.20	13.35	05.42
DA Faster R-CNN	27.3	35.7	44.1	20.3	35.2	8.9	16.2	23.6	12.28	26.41	10.02
DA Faster R-CNN*	25.0	31.0	40.5	22.1	35.3	20.2	**20.0**	27.1	-	27.6	-
Ours	**27.8**	**35.8**	**45.1**	**23.5**	**42.1**	**26.1**	18.0	**27.6**	**13.70**	**30.47**	**11.04**

tion provided by [9] with the same hyper-parameters as our solution (results denoted *DA-Faster* hereafter), as well as the results provided by the original paper [3] (denoted *DA-Faster**), when available on the considered dataset.

To evaluate object detection we report the mean Average Precision (mAP) with intersection over union (IoU) threshold at 0.5 (denoted AP50), the mAP with IoU threshold of 0.75 (AP75) and the mAP averaged over multiple IoU from 0.5 to 0.95 with a step size of 0.05 (APcoco). The network is trained in an end-to-end manner using back-propagation and the stochastic gradient descent (SGD) algorithm. As a standard practice, Faster R-CNN backbone is initialized with pre-trained weights on ImageNet classification. We use a learning rate of 0.001 for 50k iterations, and 0.0001 for the next 20k iterations. Each iteration has 2 mini-batches, one from source domain and the other from target domain. The trade-off parameter λ to balance Faster R-CNN loss and domain adaptation loss is set to 0.1 as in [3]. We use a momentum of 0.9 and a weight decay of 0.0005.

4.2 Autonomous driving

In this context we evaluate the domain adaptive detectors for two domain shifts : weather conditions (foggy and not foggy) and acquisition conditions (different cameras, different viewpoints and different scenes).

FIGURE 4 – One image from each dataset : the Cityscapes dataset (left), its foggy version (right) and the KITTI dataset (bottom).

Cityscapes → Foggy Cityscapes. In the first experiment we use the Cityscapes dataset [4] as source domain. It is a urban scene dataset with 2975 training images and 500 validation images. The 1525 unlabeled images are not considered. For training the network, we are using the 2975 train images and do not consider the validation images. There are 8 categories with instance annotations in this dataset, namely *person, rider, car, truck, bus, train, mortorcycle* and *bicycle*. The target domain is the Foggy Cityscapes [20] dataset generated by applying fog synthesis on the Cityscapes dataset to simulate fog on real scenes (see Fig. 4). Thus, the number of images and labels are exactly the same as for Cityscapes dataset. For testing the detection, we are using the 500 validation images from Foggy Cityscapes. The results are summarized in Table 1. First, we can note that, without domain adaptation, the results of Faster R-CNN are very bad, underlying the strong need of adapting the network in case of weather condition variations. Thus, DA-Faster improves the results over Faster R-CNN, but we note that our approach clearly outperforms DA-Faster on this dataset, showing that the RPN adaptation helps in adapting the detector in case of weather condition variations.

Cityscapes → KITTI. In this experiment Cityscapes is the source domain, and KITTI [6] is the target domain (see Fig. 4). KITTI is a benchmark for autonomous driving which consists of 7481 training images. Since the test set is not annotated we use all the training images with their annotations at test time to evaluate the performance. Only one category (*car*) is annotated in KITTI, so we consider this single class for evaluation. The results are summarized in Table 2. Once again, we note that the domain adaptation helps improving Faster R-CNN results. We see also that our approach outperforms DA-Faster for all the criteria when using the same hyper-parameters. The results provided in [3] are better than ours for $AP50$, but note that the implementation and hyper parameters are different from our tests. The comparison is therefore not fair.

TABLE 2 – Detection results in KITTI training set (trained in Cityscapes dataset) for one class (Car) detection.

	APcoco	AP50	AP75
Faster R-CNN	26.73	58.60	21.54
DA Faster R-CNN	27.51	60.38	22.67
DA Faster R-CNN*	-	**64.1**	-
Ours	**28.39**	61.32	**23.59**

4.3 Video surveillance of ski lifts

The MIVAO research project was launched in collaboration with a french start-up Bluecime, based on the needs of ski lift operators to secure chairlifts. MIVAO aims to develop a computer vision system that acquires images from

©AfIA 2020

TABLE 3 – Detection results on the chairlift dataset. First, adaptation from chairlift 1 to chairlift 2, and second adaptation from chairlift 2 to chairlift 1.

	$ch1 \rightarrow ch2$			$ch2 \rightarrow ch1$		
	APcoco	AP50	AP75	AP	AP50	AP75
Faster R-CNN	30.34	99.49	0.30	36.56	98.98	9.86
DA Faster R-CNN	50.51	99.50	**33.4**	42.56	98.99	11.1
Ours	**50.93**	**99.99**	30.7	**48.83**	**99.00**	**45.6**

the boarding station of chairlifts, analyzes the important elements (people, chairlift carrier, safety bar, ...) and triggers an alarm in case of dangerous situations. In this paper, we tackle this problem as an object detection task trying to detect the safety bar in the image, considering that it has to be closed when the chairlift leaves the boarding station. Across the ski resorts, the viewpoint, the background, the carrier geometry and the camera may be different and domain adaptive detectors are required to install new systems without a fastidious and time-consuming step of manual annotation.

Chairlift dataset For this experiment, we have created a dataset with images from two different chairlifts, called hereafter chairlift 1 and chairlift 2. The dataset contains 3864 images from chairlift 1 and 4260 images from chairlift 2. Example images are provided in Fig. 5. We can note that the main differences between the two chairlifts are in the viewpoints which are slightly different and in the presence of a cluttered background in the chairlift 2.

FIGURE 5 – Example images from our chairlift dataset. The two left images are from chairlift 1 and the two right images are from chairlift 2. The box annotations (open :red and close :green) are provided for the two right images, for illustration.

The images are centered on the chairlift and manually labeled with the position and the dimensions of the bounding box containing the safety bar. From this information, we have created instance annotations with two categories : open safety bar and close safety bar, as illustrated on the two right images from Fig. 5.

Evaluation The results are provided in Table 3. By training the baseline Faster R-CNN using images from one chairlift and test it on images from another chairlift, the results were surprisingly very good in terms of AP50. This can be explained by the important size of the ground truth bounding boxes that have high chance to well overlap random bounding boxes with similar dimensions. Obviously, when looking at the more demanding criteria such as $APcoco$ or $AP75$, the need of domain adaptation is evident for precise object detection. The results show that the two domain adaptive detectors (DA-Faster and ours) are equivalent for the adaptation from chairlift 1 to chairlilft 2, but they also show that our adaptation is much better than DA-Faster for the adaptation from chairlift 2 to chairlift 1. It is difficult to explain why DA-Faster is less accurate in one direction ($ch2 \rightarrow ch1$) than in the other direction ($ch1 \rightarrow ch2$). One assumption could be that in DA-Faster, the RPN is better trained on chairlift 1 since in this case the background is less cluttered. Thus, when applying it on chairlift 2, the adaptation process tends to promote features from the foreground and both the proposal and the classification are good. On the contrary, if the RPN is trained on chairlift 2, it will rely on cluttered features which are removed with the global adaptation and thus, for DA-Faster, the proposals will be bad on chairlift 1, leading to an important residual domain shift in the results. On the contrary, in our method, since the RPN is directly adapted, the residual shift is lower (see figure 1 and the related explanation in section 1).

5 Conclusion

In this paper, we have tackled the problem of domain adaptation for object detection. After a detailed analysis of the complete workflow of the classical Faster R-CNN detector, we have proposed to adapt the features pulled from this network at two different levels : one adaptation at a global level in the Region Proposal Network and one adaptation at the local level for each bounding box returned by the RPN. We have shown that these two adaptations are complementary and provide very good detection results. We have tested our solution on two different applications, namely the autonomous driving and the chairlift security. As future works, we propose to test more accurate adaptation procedures such as the approaches presented in [14, 23]. These methods could help in the learning step to reach stable solutions which is a strong weakness of the domain adaptive Faster R-CNN. Furthermore, it could be interesting to adapt the features at different depth of the network as recommended by [19].

Références

[1] Shivang Agarwal, Jean Ogier Du Terrail, and Frédéric Jurie. Recent advances in object detection in the age of deep convolutional neural networks. *arXiv preprint arXiv :1809.03193*, 2018.

[2] Kevin Bascol, Rémi Emonet, Elisa Fromont, and Raluca Debusschere. Improving chairlift security with deep learning. In *International Symposium on Intelligent Data Analysis*, pages 1–13. Springer, 2017.

[3] Yuhua Chen, Wen Li, Christos Sakaridis, Dengxin Dai, and Luc Van Gool. Domain adaptive faster r-cnn for object detection in the wild. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 3339–3348, 2018.

[4] Marius Cordts, Mohamed Omran, Sebastian Ramos, Timo Rehfeld, Markus Enzweiler, Rodrigo Benenson, Uwe Franke, Stefan Roth, and Bernt Schiele. The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 3213–3223, 2016.

[5] Yaroslav Ganin and Victor Lempitsky. Unsupervised domain adaptation by backpropagation. *arXiv preprint arXiv :1409.7495*, 2014.

[6] Andreas Geiger, Philip Lenz, Christoph Stiller, and Raquel Urtasun. Vision meets robotics : The kitti dataset. *The International Journal of Robotics Research*, 32(11) :1231–1237, 2013.

[7] Ross Girshick. Fast r-cnn. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pages 1440–1448, 2015.

[8] Ross Girshick, Jeff Donahue, Trevor Darrell, and Jitendra Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 580–587, 2014.

[9] Ross Girshick, Ilija Radosavovic, Georgia Gkioxari, Piotr Dollár, and Kaiming He. Detectron. `https://github.com/facebookresearch/detectron`, 2018.

[10] Xavier Glorot, Antoine Bordes, and Yoshua Bengio. Domain adaptation for large-scale sentiment classification : A deep learning approach. In *Proceedings of the 28th international conference on machine learning (ICML-11)*, pages 513–520, 2011.

[11] Ian Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, and Yoshua Bengio. Generative adversarial nets. In *Advances in neural information processing systems*, pages 2672–2680, 2014.

[12] Naoto Inoue, Ryosuke Furuta, Toshihiko Yamasaki, and Kiyoharu Aizawa. Cross-domain weakly-supervised object detection through progressive domain adaptation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 5001–5009, 2018.

[13] Wei Liu, Dragomir Anguelov, Dumitru Erhan, Christian Szegedy, Scott Reed, Cheng-Yang Fu, and Alexander C Berg. Ssd : Single shot multibox detector. In *European conference on computer vision*, pages 21–37. Springer, 2016.

[14] Mingsheng Long, Zhangjie Cao, Jianmin Wang, and Michael I Jordan. Conditional adversarial domain adaptation. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, pages 1640–1650, 2018.

[15] Sinno Jialin Pan, Ivor W Tsang, James T Kwok, and Qiang Yang. Domain adaptation via transfer component analysis. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 22(2) :199–210, 2010.

[16] Anant Raj, Vinay P Namboodiri, and Tinne Tuytelaars. Subspace alignment based domain adaptation for rcnn detector. *arXiv preprint arXiv :1507.05578*, 2015.

[17] Joseph Redmon, Santosh Divvala, Ross Girshick, and Ali Farhadi. You only look once : Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 779–788, 2016.

[18] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, and Jian Sun. Faster r-cnn : Towards real-time object detection with region proposal networks. In *Advances in neural information processing systems*, pages 91–99, 2015.

[19] Kuniaki Saito, Yoshitaka Ushiku, Tatsuya Harada, and Kate Saenko. Strong-weak distribution alignment for adaptive object detection. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, 2019.

[20] Christos Sakaridis, Dengxin Dai, and Luc Van Gool. Semantic foggy scene understanding with synthetic data. *International Journal of Computer Vision*, pages 1–20, 2018.

[21] Pierre Sermanet, David Eigen, Xiang Zhang, Michaël Mathieu, Rob Fergus, and Yann LeCun. Overfeat : Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks. *arXiv preprint arXiv :1312.6229*, 2013.

[22] Bharat Singh and Larry S Davis. An analysis of scale invariance in object detection snip. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pages 3578–3587, 2018.

[23] Eric Tzeng, Judy Hoffman, Kate Saenko, and Trevor Darrell. Adversarial discriminative domain adaptation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 7167–7176, 2017.

©AfIA 2020

Modèle d'Interruption pour la Répartition des Tâches : Application à une simulation de colonie d'abeilles.

Thomas Alves[1], Jérémy Rivière[1],Cédric Alaux[2],Yves Le Conte[2]
Frank Singhoff[1,4], Thierry Duval[3], Vincent Rodin[1]
[1] Univ Brest, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, Brest, France
{prenom.nom}@univ-brest.fr
[2] INRAE, UR 406 Abeilles et Environnement, Avignon, France
cedric.alaux@inrae.fr, yves.le-conte@inrae.fr
[3] IMT Atlantique, Lab-STICC, CNRS, UMR 6285, Brest, France
thierry.duval@imt-atlantique.fr
[4] Groupement de Défense Sanitaire Apicole du Finistère (GDSA29), France

Résumé

Les principaux modèles d'allocation de tâches reposent sur l'hypothèse que chaque tâche est associée à un stimulus, et que l'exécution de cette tâche réduit ce stimulus. Dans cet article, nous proposons un modèle basé sur les modèles classiques "à seuil" (Fixed Threshold Models) et sur la motivation intrinsèque de l'agent, qui permet de traiter des tâches déconnectées de stimulus. Chaque agent utilise cette motivation, influencée par ses performances dans la réalisation de la tâche, pour évaluer la priorité de cette tâche et décider de l'interrompre ou de la poursuivre. Nous avons implémenté ce modèle afin de simuler la répartition des tâches dans une colonie d'abeilles simplifiée. Les premiers résultats montrent que la répartition des tâches est efficace et robuste, et que l'utilisation de la motivation intrinsèque comme mécanisme d'interruption semble l'améliorer.

Mots-clés

Simulation à base d'agents, Répartition des tâches, Auto-Organisation, Insectes sociaux.

Abstract

Task allocation model often rely on the assumption that each task is associated to a stimulus, and executing this task will lower the intensity of that stimulus. We propose here a model based on response thresholds model associated with intrinsic motivation and internal states of the agents able to handle tasks dissociated of stimulus. Each agent will estimate how important is its current task based on its results and decide wether to interrupt or pursue its current task. Preliminary work shows that task allocation is effective and that our interruption model seems to improve the overall results.

1 Introduction

La capacité des insectes sociaux à répartir leur main-d'œuvre sans aucun contrôle central est étudiée depuis plus d'une vingtaine d'années. Cette capacité d'adaptation dynamique à leur environnement permet aux insectes sociaux d'être résistants aux changements et de continuer à prospérer. En informatique, et plus particulièrement dans les systèmes multi-agents, les modèles de répartition des tâches adaptés des insectes sociaux sont nombreux et efficaces, utilisés par exemple en simulation [1], [2] et pour la résolution générale de problèmes [3], [4]. Les modèles de répartition des tâches reposent principalement sur deux hypothèses : 1) chaque tâche est associée à un stimulus et 2) l'exécution de cette tâche abaisse le niveau de son stimulus, alors que sans exécution ce stimulus augmente [5]. Un agent percevant ainsi un stimulus externe (dans l'environnement) ou interne (relatif à son état physique) déclenche l'exécution de la tâche associée, ce qui diminue l'intensité du stimulus et la nécessité de refaire cette même tâche. Ainsi, le stimulus perçu peut être considéré comme une représentation du travail nécessaire à la tâche.

Cependant, dans certains cas, l'exécution d'une tâche n'affecte pas l'intensité du stimulus perçu associé, ou il y a même une absence totale de lien entre une tâche et un stimulus. Dans ce cas, nous devons trouver d'autres moyens de piloter l'algorithme d'attribution des tâches. Comment un agent décide-t-il de s'engager dans une tâche ? Comment décide-t-il de continuer à exécuter la tâche en cours ou de l'interrompre ?

Dans cet article, nous décrivons un modèle capable d'attribuer à des agents des tâches sans lien direct avec les stimulus. Nous utilisons notamment la motivation intrinsèque de l'agent pour décider de continuer ou d'interrompre une tâche. Nous présentons ensuite une application de ce modèle à une colonie d'abeilles simplifiée. Dans les colonies d'abeilles, plusieurs tâches sont dissociées de tout stimulus, ce qui représente une application intéressante du modèle. Par exemple, les larves d'abeilles n'émettent aucun stimulus pour demander à être nourries, mais un stimulus général qui est plutôt une représentation de la taille du couvain. Les abeilles qui nourrissent les larves (qui endossent un rôle de nourrice) doivent donc s'appuyer sur d'autres

©AfIA 2020

mécanismes pour évaluer la nécessité de la tâche, et décider s'il faut continuer à chercher des larves ou chercher d'autres tâches plus prioritaires.

2 Travaux connexes

La division du travail se produit lorsque les agents doivent décider quelle tâche exécuter dans un environnement partagé. Les sociétés d'individus (ou d'agents) doivent trouver des moyens de répartir efficacement leur main-d'œuvre entre les tâches nécessaires pour survivre et s'étendre. En informatique, le contrôle décentralisé inspiré par les insectes sociaux a été étudié pendant des années et s'est avéré efficace dans de nombreuses applications. Dans cette section, nous allons passer en revue ce qui a été fait dans le domaine des modèles de répartition des tâches.

2.0.1 "Forage for Work" [6]

Dans ce modèle, les différentes tâches que les agents doivent accomplir sont dispersées dans des zones. Les agents, en recherche active de travail, tentent d'exécuter la tâche associée à leur zone ou se déplacent de manière aléatoire. Ainsi, les zones surpeuplées "poussent" les agents vers les zones voisines offrant du travail, ce qui entraîne une division du travail. Lorsque de nouveaux agents apparaissent dans une zone spécifique et que les agents les plus âgés meurent à un certain âge, ce modèle assez simple recréé le polyéthisme d'âges : les agents du même âge effectuent globalement les mêmes tâches. Les agents nouveaunés prennent les offres de travail dans leur zone, repoussant ainsi les agents plus âgés. En suivant des règles simples, un agent peut se rediriger dans d'autres zones s'il ne trouve pas de travail à faire dans sa zone actuelle. Pour que ce modèle fonctionne, les agents doivent avoir la capacité d'évaluer la nécessité de réaliser chaque tâche. Ce pré-requis, ajoutée à l'hypothèse que les tâches sont dispersées dans des zones, font que ce modèle n'est pas adapté à la problématique, et doit être affiné. Il s'agit toutefois d'un bon point de départ.

2.0.2 FTM : "Fixed Threshold Model" [5]

Le FTM est basé sur des associations entre tâches et stimulus. Chaque tâche a un score, représentant sa priorité. Un agent s'engage puis exécute la tâche ayant la priorité la plus élevée. Le score de chaque tâche est calculé à partir de l'intensité du stimulus associé perçu par l'agent, généralement à l'aide d'une fonction sigmoïde. Soit T la tâche évaluée par l'agent, $F(T)$ le score de la tâche T, x_T le stimulus associé perçu par l'agent, n un entier pour la non-linéarité de la fonction (généralement $n = 2$ [7]) et Θ_T une constante, voici comment le score est calculé :

$$F(T) = \frac{(x_T)^n}{(x_T)^n + (\Theta_T)^n} \quad (1)$$

Θ est le *biais* de la fonction, et est utilisée pour l'ajuster tel que lorsque $x_T = \Theta_T$ alors $F(T) = 0.5$. Le biais Θ est utilisé pour modifier la perception des agents : avec un biais très faible, les agents sont très sensibles au stimulus associé et s'engagent dans la tâche plus tôt que les agents avec un biais plus élevé [8].

Chaque tâche a également une probabilité d'*interruption* évaluée à chaque pas de temps. Un agent peut avoir, par exemple, 0.5% de chances d'interrompre sa tâche en cours [9]. Lorsque c'est le cas, l'agent recherche une nouvelle tâche en utilisant les scores de chaque tâche et choisit la plus élevée. L'interruption est ici complètement aléatoire et ne reflète pas l'environnement ni les capacités des agents et nous pensons que de meilleures performances peuvent être atteintes avec un mécanisme d'interruption plus élégant.

2.0.3 RTM : "Response Threshold Model", Renforcement du biais

Sur la base du FTM et de l'équation 1, différents travaux des années 90 [10], [11] ont proposé de mettre en place des mécanismes de renforcement de la valeur Θ, en modifiant la sensibilité des agents pendant l'exécution, formant ainsi efficacement des spécialistes. Cette mise à niveau du FTM est plus généralement appelée "Response Threshold Model" (RTM).

Largement utilisé pour modéliser et piloter des simulations d'insectes sociaux, le RTM repose fortement sur l'association entre tâches et stimulus. Il suppose également que l'exécution de la tâche diminue le stimulus qui lui est associé, et que ne pas exécuter une tâche augmente son stimulus associé. Dans le cas contraire, les agents exécuteraient constamment cette tâche, ou du moins même jusqu'à ce qu'elle ne soit plus prioritaire. Le stimulus doit être une représentation de la priorité de la tâche qui lui est associée. Dans cet article, nous nous intéressons aux situations dans lesquelles ces hypothèses ne sont pas vraies. Nous décrivons dans la section suivante notre modèle basé sur le RTM et un mécanisme supplémentaire pour gérer ces situations.

3 Proposition : un Modèle d'Interruption pour la Répartition des Tâches

Nous proposons dans cette section un modèle basé sur les modèles à seuil RTM dans lequel les tâches, les activités et les actions sont définies au travers d'un architecture de subsomption hiérarchique. Notre modèle repose sur deux mécanismes :

1) le score de chaque tâche qui n'est pas associée à un stimulus se base sur l'état physique de l'agent (les outils qu'il possède, sa physiologie, ses caractéristiques physiques, etc.)

2) un mécanisme d'interruption, consistant en une évaluation systématique de toutes les tâches après chaque action, et en prenant en compte la *motivation interne* de l'agent dans l'évaluation de sa tâche courante.

3.1 Tâches, Subsomption et RTM

Brooks [12] a initialement introduit les architectures de subsomption comme un moyen de contrôler des robots, et celles-ci ont maintenant beaucoup d'applications, notamment dans les systèmes multi-agents. Cette architecture est organisée en couches superposées de comportement, chacune avec des conditions d'activation. Chaque comporte-

ment activé inhibe les comportements placés en-dessous. Les couches supérieures sont prioritaires et peuvent être vues comme des comportement prioritaires. Une architecture de subsomption hiérarchique permet d'avoir des couches de comportement qui sont elles-mêmes des architectures de subsomption, avec ses propres couches et conditions d'activation. Cela permet d'améliorer l'adaptabilité et la modularité des architectures classiques, et d'adapter les comportements à une complexité croissante [13].

Comme Heckel et al. l'ont montré, l'architecture de subsomption hiérarchique convient bien aux concepts de tâche, d'activité, d'action et de rôle, comme illustré sur la Figure 1. Nous donnons la définition de ces concepts (basée notamment sur [14], [15]) ici :

- une *action* est une partie ininterruptible d'un comportement qui dure un temps défini (court). Une action est dite coopérative si elle requiert un autre agent, exécutant lui-même une action donnée, pour se terminer. Nous définissons donc les actions coopératives comme des couples d'actions. Chaque action a une condition booléenne, qui lorsqu'elle est valide permet à l'agent d'exécuter l'action.
- une *activité* est un ensemble d'actions et/ou d'activités, structurée de façon hiérarchique. Les activités ont aussi une condition booléenne. Elles peuvent être vues comme les noeuds d'un arbre, les actions étant les feuilles.
- une *tâche* est un ensemble d'activités et d'actions, constituant un comportement particulier que les agents vont suivre. Chaque tâche du modèle est une implémentation du RTM, avec un seuil associé et une fonction (souvent une sigmoïde) pour calculer le score. Ce score est utilisé par l'agent pour trouver la tâche la plus prioritaire.
- un *rôle* est un ensemble *arbitraire* de tâches, d'activités ou d'actions. Ils ne suivent pas forcément la définition des tâches, mais permettent à un observateur (qui les définit, en général) de simplifier les comportements complexes qu'il observe.

3.2 Mécanisme d'Interruption et Motivation Intrinsèque

La première partie du mécanisme d'interruption consiste à utiliser la motivation intrinsèque pour aider l'agent à évaluer l'utilité de sa tâche actuelle, et à décider s'il doit la poursuivre ou en choisir une autre.

Pour les psychologues, la motivation est la source de l'action et un guide pour son exécution. Il existe deux types de motivation : extrinsèque, lorsqu'une récompense est offerte par l'environnement et intrinsèque qui n'a à voir qu'avec les besoins ou les attentes personnelles [16], comme le plaisir ou la curiosité. La motivation intrinsèque est utilisée dans l'intelligence artificielle et spécifiquement pour les systèmes d'apprentissage [17], *e.g.* pour aider ou guider les agents apprenants **baldassarre_intrinsÃĺquement_2013**. La motivation intrinsèque peut être divisée en de nombreux stimulus internes différents, tels que la faim ou la peur, qui

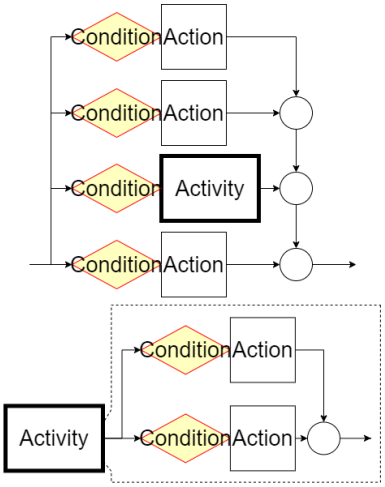


FIGURE 1 – Au-dessus, l'architecture de subsomption hiérarchique représente une tâche consistant en trois actions et une activité. En-dessous, on peut voir que cette activité est constituée de deux actions. Dans le reste de l'article, la partie la plus à droite de l'architecture ne sera plus représentée pour des raisons de simplicité.

déclenchent des comportements [18], proches de ce qui est décrit en Ethology **carbonell_multi-agent_1994**. Lorsque les stimulus internes sont classés comme des besoins, la motivation intrinsèque peut permettre une prise de décision à plus haut niveau. Selon la théorie du Flow [19], un agent en difficulté dans sa tâche ressent de l'anxiété et cherchera alors une tâche moins difficile. De la même manière, un agent qui accomplit une tâche facile s'ennuie et passera à des tâches plus difficiles [20]. L'idée de compétence apportée par Roohi et al. [21] est, pour un agent, le sentiment d'être en contrôle et capable d'accomplir sa tâche actuelle. Ainsi, un agent ayant un niveau de compétence trop faible cherche une tâche plus facile.

Dans notre modèle, les agents ne reçoivent aucune récompense de l'environnement, c'est pourquoi nous nous concentrons sur la motivation intrinsèque. Les tâches dans notre modèle peuvent être *motivées* ou non : les tâches sans stimuli représentatifs sont appelées motivées, car un agent doit utiliser sa motivation intrinsèque. En gardant l'idée de Flow à l'esprit, nos agents peuvent sentir si leur tâche motivée actuelle est utile pour l'ensemble du système. Cela peut être considéré comme une sorte de "Désir" dans le modèle Croyance-Désir-Intention **rao_bdi_1995**. Chaque fois qu'il commence une nouvelle tâche motivée, un agent fixe sa motivation à 1, comme étant pleinement motivé. Ensuite, l'agent exécute une action de cette tâche, qui peut être une **action démotivante**. Lors de l'exécution, une action démotivante diminue la motivation de l'agent. Chaque fois que l'agent a terminé une action, il calcule le score de toutes les tâches qu'il peut exécuter et remplace le score de sa tâche actuelle par sa motivation actuelle et choisit la tâche ayant le score le plus élevé, comme décrit ci-dessous. La baisse de la motivation de l'agent le rend plus réceptif à

©AfIA 2020

d'autres tâches.

3.3 Agents et Évaluation des Tâches

Chaque agent est défini par son état interne, ses comportements et ses capacités d'action, à partir desquels il peut accomplir un ensemble de tâches, associées à des seuils. La figure 2 montre la prise de décision d'un agent à chaque cycle, avec une évaluation systématique de toutes les tâches disponibles. L'agent évalue d'abord si son action en cours est réalisée ou non. Si c'est le cas, l'agent sélectionne ensuite la tâche ayant la plus haute priorité, en calculant les scores de toutes les tâches réalisables à partir du modèle RTM, et en utilisant sa motivation actuelle comme score de la tâche en cours. L'agent interroge ensuite la subsomption de la tâche sélectionnée et récupère l'action suivante à exécuter, ainsi que sa durée et l'exécute. Une fois l'action exécutée, l'ensemble du processus est répété. La réévaluation de toutes les tâches réalisables à la fin de chaque action est la clé de l'adaptabilité des agents. Les seuils des tâches évoluent dans le temps et sont représentatifs des capacités de l'agent, tandis que la subsomption prend en charge l'approche logique du comportement. Ainsi, tant que les scores des autres tâches ne dépassent pas la motivation de l'agent, ce-dernier exécutera la même tâche et progressera dans sa subsomption.

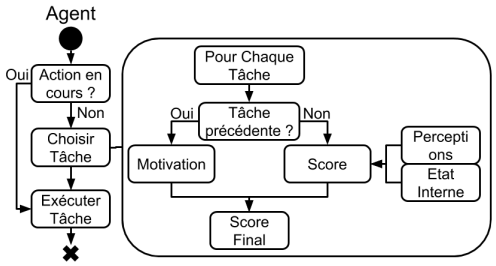


FIGURE 2 – Prise de décision de l'agent à chaque cycle.

3.4 Exemple d'application : Robotique en Essaim

Nous présentons ici un exemple d'application théorique portant sur la robotique en essaim, dans le but d'illustrer les mécanismes de notre modèle. Prenons de nombreux robots qui peuvent effectuer deux tâches différentes : la recherche d'énergie (collecte de minéraux dispersés autour de la base) et la patrouille autour de la base. Ils ont également ce que nous appelons des tâches d'entretien, comme le retour à la base pour faire le plein de carburant. L'architecture de subsomption de la tâche de recherche d'énergie est composée d'une action consistant en un mouvement aléatoire, dont la condition de déclenchement est "aucun minéral n'est en vue". C'est une action démotivante : chaque fois qu'un robot exécute cette action, il diminue sa motivation intrinsèque et le rend plus susceptible de choisir une autre tâche. En patrouille, l'action démotivante consiste à éviter un autre robot sur le chemin de la patrouille. De cette façon, les robots patrouilleurs s'autorégulent.

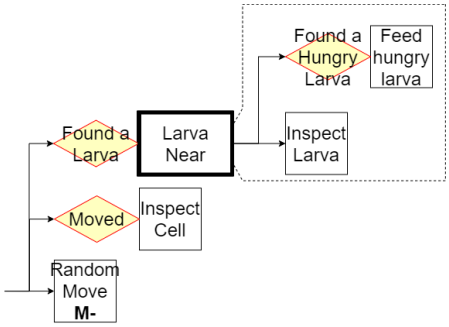


FIGURE 3 – Architecture de subsomption hiérarchique décrivant la tâche "nourrirLarve". L'action démotivante est représentée par le symbole "M-".

Dans cet exemple, on pourrait imaginer que les robots utilisent des outils qu'ils peuvent prendre et déposer. Ces outils modifient ce qu'ils peuvent faire : ainsi, le fait de prendre un outil modifie le biais Θ pour toutes les tâches, reflétant l'état interne du robot. Par exemple, un robot qui ramasse une pioche voit son biais pour la tâche de recherche de ressource diminuer, ce qui maximise les probabilités que le robot exécute cette tâche. Une fois engagé dans la tâche de recherche de ressource, le fait de ne pas voir de champs de minéraux disponibles à récolter (non visibles ou déjà occupés par d'autres robots) diminue la motivation du robot. Avec une motivation suffisamment faible, le robot choisit une autre tâche qui peut l'obliger à changer d'outil.

4 Application : Simulation d'une colonie d'abeilles

Nous avons mis en place une version simplifiée d'une colonie d'abeilles domestiques en utilisant notre modèle. Les abeilles comptent sur de nombreux stimulus qui ne sont pas une représentation de la priorité d'une tâche. Par exemple, dans la tâche d'alimentation des larves, les larves émettent des phéromones, qu'elles aient faim ou non [1]. D'autres tâches (comme la recherche de nourriture) ne sont liées à aucun stimulus externe. L'âge physiologique d'une abeille détermine la tâche clé qu'elle peut exécuter, car elle a besoin de certaines caractéristiques biologiques (glandes - c'est l'équivalent de l'"état interne" de la Fig 2 dans notre modèle).

En outre, l'âge physiologique est considéré comme un élément clé de l'auto-organisation des abeilles dans la ruche, car il peut être influencé par les échanges hormonaux et phéromonaux, comme décrit ci-dessous. L'objectif de cette

1. Les larves émettent continuellement une phéromone volatile appelée *'E-β-ocimène"*, mais des travaux récents ont montré que les larves affamées en émettent davantage et attirent ainsi plus de nourrices [22]. Pourtant, on ne sait toujours pas si ce stimulus augmente l'alimentation des larves.

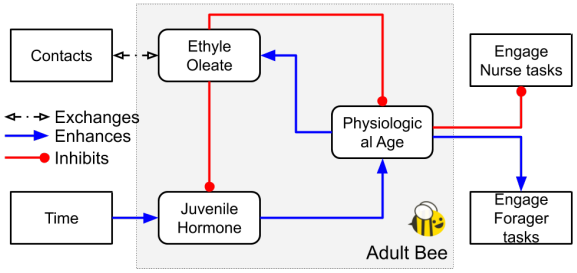


FIGURE 4 – La dynamique physiologique simplifiée de nos agents abeilles adultes. Nous pouvons voir les variables internes de l'abeille au milieu et les facteurs externes à gauche. Sur la droite, nous pouvons voir comment l'âge physiologique affecte la sélection des tâches.

application est donc double : premièrement, tester le rôle de l'âge physiologique dans la division du travail avec notre modèle et deuxièmement, évaluer l'effet du mécanisme d'interruption. Nous avons décidé de modéliser deux tâches clés au moyen de *tâches motivées* : l'alimentation des larves et la recherche de nourriture.

4.1 Tâches et Agents

Il existe deux types d'agents, les abeilles adultes et les larves. Les larves sont assez simples, elles acceptent la nourriture lorsqu'elles ont suffisamment faim, meurent lorsqu'elles ont trop faim et émettent une phéromone de contact appelée *Ethyle Oleate (EO)* à chaque pas de temps. Les abeilles adultes, en revanche, sont les agents qui doivent s'organiser et se répartir les deux tâches motivées suivantes : nourrir les larves et butiner à l'extérieur. Les abeilles adultes ont également quelques tâches d'entretien à effectuer, telles que se reposer ou demander/donner de la nourriture (voir tableau 1). Chacune de ces tâches a été décrite avec une architecture de subsomption hiérarchique (voir la figure 3 pour la description de la tâche "nourrir les larves").

4.2 Age Physiologique et Répartition du Travail

Dans notre modèle, les scores des tâches motivées sont calculés à partir de l'état physique actuel de l'agent (voir section 3.3). C'est particulièrement adapté à la modélisation des abeilles : l'âge physiologique d'une abeille détermine la tâche motivée qu'elle peut exécuter. Nous insistons sur la notion d'âge **physiologique**, car les abeilles peuvent *baisser* leur âge au cours de leur vie, ou *accélérer* leur vieillissement. Les abeilles plus âgées ont tendance à s'engager davantage dans des tâches de recherche de nourriture, et les jeunes abeilles sont plus susceptibles de nourrir les larves. L'âge physiologique d'une abeille est donné par la quantité d' *hormone juvénile (HJ)* dans son système, qui augmente naturellement avec le temps. L'hormone juvénile guide le développement physiologique des abeilles : une jeune abeille ayant une faible quantité d'hormone juvénile possède les glandes nécessaires pour nourrir les larves, et une abeille plus âgée a la capacité de voler pour aller chercher de la nourriture ainsi que les glandes pour traiter le pollen et le nectar. Les abeilles adultes ont naturellement tendance à aller chercher leur nourriture à l'extérieur, poussées par leur augmentation interne de *HJ*, mais elles sont maintenues à l'intérieur par le couvain, la reine et les abeilles déjà butineuses émettant l' *EO* (échangé par contact) [23]. Nous avons résumé ces interactions Figure 4. Cette lutte constante de l'âge physiologique permet d'équilibrer la main-d'œuvre entre ces deux grandes tâches. Si les abeilles butineuses meurent à l'extérieur, les jeunes abeilles de l'intérieur percevront moins d'*EO* et certaines d'entre elles recommenceront à vieillir, ce qui rétablira l'équilibre. En réalité, une ouvrière peut aller butiner dès l'âge de 5 jours mais commence généralement ses activités extérieures vers 20. La perte de larves est rare : les ouvrières régulent la façon dont la reine pond des œufs en adaptant la façon dont elles la nourrissent. Lorsqu'elles perçoivent un faible apport de ressources, elles peuvent réduire la ponte de la reine. Comme nous n'avons pas modélisé la reine, la perte de larves se produira et reflètera l'efficacité de la colonie à répartir sa main-d'œuvre. De plus, le fait que les travailleurs doivent diminuer leur âge physiologique est également un événement rare. Nous ciblons spécifiquement ces cas intéressants, où la colonie est privée d'abeilles adultes plus jeunes.

4.3 Environnement et Simulateur

L'environnement est une grille hexagonale 2D de taille 30x30. Chaque cellule a un contenu (une larve, de la nourriture, etc.) et peut être occupée par une abeille adulte. Les stimulus sont gérés au niveau de la cellule, où chaque cellule contient une quantité de chaque stimulus. Les stimulus sont modélisés selon deux paramètres majeurs : la propagation (leur comportement dans l'espace) et la dissipation/évaporation (leur comportement dans le temps). Lorsqu'il émet un stimulus, un agent augmente la quantité de ce stimulus donné sur sa cellule. Ensuite, à chaque pas de temps et pour chaque stimulus, chaque cellule calcule sa nouvelle valeur en utilisant les valeurs de ses voisins et la sienne. Les paramètres que nous avons utilisés pour toutes nos simulations sont inspirés de la biologie mais calibrés pour accélérer les simulations. Les effets hormonaux et phéromonaux peuvent mettre des jours à se produire, tandis que les abeilles interagissent et errent dans la ruche en quelques secondes. Nous avons décidé d'accélérer certains effets pour obtenir des résultats dans un temps de simulation raisonnable (accélération de x4000 à x6000). Par exemple, les larves sont nourries environ toutes les 2 heures [24], mais nous avons accéléré ce temps à 2 secondes. Cette accélération introduit un biais, car les changements à long terme se situent maintenant dans la même échelle de temps que les changements rapides, mais ne changeront pas l'aspect essentiel de ce que nous démontrons.

4.4 Expérimentations et Résultats Attendus

Nous avons fait plusieurs expériences pour évaluer comment ce modèle peut s'adapter aux changements tout en

©AfIA 2020

TABLE 1 – Les tâches de l'application. Certains scores de tâches sont calculés à l'aide de la sigmoïde du RTM, mais d'autres déjà mappées dans [0;1] n'ont pas besoin d'utiliser de sigmoïde. Une tâche non motivée se comporte exactement comme dans un RTM classique.

Nom de Tâche	Stimulus d'entrée	Score
Tâches d'entretien		
RestTask	Energy	1-Energy
AskFoodTask	Hunger	Hunger
GiveFoodTask	AskFoodStimulus	Sigmoid(Eq 1) avec le biais à 0.5
RandomMoveTask	-	0.2
Tâches motivées		
ForagerTask	-	Sigmoid (Eq 1) biais : 1-HJ mappé dans [0.3;1]
FeedLarva	-	Sigmoid (Eq 1) biais : HJ mappé dans [0.3;1]

TABLE 2 – Analyse statistique ANOVA (N=50). Une ligne pour chaque scénario. Les deux premières colonnes représentent l'impact sur les scores de la simulation de l'activation des effets physiologiques, avec notre mécanisme d'interruption contourné (scores PhysiologyOn/InterruptionOff - scores PhysiologyOff/InterruptionOff). Les deux dernières colonnes représentent l'impact de l'activation de notre mécanisme d'interruption tout en laissant l'effet biologique activé. Chaque impact est mesuré par le score des nourrices (combien de larves ont survécu) et le score des butineuses (combien de temps a été consacré à la recherche de nourriture).

	Ajouter la physiologie sans l'interruption		**Ajouter l'interruption avec la physiologie**	
	Score des Nourrices	**Score des Butineuses**	**Score des Nourrices**	**Score des Butineuses**
S1	+3% ($p < 0.001$)	-30% ($p < 0.001$)	*Non significatif*	-11% ($p < 0.001$)
S2	*Non significatif*	0 à 150k ($p < 0.001$)	*Non significatif*	-8% ($p < 0.001$)
S3	0% à 68% ($p < 0.001$)	*Non significatif*	+37% ($p < 0.001$)	*Non significatif*
S4	-32% ($p < 0.001$)	-29% ($p < 0.001$)	+45% ($p < 0.001$)	+35% ($p < 0.001$)
S5	+10% ($p < 0.001$)	-77% ($p < 0.001$)	*Non significatif*	-14% ($p = 0.007$)

assurant la répartition des tâches. De nombreuses expériences réalisées dans la littérature consistent à modifier la répartition initiale des tâches ou de l'environnement [9], [25]. Notre premier objectif est de nous assurer que l'équilibre final n'est pas influencé par les conditions initiales. De plus, l'équilibre doit être modifié par le ratio abeille adulte / larve. En mettant plus de larves par ouvrière, nous devrions nous attendre à avoir plus d'ouvrières consacrées à l'alimentation des larves et vice versa. Ensuite, nous évaluerons comment le mécanisme d'interruption modifie le système. Nous avons donc deux hypothèses :

- **H1 :** Notre modèle avec la physiologie de l'abeille et les phéromones permet de réaliser la répartition des tâches.
- **H2 :** Notre mécanisme d'interruption améliore les performances du système, ce qui améliore la répartition des tâches. Ici, un meilleur rendement signifie maximiser le temps passé à chercher de la nourriture ET le taux de survie des larves.

Nous avons créé 5 scénarios que nous utiliserons pour évaluer ces hypothèses. Chaque scénario est ensuite simulé avec différentes conditions, en contournant les effets phéromonaux pour évaluer **H1** ou/et en contournant notre mécanisme d'interruption pour évaluer **H2**. Le contournement des effets phéromonaux gèle l'âge physiologique des agents, et le contournement d'une partie du mécanisme d'interruption se fait en considérant toutes les tâches comme non motivées :

- **Scénario 1 :** Répartition initiale aléatoire des âges avec 150 abeilles adultes et 150 larves.
- **Scénario 2 :** 150 adultes et 150 larves mais toutes les abeilles adultes commencent comme nouveau-nées.
- **Scénario 3 :** 150 adultes et 150 larves, mais toutes les abeilles adultes commencent comme âgées.
- **Scénario 4 :** Répartition initiale aléatoire des âges avec 150 adultes et 50 larves.
- **Scénario 5 :** Répartition initiale aléatoire des âge avec 150 adultes et 300 larves.

4.5 Résultats et Analyse Statistique

Avec notre modèle complet, S1, S2 et S3 se sont terminés avec environ 60% des larves de la colonie qui se nourrissaient et environ 20% qui cherchaient de la nourriture. S4 et S5, par rapport à S1, ont changé l'équilibre. Comme nous l'avons vu précédemment, l'équilibre pour un ratio abeille adulte par larve de 1/1 (150 abeilles adultes pour 150 larves, S1) nous a donné un équilibre à environ 60% de larves en train de se nourrir. Un ratio de 1/2 (S5) l'élève à près de 90%. Un rapport de 3/1 (S4) le fait baisser à 20%. La figure 5 montre côte à côte deux graphiques comparant les différents ratios d'abeilles nourrissants les larves parmi les scénarios. Nous pouvons voir sur le graphique le plus à gauche que S1, S2 et S3 convergent vers le même équilibre, et que S4 et S5 ont respectivement un équilibre infé-

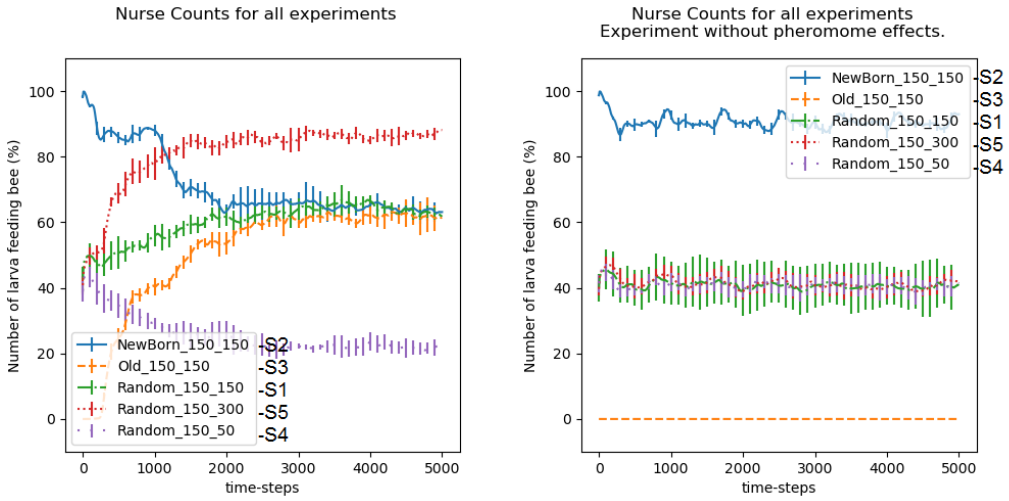


FIGURE 5 – Voici les différents ratios de d'abeilles nourrices de toutes les expériences (scénarios) dont nous avons parlé, avec et sans le contournement de la physiologie.

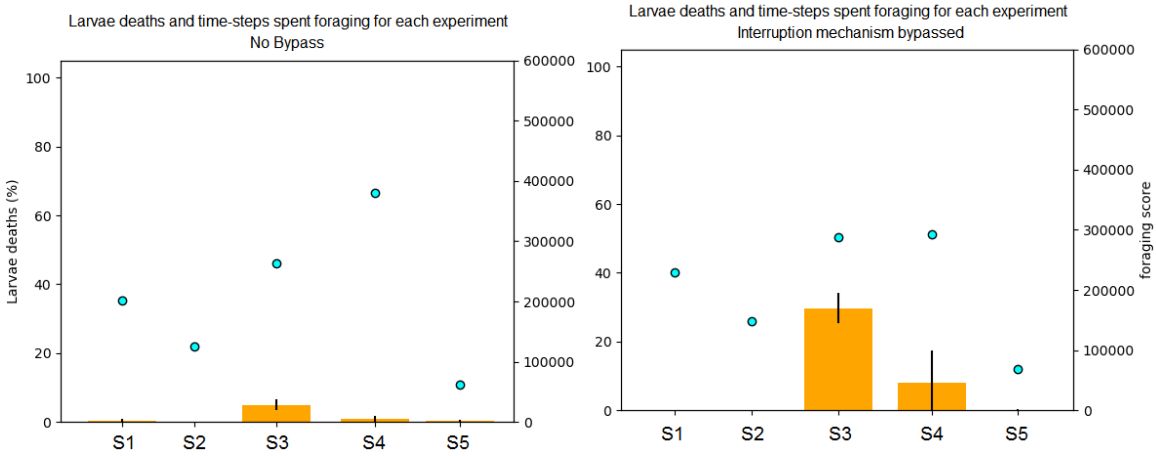


FIGURE 6 – Ces graphiques montrent la moyenne des décès de larves et le temps passé à butiner pour chaque expérience répétée 5 fois. Les graphiques de gauche et de droite représentent les expériences respectivement avec et sans mécanisme d'interruption.

rieur et supérieur aux trois premiers. Dans le graphique de droite, où la physiologie de l'abeille a été court-circuitée, nous voyons que le système ne s'adapte pas aux scénarios. Une analyse ANOVA (Physiologie x Interruption, N=50) a montré que dans certains scénarios, notre mécanisme d'interruption fait que le système obtient des scores plus faibles, alors que dans d'autres, c'est le contraire : Le tableau 2 donne un aperçu de ces changements statistiquement significatifs, et le lecteur trouvera sur la figure 6 une comparaison graphique du contournement de l'interruption. D'une part, S1, S2 et S5 sont légèrement affectés négativement par le mécanisme d'interruption (recherche de nourriture 10% moins efficace) alors que les soins aux larves sont aussi efficaces. D'autre part, dans S3 et S4, le mécanisme d'interruption a amélioré les scores de manière significative (entre 35 et 45%).

4.6 Discussions

Nous avons démontré que **H1** est vrai en changeant la condition de départ et le ratio abeille par larve. Cependant, l'analyse statistique que nous avons fournie ne nous permet d'affirmer que **H2** est vrai que pour S3 et S4, où la plus grande adaptabilité est requise. La vitesse à laquelle une tâche démotivante entraîne un changement de tâche est un paramètre clé. Des travaux supplémentaires doivent être effectués pour le calibrer, mais les résultats préliminaires montrent qu'un changement de tâche plus rapide (jusqu'à un certain point) entraîne de meilleurs scores globaux, au détriment de la stabilité individuelle. Nous tenons également à souligner que la réévaluation systématique de toutes les tâches après l'achèvement de chaque action ne pouvait pas être contournée.

©AfIA 2020

5 Conclusion et Perspectives

Nous avons proposé ici un modèle basé sur le modèle RTM, l'état interne des agents et la motivation intrinsèque pour effectuer la répartition des tâches dans un environnement où toutes les tâches ne sont pas associées à des stimulus représentant leur priorité. Modéliser les tâches avec une architecture de subsomption hiérarchiques et les discriminer en utilisant une approche RTM nous permet de piloter le comportement de nos agents. Les tâches contiennent des actions démotivantes qui représentent des comportements frustrants, comme la recherche de quelque chose. L'exécution d'une action démotivante diminue la motivation de l'agent à poursuivre sa tâche actuelle, le rendant plus sensible à d'autres tâches. Lors du choix d'une nouvelle tâche, si la tâche actuelle de l'agent est motivée, son score RTM est remplacé par la motivation actuelle de l'agent. Chaque fois qu'un agent change sa tâche actuelle pour une tâche motivée, sa motivation est ramenée à 1, comme étant pleinement motivé. Nous avons montré expérimentalement que notre modèle peut atteindre l'équilibre, répondre à des conditions changeantes et les travaux préliminaires montrent qu'il améliore l'efficacité du système. Notre mise en œuvre de ce modèle pour une colonie d'abeilles simplifiée montre des capacités de répartition du travail. L'équilibre est atteint et ne dépend pas des conditions initiales, mais dépend du ratio abeille par larve. Nous avons l'intention d'améliorer la mise en œuvre actuelle en ajoutant de la complexité vers une mise en œuvre aussi proche que ce que nous comprenons actuellement sur le fonctionnement des colonies d'abeilles, en testant davantage le modèle et ses capacités. Nous comparerons ensuite le comportement de cette mise en œuvre avec les observations réelles de colonies d'abeilles. En parallèle, nous mettons également en œuvre l'exemple d'essaim de robot discuté dans la section 3.4 pour évaluer la modalité de notre proposition.

Les codes sources de l'implémentation (java) et des scripts (python) utilisés pour l'analyse des résultats (with JASP) sont sur GitHub : https ://github.com/Kwarthys/BeeKeeper.

Références

[1] S. N. BESHERS et J. H. FEWELL, "Models of division of labor in social insects.", p. 413-440, 2001.

[2] T. SCHMICKL et I. KARSAI, "Integral feedback control is at the core of task allocation and resilience of insect societies", 2018.

[3] R. E. MORLEY et C. SCHELBERG, "An analysis of a plant-specific dynamic scheduler", 1993.

[4] P. ZAHADAT et T. SCHMICKL, "Division of labor in a swarm of autonomous underwater robots by improved partitioning social inhibition", 2016.

[5] E. BONABEAU, M. DORIGO et G. THERAULAZ, *From Natural to Artificial Swarm Intelligence*. 1999.

[6] N. R. FRANKS et C. TOFTS, "Foraging for work : how tasks allocate workers", p. 470-472, 1994.

[7] T. SCHMICKL et K. CRAILSHEIM, "TaskSelSim : a model of the self-organization of the division of labour in honeybees", t. 14, n° 2, p. 101-125, 2008.

[8] A. DORNHAUS, F. KLÜGL, F. PUPPE et J. TAUTZ, "Task Selection in Honeybees - Experiments Using Multi-Agent Simulation", p. 13,

[9] T. SCHMICKL et K. CRAILSHEIM, "Analysing honeybees' division of labour in broodcare by a multi-agent model", 2008.

[10] G. THERAULAZ, E. BONABEAU et J.-L. DENEUBOURG, "Response threshold reinforcements and division of labour in insect societies", 1998.

[11] A. DROGOUL et J. FERBER, "Multi-agent simulation as a tool for modeling societies : Application to social differentiation in ant colonies", in, 1994.

[12] R. BROOKS, "A robust layered control system for a mobile robot", p. 14-23, 1986.

[13] F. W. P. HECKEL, G. M. YOUNGBLOOD et N. S. KETKAR, "Representational complexity of reactive agents", 2010, p. 257-264.

[14] A. CAMPBELL et A. S. WU, "Multi-agent role allocation : issues, approaches, and multiple perspectives", 2011.

[15] C. ANDERSON et N. R. FRANKS, "Teamwork in Animals, Robots, and Humans", 2003.

[16] R. M. RYAN et E. L. DECI, "Intrinsic and Extrinsic Motivations : Classic Definitions and New Directions", p. 54-67, 2000.

[17] J. SCHMIDHUBER, "Formal Theory of Creativity, Fun, and Intrinsic Motivation (1990–2010)", p. 230-247, 2010.

[18] P. MAES, "The agent network architecture (ANA)", 1991.

[19] M. CSIKSZENTMIHALYI, *Finding flow : The psychology of engagement with everyday life.* 1997.

[20] M. CORNUDELLA, P. VAN EECKE et R. van TRIJP, "How Intrinsic Motivation can Speed Up Language Emergence", 2015, p. 571-578.

[21] S. ROOHI, J. TAKATALO, C. GUCKELSBERGER et P. HÄMÄLÄINEN, "Review of Intrinsic Motivation in Simulation-based Game Testing", 2018, p. 1-13.

[22] X. J. HE et AL., "Starving honey bee (Apis mellifera) larvae signal pheromonally to worker bees", 2016.

[23] Y. LE CONTE, A. MOHAMMEDI et G. E. ROBINSON, "Primer effects of a brood pheromone on honeybee behavioural development", 2001.

[24] M. L. WINSTON, *The biology of the honey bee*. 1991.

[25] T. D. SEELEY, *The wisdom of the hive : the social physiology of honey bee colonies*. 1995.

Ontologies Légères Inconsistantes Partiellement Pré-ordonnées en Théorie des Possibilités *

Sihem Belabbes, Salem Benferhat

CRIL, Univ. Artois & CNRS, France

{belabbes, benferhat}@cril.fr

Résumé

Nous proposons une extension de la logique DL-Lite possibiliste standard au cas où la base de connaissances est partiellement pré-ordonnée. Nous considérons que la base assertionnelle ABox est représentée par une base pondérée symbolique et nous supposons qu'un ordre partiel strict est appliqué aux poids. Nous introduisons une méthode traitable pour calculer une réparation unique pour une ABox pondérée partiellement pré-ordonnée. L'idée de base consiste à calculer cette réparation à partir des réparations possibilistes associées aux bases compatibles d'une ABox partiellement pré-ordonnée, qui intuitivement encodent toutes les extensions possibles d'un pré-ordre partiel. Nous proposons une caractérisation équivalente à travers la notion d'assertions π-acceptées, ce qui garantit que le calcul de la réparation possibiliste partielle se fasse en temps polynomial.

Mots-clés

Base de Connaissances Inconsistante, Logique DL-Lite, Théorie des Possibilités.

Abstract

This paper investigates an extension of standard possibilistic DL-Lite to the case where the knowledge base is partially preordered. We consider the assertional base ABox to be represented as a symbolic weighted base and we assume a strict partial order is applied to the weights. We introduce a tractable method for computing a single repair for a partially preordered weighted ABox. Basically, this repair is computed from possibilistic repairs associated with compatible bases of a partially preordered ABox, which intuitively encode all possible extensions of a partial order. We provide an equivalent characterization using the notion of π-accepted assertions, which ensures that the partial possibilistic repair is computed in polynomial time.

Keywords

Inconsistent Knowledge Base, DL-Lite, Possibility Theory.

*Cet article a été présenté à la conférence *International Symposium on Artificial Intelligence and Mathematics* (ISAIM 2020), Fort Lauderdale, USA, 6–8 janvier 2020.

1 Introduction

La théorie des possibilités a été largement étudiée depuis le travail précurseur de Zadeh [32]. Il s'agit d'une théorie de l'incertitude qui permet de gérer des informations incomplètes, incertaines, qualitatives et munies de priorités, ainsi que de raisonner en présence d'inconsistance [17, 19]. La théorie des possibilités a des liens forts avec les fonctions ordinales conditionnelles [27] ainsi qu'avec les fonctions de croyances consonantes [18, 14, 26].

La logique possibiliste standard [16] fournit un cadre naturel pour raisonner à partir d'informations inconsistantes, incertaines, et munies de priorités ordonnées selon un préordre total. En substance, la logique possibiliste standard est une logique pondérée qui utilise des formules de logique propositionnelle auxquelles sont attachés des poids. Ces derniers appartiennent à l'intervalle unitaire $[0, 1]$, considéré comme une échelle ordinale. Un poids (ou degré) constitue une borne inférieure sur le degré de certitude (ou de priorité) d'une formule.

Un domaine de recherche qui jouit d'un interêt considérable est celui de la gestion de l'inconsistance dans les ontologies formelles, en particulier celles spécifiées dans les fragments légers des logiques des descriptions, à savoir DL-Lite. Par exemple, des extensions floues ont été proposées pour les logiques des descriptions [11, 9, 29] et pour DL-Lite [24, 28]. De plus, des extensions possibilistes des logiques des descriptions [15, 25] ainsi que des extensions probabilistes [1, 10, 23] ont également été proposées.

Récemment, un cadre pour DL-Lite possibiliste a été proposé [6]. L'idée consiste à attacher des poids aux assertions de la ABox pour refléter le fait que certaines informations peuvent être plus fiables que d'autres. Une caractéristique intéressante de DL-Lite possibiliste est que le *query answering* est traitable. Donc, le fait que l'expressivité de DL-Lite standard soit augmentée par un pré-ordre total sur les assertions n'engendre pas de coût supplémentaire.

Cependant, dans de nombreuses applications et notamment les ontologies, la fiabilité est définie de manière partielle seulement. Cela est souvent dû au fait que l'information soit obtenue de sources multiples qui ne partagent pas la même opinion. Cela implique l'application d'un ordre partiel au lieu d'un ordre total sur les poids affectés aux formules ou les assertions. Il convient de mentionner que la

©AfIA 2020

relation d'ordre appliquée aux poids est un ordre partiel strict, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'égalité entre les poids. En revanche, la relation d'ordre qui résulte de l'affectation de ces poids aux assertions est un pré-ordre partiel sur les assertions, puisque le même poids peut être affecté à plus d'une assertion (les égalités de poids entre les assertions sont permises). Dans ce cas, la ABox correspondante est partiellement pré-ordonnée.

Des extensions de la logique possibiliste standard ont été proposées pour permettre de raisonner avec des informations partiellement pré-ordonnées. Dans [7], les notions fondamentales de la logique possibiliste standard comme l'inférence possibiliste ont été revisitées. Il s'agit d'affecter à des formules de logique propositionnelle des degrés appartenant à une échelle d'incertitude partiellement ordonnée, au lieu de l'intervalle unitaire $[0, 1]$. Dans [5, 30], l'idée d'affecter des poids symboliques partiellement ordonnés à des croyances a également été étudiée en détail. L'inconvénient principal de telles approches est que leur complexité computationnelle est coûteuse (Δ_p^2-dure), ce qui les rend inappropriées dans des situations où les réponses aux requêtes doivent être obtenues efficacement.

Etant donné ce contexte, nous nous intéressons à proposer une extension de DL-Lite possibiliste standard [6] au cas où les connaissances sont partiellement pré-ordonnées, sans augmenter sa complexité. L'idée de gestion de l'inconsistance dans des ontologies légères partiellement pré-ordonnées a été récemment investiguée dans [3]. Une méthode efficace, appelée "Elect", a été proposée pour calculer une réparation unique pour une ABox partiellement pré-ordonnée. Elect offre une extension de la sémantique bien connue *Intersection of ABox Repair* (IAR) [22] pour le cas où la ABox est partiellement pré-ordonnée. Il s'agit d'interpréter une ABox partiellement pré-ordonnée comme une famille de ABox totalement pré-ordonnées, et pour lesquelles des réparations peuvent être calculées. Ainsi, l'intersection de ces réparations produit une réparation unique pour la ABox partiellement pré-ordonnée.

Une question naturelle qui se pose concerne le fait de pouvoir ou non étendre le cadre DL-Lite possibiliste à des ordres partiels de manière traitable (dans l'esprit de la méthode Elect). Cet article donne une réponse positive.

Pour cela, nous considérons une famille de ABox compatibles (qui sont des ABox DL-Lite possibilistes) et calculons la réparation possibiliste associée à chaque base compatible. Enfin, nous obtenons une réparation unique pour la ABox pondérée partiellement pré-ordonnée à partir de l'intersection de toutes les réparations possibilistes. Notre contribution principale est la proposition d'une caractérisation équivalente qui identifie les assertions acceptées, appelées π-acceptées, sans calculer explicitement toutes les bases compatibles. Nous montrons que l'ensemble des assertions π-acceptées est consistant et qu'il peut être calculé en temps polynomial. Par ailleurs, nous montrons que lorsque la relation de préférence est un ordre total, la réparation obtenue est en fait la réparation possibiliste calculée en DL-Lite possibiliste standard.

Cet article est structuré comme suit. Nous rappelons brièvement les principes de base de DL-Lite standard dans la Section 2, suivie par son extension à la logique possibiliste dans la Section 3. Nous introduisons notre méthode traitable pour calculer une réparation pour une ABox pondérée partiellement pré-ordonnée dans la Section 4. Nous concluons par une discussion des travaux futurs.

2 La Logique des Descriptions DL-Lite

La logique des descriptions DL-Lite [13] est une famille de langages de représentation des connaissances qui ont gagné en popularité dans de nombreux domaines d'application comme la formalisation d'ontologies légères, grâce à leur pouvoir expressif et leurs bonnes propriétés computationnelles. Par exemple, *query answering* à partir d'une base de connaissances DL-Lite peut s'effectuer de manière efficace en utilisant la reformulation de requêtes [21].

Nous présentons le dialecte DL-Lite$_R$ de DL-Lite. Nous considérons un ensemble fini de *noms de concepts* C, un ensemble fini de *noms de rôles* R et un ensemble fini de *noms d'individus* I, tels que C, R et I sont mutuellement disjoints. Soient $A \in \mathsf{C}$, $P \in \mathsf{R}$ et $P^- \in \mathsf{R}$ *l'inverse* de P. Le langage DL-Lite$_R$ est défini selon les règles suivantes :

$$R \longrightarrow P \mid P^- \qquad E \longrightarrow R \mid \neg R$$
$$B \longrightarrow A \mid \exists R \qquad C \longrightarrow B \mid \neg B$$

où R est un *rôle de base*, E est un *rôle complexe*. De même, B est un *concept de base*, C est un *concept complexe*.

En ce qui concerne la sémantique, une interprétation est un tuplet $\mathcal{I} = \langle \Delta^{\mathcal{I}}, \cdot^{\mathcal{I}} \rangle$, où $\Delta^{\mathcal{I}} \neq \emptyset$ et $\cdot^{\mathcal{I}}$ est une fonction d'interprétation qui associe un nom de concept A à un sous-ensemble $A^{\mathcal{I}}$ de $\Delta^{\mathcal{I}}$, un nom de rôle P à une relation binaire $P^{\mathcal{I}}$ sur $\Delta^{\mathcal{I}}$, et un nom d'individu a à un élément du domaine $\Delta^{\mathcal{I}}$. Nous avons également :

$$(P^-)^{\mathcal{I}} = \{(y, x) \in \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}} \mid (x, y) \in P^{\mathcal{I}}\};$$
$$(\exists R)^{\mathcal{I}} = \{x \in \Delta^{\mathcal{I}} \mid \exists y \in \Delta^{\mathcal{I}} \text{ t.q. } (x, y) \in R^{\mathcal{I}}\};$$
$$(\neg B)^{\mathcal{I}} = \Delta^{\mathcal{I}} \setminus B^{\mathcal{I}};$$
$$(\neg R)^{\mathcal{I}} = \Delta^{\mathcal{I}} \times \Delta^{\mathcal{I}} \setminus R^{\mathcal{I}}.$$

Un *axiome d'inclusion* sur des concepts (resp. des rôles) est un énoncé de la forme $B \sqsubseteq C$ (resp. $R \sqsubseteq E$). Une inclusion de concept est dite *axiome négatif d'inclusion* si elle contient le symbole "¬" à droite de l'inclusion, sinon elle est dite *axiome positif d'inclusion*. Une *assertion* est un énoncé de la forme $A(a)$ ou $P(a, b)$, où $a, b \in \mathsf{I}$.

Une interprétation $\mathcal{I}$ *satisfait* un axiome d'inclusion $B \sqsubseteq C$ (resp. $R \sqsubseteq E$), noté $\mathcal{I} \Vdash B \sqsubseteq C$ (resp. $\mathcal{I} \Vdash R \sqsubseteq E$), si $B^{\mathcal{I}} \subseteq C^{\mathcal{I}}$ (resp. $R^{\mathcal{I}} \subseteq E^{\mathcal{I}}$). $\mathcal{I}$ *satisfait* une assertion $A(a)$ (resp. $P(a, b)$), noté $\mathcal{I} \Vdash A(a)$ (resp. $\mathcal{I} \Vdash P(a, b)$), si $a^{\mathcal{I}} \in A^{\mathcal{I}}$ (resp. $(a^{\mathcal{I}}, b^{\mathcal{I}}) \in P^{\mathcal{I}}$).

Une base de connaissances DL-Lite$_R$ est une paire $\mathcal{K} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A} \rangle$, où $\mathcal{T}$ est un ensemble fini d'axiomes d'inclusion, dit TBox, et $\mathcal{A}$ est un ensemble fini d'assertions, dit ABox. Une interprétation $\mathcal{I}$ est un *modèle* d'une TBox $\mathcal{T}$ (resp. ABox $\mathcal{A}$), noté $\mathcal{I} \Vdash \mathcal{T}$ (resp. $\mathcal{I} \Vdash \mathcal{A}$), si $\mathcal{I} \Vdash \alpha$ pour tout

α dans $\mathcal{T}$ (resp. dans $\mathcal{A}$). L'interprétation $\mathcal{I}$ est un modèle de $\mathcal{K} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A} \rangle$ si $\mathcal{I} \Vdash \mathcal{T}$ et $\mathcal{I} \Vdash \mathcal{A}$.
Une base de connaissances (KB) $\mathcal{K}$ est *consistante* si elle admet au moins un modèle, sinon elle est *inconsistante*.
Une TBox $\mathcal{T}$ est *incohérente* s'il y a un nom de concept $A \in \mathsf{C}$ tel que A est vide dans chaque modèle de $\mathcal{T}$, sinon elle est *cohérente*.
Dans la suite de cet article, nous notons DL-Lite$_R$ simplement par DL-Lite. Pour de plus amples détails sur la famille DL-Lite de logiques des descriptions, nous invitons le lecteur à consulter [13].
Tout au long de cet article, nous utiliserons l'exemple suivant et l'adapterons au besoin.

Exemple 1 *Soit $\mathcal{K} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A} \rangle$ une KB DL-Lite.*
Soit $\mathcal{T} = \{A \sqsubseteq \neg B, B \sqsubseteq \neg C, C \sqsubseteq \neg D\}$ une TBox.
Soit $\mathcal{A} = \{A(a),\ A(b),\ B(a),\ B(c),\ C(a),\ C(b),\ D(a),\ D(b),\ D(c),\ E(a)\}$ une ABox non-ordonnée (sans poids sur les assertions).
Il est aisé de vérifier que $\mathcal{K}$ est inconsistante. Par exemple, l'individu 'a' appartient aux concepts A et B. Ceci contredit l'axiome négatif $A \sqsubseteq \neg B$. □

Plusieurs stratégies ont été proposées pour raisonner avec des KB inconsistantes (e.g. [2, 12, 8, 31]). L'idée principale repose sur le calcul de réparations pour la ABox, où une réparation est définie comme un sous-ensemble de la ABox maximal (pour l'inclusion ensembliste) qui est consistant avec la TBox. Parmi ces stratégies, on trouve la sémantique *ABox Repair* (AR) [22] dans laquelle une réponse à une requête est valide si elle s'ensuit de chaque réparation. On trouve également la sémantique *Intersection of ABox Repair* (IAR) [22] qui interroge une sous-base consistante de la ABox obtenue de l'intersection de toutes les réparations. Par ailleurs, la sémantique dite *non-contestée* [4] revient à une version prioritaire de la sémantique IAR.
Nous nous intéressons aux réparations possibilistes, en particulier dans le cas de bases de connaissances partiellement pré-ordonnées. Nous rappelons d'abord les notions de base de DL-Lite possibiliste standard.

3 Bases de Connaissances DL-Lite Possibilistes

Les logiques des descriptions possibilistes [20, 15] sont des extensions des logiques des descriptions standard basées sur la théorie des possibilités, qui permettent de raisonner avec des connaissances incertaines et inconsistantes. Des extensions DL-Lite possibilistes [6] ont récemment été proposées pour les fragments légers DL-Lite. L'idée principale consiste à affecter des degrés de priorité (ou poids) aux axiomes de la TBox et aux assertions de la ABox pour exprimer leur relative certitude dans une base de connaissances inconsistante. Le degré d'inconsistance d'une base de connaissances peut alors être calculé à partir de ces poids, permettant une inférence possibiliste.
Dans cette section, nous considérons une base de connaissances DL-Lite possibiliste finie, $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$, appelée KB pondérée. Nous supposons que les axiomes de la TBox $\mathcal{T}$ sont complètement certains alors que les assertions de la ABox pondérée $\mathcal{WA}$ sont munies de degrés de priorité définis sur l'intervalle unitaire $]0, 1]$, comme suit :

$$\mathcal{WA} = \{(f, \alpha) \mid f \text{ est une assertion DL-Lite, } \alpha \in]0, 1]\}.$$

Nous supposons qu'un degré de priorité unique α est affecté à chaque assertion f.
Les assertions de $\mathcal{WA}$ avec un degré de priorité $\alpha = 1$ sont considérées complètement certaines et ne sont pas discutables, alors que les assertions avec un degré de priorité $0 < \alpha < 1$ sont dites quelque peu certaines. Les assertions avec les degrés de priorité les plus élevés sont plus certaines que celles avec des degrés de priorité plus bas. Nous ignorons les assertions avec un degré $\alpha = 0$, donc seules les assertions quelque peu certaines sont énoncées explicitement.
Dans la suite de cet article, pour une base assertionnelle pondérée donnée $\mathcal{WB}$, nous notons par $\mathcal{WB}^*$ l'ensemble des assertions obtenues après leur avoir enlevé les degrés de priorité. Nous notons $\mathcal{WK}^*$ la KB dont la ABox est l'ensemble d'assertions $\mathcal{WB}^*$.
Par ailleurs, nous supposons que la TBox $\mathcal{T}$ est cohérente et n'évolue pas. Cependant les assertions de la ABox pondérée $\mathcal{WA}$ peuvent être discutables. Cela veut dire qu'il peut y avoir des conflits entre les assertions par rapport aux axiomes de $\mathcal{T}$. Dans ce cas, la KB pondérée $\mathcal{WK}$ est dite inconsistante.
Un conflit assertionnel est défini comme un sous-ensemble d'assertions minimal (pour l'inclusion ensembliste) qui est inconsistant avec la TBox, où l'inconsistance est comprise dans le sens de DL-Lite standard. Formellement :

Définition 1 *Soit $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$ une KB pondérée.*
Une sous-base $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{WA}$ est un conflit assertionnel dans $\mathcal{WK}$ ssi :

- *$\langle \mathcal{T}, \mathcal{C}^* \rangle$ est inconsistant, et*
- *$\forall f \in \mathcal{C}^*$, $\langle \mathcal{T}, \mathcal{C}^* \setminus \{f\} \rangle$ est consistant.*

Nous notons $\mathcal{C}(\mathcal{WA})$ l'ensemble de tous les conflits assertionnels de $\mathcal{WA}$. Il est important de noter que le calcul de l'ensemble des conflits se fait en temps polynomial en DL-Lite [12]. De plus, nous supposons qu'il n'y a pas d'assertion $f \in \mathcal{WA}^*$ telle que $\langle \mathcal{T}, \{f\} \rangle$ est inconsistant. Donc les conflits assertionnels dans des bases de connaissances DL-Lite cohérentes sont binaires [12], i.e., $\forall \mathcal{C} \in \mathcal{C}(\mathcal{WA}), |\mathcal{C}| = 2$. Nous notons un conflit assertionnel comme une paire $\mathcal{C}_{ij} = \{(f_i, \alpha_i), (f_j, \alpha_j)\}$, où $(f_i, \alpha_i), (f_j, \alpha_j) \in \mathcal{WA}$. Les assertions $f_i, f_j \in \mathcal{WA}^*$ sont alors dites conflictuelles par rapport à $\mathcal{T}$.

Exemple 2 *Continuons l'Exemple 1 et munissons la ABox de poids. Soit $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$ la KB pondérée correspondante, avec $\mathcal{T} = \{A \sqsubseteq \neg B, B \sqsubseteq \neg C, C \sqsubseteq \neg D\}$, et la ABox pondérée est :*

$$\mathcal{WA} = \left\{ \begin{array}{l} (A(a), 0{,}9), (A(b), 0{,}9), (B(c), 0{,}8), \\ (E(a), 0{,}7), (D(b), 0{,}6), (C(a), 0{,}5), \\ (D(a), 0{,}4), (B(a), 0{,}3), (D(c), 0{,}3), \\ (C(b), 0{,}1) \end{array} \right\}$$

©AfIA 2020

L'ensemble des conflits assertionnels de $\mathcal{WA}$ est :

$$\mathcal{C}(\mathcal{WA}) = \left\{ \begin{array}{l} \{(A(a), 0, 9), (B(a), 0{,}3)\}, \\ \{(D(b), 0{,}6), (C(b), 0{,}1)\}, \\ \{(C(a), 0{,}5), (D(a), 0{,}4)\}, \\ \{(C(a), 0{,}5), (B(a), 0{,}3)\} \end{array} \right\}$$

□

Nous nous intéressons à calculer le degré de priorité le plus élevé où l'inconsistance est rencontrée dans la ABox, appelé degré d'inconsistance. Formellement :

Définition 2 *Soit $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$ une KB pondérée. Considérons un poids $\beta \in]0, 1]$.*

- *Soit $\mathcal{A}^{\geq\beta} = \{f \mid (f, \alpha) \in \mathcal{WA}, \alpha \geq \beta\}$ la β-coupe de la base assestionnelle pondérée $\mathcal{WA}$.*
- *Soit $\mathcal{A}^{>\beta} = \{f \mid (f, \alpha) \in \mathcal{WA}, \alpha > \beta\}$ la β-coupe stricte de $\mathcal{WA}$.*

Le degré d'inconsistance de $\mathcal{WA}$, noté $Inc(\mathcal{WA})$, est :

$$Inc(\mathcal{WA}) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{ssi } \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA}^* \rangle \text{ est consistant} \\ \beta & \text{ssi } \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}^{\geq\beta} \rangle \text{ est inconsistant} \\ & \text{et } \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}^{>\beta} \rangle \text{ est consistant} \end{array} \right.$$

Exemple 3 *Il est aisé de vérifier que pour $\beta = 0{,}4$:*

- *$\mathcal{A}^{>\beta} = \{A(a), A(b), B(c), E(a), D(b), C(a)\}$ est consistant avec $\mathcal{T}$, alors que*
- *$\mathcal{A}^{\geq\beta} = \mathcal{A}^{>\beta} \cup \{D(a)\}$ est inconsistant avec $\mathcal{T}$.*

Donc $Inc(\mathcal{WA}) = 0{,}4$. □

Le degré d'inconsistance est un moyen de restorer la consistance d'une ABox inconsistante. En effet, seules les assertions ayant un degré de certitude strictement supérieur au degré d'inconsistance sont incluses dans la réparation possibiliste, ce qui garantit que les résultats soient sains. Par ailleurs, cette méthode a l'avantage d'être efficace. En effet, pour une ABox pondérée $\mathcal{WA}$, $Inc(\mathcal{WA})$ peut être calculé de manière traitable en utilisant $log_2(n)$ (où n est le nombre de poids différents dans $\mathcal{WA}$) vérifications de consistance d'une ABox classique (sans les poids).

La réparation possibiliste [1], appelée π-réparation, est définie formellement comme suit :

Définition 3 *Soit $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$ une KB pondérée et $Inc(\mathcal{WA})$ le degré d'inconsistance.*
La π-réparation de $\mathcal{WA}$, notée $\pi(\mathcal{WA})$, est :

$$\pi(\mathcal{WA}) = \{f \mid (f, \alpha) \in \mathcal{WA}, \alpha > Inc(\mathcal{WA})\}.$$

La π-réparation $\pi(\mathcal{WA})$ est composée des assertions de $\mathcal{WA}$ ayant un degré de priorité strictement supérieur à $Inc(\mathcal{WA})$. Donc par la Définition 2, $\pi(\mathcal{WA})$ est consistant avec $\mathcal{T}$. Notons que les degrés de priorité sont omis dans $\pi(\mathcal{WA})$. D'autre part, lorsque $\mathcal{WK}$ est consistant (i.e., $Inc(\mathcal{WA}) = 0$), alors $\pi(\mathcal{WA})$ revient à $\mathcal{WA}^*$ (i.e., la ABox sans les degrés de priorité).

1. Dans la littérature, une réparation est souvent définie comme un sous-ensemble d'assertions maximal consistant. Ici, nous utilisons le terme réparation pour désigner un sous-ensemble d'assertions consistant.

Exemple 4 *La π-réparation de $\mathcal{WA}$ est :*
$\pi(\mathcal{WA}) = \{A(a), A(b), B(c), C(a), D(b), E(a)\}$. □

Jusqu'à présent, nous avons considéré des ABox pondérées telles que les poids attachés aux assertions peuvent être utilisés pour induire un pré-ordre total sur la ABox. Dans la prochaine section, nous étendons les résultats au cas où les poids sont partiellement ordonnés.

4 Bases de Connaissances Partiellement Pré-Ordonnées

Dans cette section, nous supposons toujours que les axiomes sont complètement fiables. Cependant, les degrés de priorité associés aux assertions sont partiellement ordonnés, i.e., les niveaux de fiabilité associés aux assertions peuvent être incomparables les uns avec les autres. Ceci se produit en général lorsque les informations sont obtenues de sources multiples. Donc, il n'est parfois pas possible de décider sur la préférence entre deux assertions f_i et f_j, car selon une source, l'assertion f_i devrait être préférée à f_j, alors que selon une autre source, cela devrait être le contraire. Nous rappelons que les assertions sont partiellement pré-ordonnées.

A présent, nous introduisons la notion d'échelle d'incertitude partiellement ordonnée $\mathbb{L} = (U, \rhd)$, définie sur un ensemble non-vide d'éléments $U = \{u_1, \ldots, u_n\}$, appelé ensemble partiellement ordonné, et un ordre partiel strict $\rhd$ (relation irréflexive et transitive).

Intuitivement, les éléments de U représentent des degrés de priorité appliqués aux assertions. Nous supposons que U contient un élément spécial noté $\mathbb{1}$, où $\mathbb{1}$ représente la certitude complète, tel que pour tout $u_i \in U \setminus \{\mathbb{1}\}$, $\mathbb{1} \rhd u_i$. De plus, si $u_i \not\rhd u_j$ et $u_j \not\rhd u_i$, nous disons que u_i et u_j sont incomparables et le notons par $u_i \bowtie u_j$.

Une KB DL-Lite partiellement pré-ordonnée est un triplet $\mathcal{K}_\rhd = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}_\rhd, \mathbb{L} \rangle$, avec $\mathcal{A}_\rhd = \{(f_i, u_i) \mid f_i$ est une assertion DL-Lite, $u_i \in U\}$ (où un poids unique u_i est affecté à chaque assertion f_i) et $\mathbb{L} = (U, \rhd)$.

Etant données deux assertions $(f_i, u_i), (f_j, u_j) \in \mathcal{A}_\rhd$, nous abuserons parfois la notation et écrirons $f_i \rhd f_j$ pour signifier $u_i \rhd u_j$, et écrirons $f_i \bowtie f_j$ pour signifier $u_i \bowtie u_j$.

4.1 Bases compatibles

Une façon naturelle de représenter une ABox partiellement pré-ordonnée est de considérer l'ensemble de toutes les ABox compatibles, à savoir celles qui préservent l'ordre de préférence strict entre les assertions, dans l'esprit des résultats établis en logique propositionelle [7].

Définition 4 *Soit $\mathbb{L} = (U, \rhd)$ une échelle d'incertitude. Soit $\mathcal{K}_\rhd = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}_\rhd, \mathbb{L} \rangle$ une KB DL-Lite partiellement pré-ordonnée.*
Soit $\mathcal{WK} = \langle \mathcal{T}, \mathcal{WA} \rangle$ une KB pondérée, obtenue de $\mathcal{K}_\rhd$ en remplaçant chaque élément u par un nombre réel unique dans l'intervalle $]0, 1]$, où :

$$\mathcal{WA} = \{(f, \alpha) \mid (f, u) \in \mathcal{A}_\rhd, \alpha \in]0, 1]\}.$$

La ABox pondérée $\mathcal{WA}$ est dite compatible avec $\mathcal{A}_\rhd$ si :

$$\forall (f_i, \alpha_i), (f_j, \alpha_j) \in \mathcal{WA},\ \textit{si}\ f_i \rhd f_j\ \textit{alors}\ \alpha_i > \alpha_j.$$

Notons que les bases compatibles ne sont pas uniques. En fait, il en existe une infinité. En réalité, les valeurs des poids importent peu, seul l'ordre entre les assertions est important, tel que démontré plus loin.

Exemple 5 *Soit $\mathbb{L} = (U, \rhd)$ une échelle d'incertitude définie sur l'ensemble $U = \{u_1, \ldots, u_4\}$, tel que : $u_4 \rhd u_3 \rhd u_1$, $u_4 \rhd u_2 \rhd u_1$ et $u_2 \bowtie u_3$. Soit $\mathcal{K}_\rhd = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}_\rhd, \mathbb{L} \rangle$ une KB partiellement pré-ordonnée. Soit $\mathcal{T} = \{A \sqsubseteq \neg B, B \sqsubseteq \neg C, C \sqsubseteq \neg D\}$.*

$$\mathcal{A}_\rhd = \left\{ \begin{array}{l} (A(a), u_4), (A(b), u_4), (B(c), u_4), \\ (C(a), u_3), (D(b), u_3), (E(a), u_3), \\ (C(b), u_2), \\ (B(a), u_1), (D(a), u_1), (D(c), u_1) \end{array} \right\}$$

Soit $\{0{,}2, 0{,}4, 0{,}6, 0{,}8\}$ un ensemble de poids. Les bases $\mathcal{WA}_1, \mathcal{WA}_2$ et $\mathcal{WA}_3$ sont compatibles avec $\mathcal{A}_\rhd$:

$$\mathcal{WA}_1 = \left\{ \begin{array}{l} (A(a), 0{,}8), (A(b), 0{,}8), (B(c), 0{,}8), \\ (C(a), 0{,}6), (D(b), 0{,}6), (E(a), 0{,}6), \\ (C(b), 0{,}4), \\ (B(a), 0{,}2), (D(a), 0{,}2), (D(c), 0{,}2) \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{WA}_2 = \left\{ \begin{array}{l} (A(a), 0{,}8), (A(b), 0{,}8), (B(c), 0{,}8), \\ (C(b), 0{,}6), \\ (C(a), 0{,}4), (D(b), 0{,}4), (E(a), 0{,}4), \\ (B(a), 0{,}2), (D(a), 0{,}2), (D(c), 0{,}2) \end{array} \right\}$$

$$\mathcal{WA}_3 = \left\{ \begin{array}{l} (A(a), 0{,}8), (A(b), 0{,}8), (B(c), 0{,}8), \\ (C(a), 0{,}6), (D(b), 0{,}6), (E(a), 0{,}6), (C(b), 0{,}6), \\ (B(a), 0{,}4), (D(a), 0{,}4), (D(c), 0{,}4) \end{array} \right\}$$

Pour $\mathcal{WA}_3$, tout sous-ensemble de trois poids qui préservent l'ordre entre les assertions convient. □

4.2 Calcul de la réparation partiellement pré-ordonnée

Nous cherchons à calculer une réparation unique pour une ABox partiellement pré-ordonnée. Cependant, la famille de ABox compatibles est infinie, ce qui signifie que le choix d'une ABox compatible parmi d'autres serait arbitraire. Une meilleure approche pour calculer la réparation partiellement pré-ordonnée consiste à :

(i) définir les ABox compatibles (Définition 4),

(ii) calculer la π-réparation associée à chaque ABox compatible (Définition 3), et finalement

(iii) prendre l'intersection de toutes les π-réparations.

Cela garantit que les résultats soient sains, puisque toutes les ABox compatibles seraient prises en compte.

Définition 5 *Soit $\mathbb{L} = (U, \rhd)$ une échelle d'incertitude. Soit $\mathcal{K}_\rhd = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}_\rhd, \mathbb{L} \rangle$ une KB DL-Lite partiellement pré-ordonnée. Soit $\mathcal{F}(\mathcal{A}_\rhd) = \{\pi(\mathcal{WA}) \mid \mathcal{WA}$ est compatible avec $\mathcal{A}_\rhd\}$ l'ensemble des π-réparations associées à toutes les bases compatibles de $\mathcal{A}_\rhd$ (données par la Définition 3).*

La réparation partiellement pré-ordonnée de $\mathcal{A}_\rhd$, notée $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$, est donnée par :

$$\pi(\mathcal{A}_\rhd) = \bigcap \{\pi(\mathcal{WA}) \mid \pi(\mathcal{WA}) \in \mathcal{F}(\mathcal{A}_\rhd)\}.$$

En d'autres termes, $\pi(\mathcal{A}_\rhd) = \{f \mid (f, u) \in \mathcal{A}_\rhd, \forall \mathcal{WA}$ compatible avec $\mathcal{A}_\rhd, f \in \pi(\mathcal{WA})\}$.

Les poids sont omis dans la réparation partiellement pré-ordonnée $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$, de la même façon que pour la π-réparation $\pi(\mathcal{WA})$.
L'ensemble $\mathcal{F}(\mathcal{A}_\rhd)$ est infini puisqu'il y a un nombre infini de ABox pondérées qui sont compatibles avec la ABox partiellement pré-ordonnée $\mathcal{A}_\rhd$. Cependant, il n'est pas nécessaire de considérer toutes les bases compatibles de $\mathcal{A}_\rhd$ pour calculer la réparation partiellement pré-ordonnée $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$. En effet, il suffit de considérer uniquement les bases compatibles (et leurs réparations associées) qui définissent un ordre différent entre les assertions. Cela est capturé par le lemme suivant.

Lemme 1 *Soit $\mathcal{WA}_1$ une ABox pondérée. Soit $S = \{\alpha \mid (f, \alpha) \in \mathcal{WA}_1\}$ l'ensemble de poids attachés aux assertions de $\mathcal{WA}_1$.*
Soit une fonction d'affectation $\omega : S \longrightarrow]0, 1]$ telle que $\forall \alpha_1, \alpha_2 \in S, \alpha_1 \geq \alpha_2$ ssi $\omega(\alpha_1) \geq \omega(\alpha_2)$.
Soit $\mathcal{WA}_2 = \{(f, \omega(\alpha)) \mid (f, \alpha) \in \mathcal{WA}_1\}$ une ABox pondérée obtenue en appliquant la fonction d'affectation ω aux poids attachés aux assertions de $\mathcal{WA}_1$. Alors :

$$\pi(\mathcal{WA}_1) = \pi(\mathcal{WA}_2).$$

Dans le Lemme 1, même si la ABox $\mathcal{WA}_2$ est différente de la ABox $\mathcal{WA}_1$, elle en préserve l'ordre sur les assertions. Dans ce cas, les deux bases pondérées génèrent les mêmes réparations.

Preuve : Montrons que $Inc(\mathcal{WA}_1) = \beta$ ssi $Inc(\mathcal{WA}_2) = \omega(\beta)$. Notons d'abord que si $\mathcal{C}_{12} = \{(f_1, \alpha_1), (f_2, \alpha_2)\}$ et $\mathcal{C}_{34} = \{(f_3, \alpha_3), (f_4, \alpha_4)\}$ sont deux conflits de $\mathcal{WA}_1$, alors $\mathcal{C}'_{12} = \{(f_1, \omega(\alpha_1)), (f_2, \omega(\alpha_2))\}$ et $\mathcal{C}'_{34} = \{(f_3, \omega(\alpha_3)), (f_4, \omega(\alpha_4))\}$ sont aussi deux conflits de $\mathcal{WA}_2$. Donc, par définition de la fonction $\omega(\cdot)$, si nous avons $min\{\alpha : (f, \alpha) \in \mathcal{C}_{12}\} = \alpha_1$ (resp. α_2), alors nous avons aussi $min\{\omega(\alpha) : (f, \omega(\alpha)) \in \mathcal{C}'_{12}\} = \omega(\alpha_1)$ (resp. $\omega(\alpha_2)$). De la même façon, si $min\{\alpha : (f, \alpha) \in \mathcal{C}_{12}\} > min\{\alpha : (f, \alpha) \in \mathcal{C}_{34}\}$, alors $min\{\omega(\alpha) : (f, \omega(\alpha)) \in \mathcal{C}'_{12}\} > min\{\omega(\alpha) : (f, \omega(\alpha)) \in \mathcal{C}'_{34}\}$. Donc si $Inc(\mathcal{WA}_1) = \beta$, alors $Inc(\mathcal{WA}_2) = \omega(\beta)$.
Supposons que $Inc(\mathcal{WA}_1) = \beta$. Soit $(f, \alpha) \in \mathcal{WA}_1$ t.q. $\alpha > \beta$. Alors $f \in \pi(\mathcal{WA}_1)$. Par définition de $\omega(\cdot)$, nous obtenons $\omega(\alpha) > \omega(\beta) = Inc(\mathcal{WA}_2)$. Cela signifie que $f \in \pi(\mathcal{WA}_2)$. De la même façon, soit $(f, \alpha) \in \mathcal{WA}_1$ t.q. $\alpha \leq \beta$. Alors $f \notin \pi(\mathcal{WA}_1)$. Par définition de $\omega(\cdot)$, nous obtenons $\omega(\alpha) \leq \omega(\beta) = Inc(\mathcal{WA}_2)$. Cela signifie que $f \notin \pi(\mathcal{WA}_2)$.
Nous en concluons que $\pi(\mathcal{WA}_1) = \pi(\mathcal{WA}_2)$. ■

Nous illustrons ces notions sur notre exemple.

©AfIA 2020

Exemple 6 *Grâce au Lemme 1, afin de calculer la réparation $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$, il suffit de considérer uniquement les trois bases $\mathcal{WA}_1$, $\mathcal{WA}_2$ et $\mathcal{WA}_3$ comme bases compatibles de $\mathcal{A}_\rhd$. Leurs π-réparations associées sont données par :*

— $\pi(\mathcal{WA}_1) = \{A(a), A(b), B(c), C(a), D(b), E(a)\}$.

— $\pi(\mathcal{WA}_2) = \{A(a), A(b), B(c), C(b)\}$.

— $\pi(\mathcal{WA}_3) = \{A(a), A(b), B(c)\}$.

La réparation partiellement pré-ordonnée est :
$\pi(\mathcal{A}_\rhd) = \bigcap_{i=1\ldots3} \pi(\mathcal{WA}_i) = \{A(a), A(b), B(c)\}$. □

La prochaine section montre comment calculer la réparation $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ sans énumérer toutes les bases compatibles.

4.3 Caractérisation de la réparation partiellement pré-ordonnée

Afin d'éviter de calculer toutes les bases compatibles avec une ABox partiellement pré-ordonnée $\mathcal{A}_\rhd$, nous proposons une caractérisation de la Définition 5 en introduisant la notion d'assertion π-acceptée. En substance, une assertion est π-acceptée si elle est strictement préférée à au moins une assertion de chaque conflit de $\mathcal{A}_\rhd$.

Définition 6 *Soit $\mathbb{L} = (U, \rhd)$ une échelle d'incertitude. Soit $\mathcal{K}_\rhd = \langle \mathcal{T}, \mathcal{A}_\rhd, \mathbb{L}\rangle$ une KB DL-Lite partiellement pré-ordonnée. Soit $\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$ l'ensemble des conflits de $\mathcal{A}_\rhd$.*
Une assertion $(f, u) \in \mathcal{A}_\rhd$ est π-acceptée ssi :

$$\forall \mathcal{C} \in \mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd), \exists (g, u_j) \in \mathcal{C}, g \neq f, \text{ t.q. } f \rhd g \text{ (i.e., } u \rhd u_j).$$

L'ensemble de conflits assertionnels $\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$ est obtenu par la Définition 1 où la KB pondérée $\mathcal{WK}$ et la ABox pondérée $\mathcal{WA}$ sont remplacées par la KB partiellement pré-ordonnée $\mathcal{K}_\rhd$ et la ABox partiellement pré-ordonnée $\mathcal{A}_\rhd$.

Exemple 7 *L'ensemble de conflits assertionnels de $\mathcal{A}_\rhd$ est :*

$$\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd) = \left\{ \begin{array}{l} \{(A(a), u_4), (B(a), u_1)\}, \\ \{(C(a), u_3), (D(a), u_1)\}, \\ \{(D(b), u_3), (C(b), u_2)\}, \\ \{(C(a), u_3), (B(a), u_1)\} \end{array} \right\}$$

Il est aisé de vérifier que les assertions $(A(a), u_4)$, $(A(b), u_4)$ et $(B(c), u_4)$ sont strictement préférées à au moins une assertion de chaque conflit, puisque u_4 est strictement préféré à tous les autres poids. Ainsi, ces assertions sont toutes π-acceptées. □

Un résultat important de cet article est que l'ensemble des assertions π-acceptées correspond exactement à la réparation d'une ABox partiellement pré-ordonnée $\mathcal{A}_\rhd$ (où les poids sont omis).

Proposition 1 *Une assertion $(f, u) \in \mathcal{A}_\rhd$ est π-acceptée ssi $f \in \pi(\mathcal{A}_\rhd)$.*

Preuve :

(i) Supposons que $(f, u) \in \mathcal{A}_\rhd$ est π-acceptée mais $f \notin \pi(\mathcal{A}_\rhd)$. Donc il existe une base compatible $\mathcal{WA}$ de $\mathcal{A}_\rhd$ et un poids $\alpha_i \in]0, 1]$ t.q. $(f, \alpha_i) \in \mathcal{WA}$ et $f \notin \pi(\mathcal{WA})$.
Soit $Inc(\mathcal{WA}) = \beta$. Par la Définition 2, cela signifie que $\mathcal{A}^{\geq\beta}$ est inconsistante mais $\mathcal{A}^{>\beta}$ est consistante.
Soit un conflit $\{(g, \alpha_j), (h, \alpha_k)\} \in \mathcal{C}(\mathcal{WA})$ où les assertions $g, h \in \mathcal{A}^{\geq\beta}$ (un tel conflit existe puisque $\mathcal{A}^{\geq\beta}$ est inconsistante). Donc, nécessairement $\alpha_j \geq \beta$ et $\alpha_k \geq \beta$ (puisque $\mathcal{A}^{\geq\beta}$ est inconsistante).
Par la Définition 3, $f \notin \pi(\mathcal{WA})$ signifie que $\alpha_i \leq \beta$. Donc $\alpha_j \geq \alpha_i$ et $\alpha_k \geq \alpha_i$. Mais cela contredit le fait que (f, u) est π-acceptée, ce qui garantit que $f \rhd g$ ou $f \rhd h$, i.e., $\alpha_i > \alpha_j$ ou $\alpha_i > \alpha_k$.

(ii) Supposons que l'assertion (f, u) n'est pas π-acceptée mais $f \in \pi(\mathcal{A}_\rhd)$. L'assertion (f, u) n'est pas π-acceptée signifie qu'il y a un conflit $\{(g, u_j), (h, u_k)\} \in \mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$ tel que $f \not\rhd g$ et $f \not\rhd h$, i.e., $u \not\rhd u_j$ et $u \not\rhd u_k$. Trois cas sont à considérer :

(a) $g \rhd f$ et $h \rhd f$ ont lieu, i.e., $u_j \rhd u$ et $u_k \rhd u$. Donc, dans toutes les bases compatibles de $\mathcal{A}_\rhd$, les assertions g et h sont préférées à f. Soit $\mathcal{WA}$ une base compatible qui contient $(f, \alpha_i), (g, \alpha_j)$ et (h, α_k), avec $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k \in]0, 1]$. Donc $\alpha_j > \alpha_i$ et $\alpha_k > \alpha_i$.
Les assertions g et h sont en conflit signifie que $Inc(\mathcal{WA}) \geq min(\alpha_j, \alpha_k)$. Ainsi, $Inc(\mathcal{WA}) \geq \alpha_i$, donc $f \notin \pi(\mathcal{WA})$. Mais cela contredit le fait que $f \in \pi(\mathcal{A}_\rhd)$.

(b) $f \bowtie g$ et $h \rhd f$ ont lieu, i.e., $u \bowtie u_j$ et $u_k \rhd u$. Dans ce cas, il suffit d'avoir une base compatible $\mathcal{WA}$ qui contient $(f, \alpha_i), (g, \alpha_j)$ et (h, α_k), avec $\alpha_i, \alpha_j, \alpha_k \in]0, 1]$, $\alpha_j > \alpha_i$ et $\alpha_k > \alpha_i$. Une telle base compatible existe toujours. Donc, $f \notin \pi(\mathcal{WA})$. Mais cela contredit le fait que $f \in \pi(\mathcal{A}_\rhd)$.
Le cas où $g \rhd f$ mais $f \bowtie h$ est également valide par symmétrie.

(c) $f \bowtie g$ et $f \bowtie h$ ont lieu, i.e., $u \bowtie u_j$ et $u \bowtie u_k$. Il est alors suffisant d'avoir une base compatible $\mathcal{WA}$ qui contient $(f, \alpha_i), (g, \alpha_j)$ et (h, α_k) où $\alpha_j > \alpha_i$ et $\alpha_k > \alpha_i$. Cela revient au cas (a) ci-dessus.

■

Exemple 8 *Les Exemples 6 et 7 montrent que les assertions π-acceptées (sans poids) sont exactement celles de $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$, à savoir : $\{A(a), A(b), B(c)\}$.*

□

4.4 Propriétés de la réparation partiellement pré-ordonnée

La caractérisation donnée dans la Définition 6 nous permet d'établir les résultats suivants.

Proposition 2

1. *La base $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ est consistante avec la TBox.*
2. *Le calcul de $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ se fait en temps polynomial en taille de la ABox.*

Preuve :

1. La consistance de $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ est directe. Puisque la π-réparation $\pi(\mathcal{WA})$ de chaque base compatible $\mathcal{WA}$ de $\mathcal{A}_\rhd$ est consistante, l'intersection de toutes les π-réparations est nécessairement consistante.
2. Pour ce qui est de la complexité, nous rappelons que le calcul de l'ensemble de conflits $\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$ se fait en temps polynomial en taille de $\mathcal{A}_\rhd$ en DL-Lite. Donc, calculer $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ se fait aussi en temps polynomial. En effet, vérifier si une assertion $(f, u) \in \mathcal{A}_\rhd$ est π-acceptée revient à parcourir tous les conflits dans $\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$. Cela se fait en temps linéaire en taille de $\mathcal{C}(\mathcal{A}_\rhd)$ (la taille elle-même est bornée par $\mathcal{O}(|\mathcal{A}_\rhd|^2)$).

■

En plus de ces deux résultats, par construction de $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$, il est aisé de constater que lorsque l'ordre partiel $\rhd$ est un ordre total noté $\succ$, $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$ correspond à la π-réparation $\pi(\mathcal{A}_\succ)$.

Nous concluons que raisonner (i.e., répondre à des requêtes) à partir d'une KB inconsistante partiellement pré-ordonnée revient à remplacer la ABox originale $\mathcal{A}_\rhd$ par sa réparation $\pi(\mathcal{A}_\rhd)$. En effet, nous avons établi la consistance de la réparation avec la TBox mais aussi la traitabilité de son calcul. De plus, nous avons montré que lorsque la relation de préférence est un ordre total, notre méthode revient à calculer une réparation possibiliste standard.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une extension de DL-Lite possibiliste au cas de bases de connaissances partiellement pré-ordonnées afin de gérer l'inconsistance. L'idée principale consiste à interpréter une ABox partiellement pré-ordonnée comme une famille de ABox pondérées compatibles, puis de calculer la réparation possibiliste de chaque base compatible, et enfin de considérer l'intersection de toutes les réparations possibilistes. Cela produit une réparation unique pour la ABox partiellement pré-ordonnée. Nous avons proposé une caractérisation en introduisant la notion d'assertions π-acceptées et avons montré que la réparation partiellement pré-ordonnée revient à calculer l'ensemble des assertions π-acceptées. En particulier, nous avons montré que ce calcul peut se faire en temps polynomial en DL-Lite.

Dans des travaux futurs, nous comptons explorer des méthodes pour augmenter la productivité de la réparation partielle, par exemple en considérant la fermeture des réparations possibilistes associées aux ABox compatibles. Un aspect important consiste à déterminer si le calcul de la réparation fermée possibiliste partielle peut être fait en temps polynomial en DL-Lite. Nous espérons montrer que c'est en effet le cas en réduisant le problème à celui de répondre à une requête de *instance checking*. Plus généralement, nous comptons investiguer si des méthodes de calcul de réparations qui sont polynomiales dans les cas non-ordonné et prioritaire seraient également polynomiales en présence d'un ordre partiel. Une autre piste à étudier consiste à munir les axiomes de la TBox de degrés de possibilités.

Dans le cadre de notre projet de recherche appelé AniAge, nous comptons appliquer nos résultats au problème de *query answering* à partir d'ontologies de danses de l'Asie du Sud-est. Des experts en danses traditionnelles annotent sémantiquement des vidéos de danse, selon l'ontologie (la TBox) pour représenter les aspects culturels qui sont exprimés par certains mouvements de danse, des postures, des tenues et des accessoires. Les experts peuvent affecter des degrés de confiance à leurs annotations pour refléter différents degrés de fiabilité de l'information. Cela revient à définir une relation de priorité, à savoir un préordre total, sur les assertions. Cependant, différents experts peuvent ne pas partager la même signification des échelles de confiance. Cela peut s'exprimer en appliquant un préordre partiel à la ABox. Des conflits peuvent émerger lorsqu'une même vidéo est annotée différemment par plusieurs experts. Cela souligne l'importance de gérer l'inconsistance efficacement afin de pouvoir répondre à des requêtes.

Remerciements

Ce travail a été financé par le projet européen H2020-MSCA-RISE : AniAge (High Dimensional Heterogeneous Data based Animation Techniques for Southeast Asian Intangible Cultural Heritage). Ce travail a également bénéficié du soutien du projet AAP A2U QUID (QUeryIng heterogeneous Data).

Références

[1] Franz Baader, Andreas Ecke, Gabriele Kern-Isberner, and Marco Wilhelm. The complexity of the consistency problem in the probabilistic description logic $\mathcal{ALC}^{\mathsf{me}}$. In *12th International Symposium on Frontiers of Combining Systems (FroCoS), London, UK*, pages 167–184, 2019.

[2] Jean-François Baget, Salem Benferhat, Zied Bouraoui, Madalina Croitoru, Marie-Laure Mugnier, Odile Papini, Swan Rocher, and Karim Tabia. A general modifier-based framework for inconsistency-tolerant query answering. In *Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR), Cape Town, South Africa*, pages 513–516, 2016.

[3] Sihem Belabbes, Salem Benferhat, and Jan Chomicki. Elect : An inconsistency handling approach for partially preordered lightweight ontologies. In *Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning (LPNMR), Philadelphia, USA*, pages 210–223, 2019.

[4] S. Benferhat, Z. Bouraoui, and K. Tabia. How to select one preferred assertional-based repair from inconsistent and prioritized DL-Lite knowledge bases ? In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Buenos Aires, Argentina*, pages 1450–1456, 2015.

[5] S. Benferhat, D. Dubois, and H. Prade. How to infer from inconsistent beliefs without revising ? In *Inter-*

©AfIA 2020

national Joint Conference on Artificial Intelligence, pages 1449–1457. Morgan Kaufmann, 1995.

[6] Salem Benferhat and Zied Bouraoui. Min-based possibilistic DL-Lite. *Journal of Logic and Computation*, 27(1) :261–297, 2017.

[7] Salem Benferhat, Sylvain Lagrue, and Odile Papini. Reasoning with partially ordered information in a possibilistic logic framework. *Fuzzy Sets and Systems*, 144(1) :25–41, 2004.

[8] Meghyn Bienvenu and Camille Bourgaux. Inconsistency-tolerant querying of description logic knowledge bases. In *Reasoning Web : Logical Foundation of Knowledge Graph Construction and Query Answering*, volume 9885, pages 156–202. LNCS. Springer, 2016.

[9] Fernando Bobillo and Umberto Straccia. Reasoning within fuzzy OWL 2 EL revisited. *Fuzzy Sets and Systems*, 351 :1–40, 2018.

[10] Stefan Borgwardt, İsmail İlkan Ceylan, and Thomas Lukasiewicz. Recent advances in querying probabilistic knowledge bases. In *27th International Joint Conference on Artificial Intelligence, (IJCAI), Stockholm, Sweden*, pages 5420–5426, 2018.

[11] Stefan Borgwardt and Rafael Peñaloza. Fuzzy description logics - a survey. In *Scalable Uncertainty Management (SUM)*, pages 31–45, 2017.

[12] D. Calvanese, E. Kharlamov, W. Nutt, and D. Zheleznyakov. Evolution of DL-Lite knowledge bases. In *International Semantic Web Conference (1)*, pages 112–128, 2010.

[13] Diego Calvanese, Giuseppe De Giacomo, Domenico Lembo, Maurizio Lenzerini, and Riccardo Rosati. Tractable reasoning and efficient query answering in description logics : The DL-Lite family. *Journal of Automated Reasoning*, 39(3) :385–429, 2007.

[14] Arthur P. Dempster. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 38 :325–339, 1967.

[15] Didier Dubois, Jérôme Mengin, and Henri Prade. Possibilistic uncertainty and fuzzy features in description logic. a preliminary discussion. *Fuzzy Logic and the Semantic Web. Volume 1 of Capturing Intelligence*, pages 101–113, 2006.

[16] Didier Dubois and Henri Prade. Possibility theory and its applications : Where do we stand ? In *Springer Handbook of Computational Intelligence*, pages 31–60. 2015.

[17] Didier Dubois, Henri Prade, and Steven Schockaert. Generalized possibilistic logic : Foundations and applications to qualitative reasoning about uncertainty. *Artificial Intelligence*, 252 :139–174, 2017.

[18] Ronald Fagin, Joseph Y. Halpern, Yoram Moses, and Moshe Y. Vardi. *Reasoning About Knowledge*. MIT Press, 2003.

[19] Marcelo Finger, Lluis Godo, Henri Prade, and Guilin Qi. Advances in weighted logics for artificial intelligence. *International Journal of Approximate Reasoning*, 88 :385–386, 2017.

[20] Bernhard Hollunder. An alternative proof method for possibilistic logic and its application to terminological logics. *International Journal of Approximate Reasoning*, 12(2) :85–109, 1995.

[21] Roman Kontchakov, Carsten Lutz, David Toman, Frank Wolter, and Michael Zakharyaschev. The combined approach to query answering in DL-Lite. In *12th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR), Toronto, Canada*, pages 247–257, 2010.

[22] D. Lembo, M. Lenzerini, R. Rosati, M. Ruzzi, and D. Fabio Savo. Inconsistency-tolerant semantics for description logics. In *International Conference on Web Reasoning and Rule Systems*, volume 6333 of *LNCS*, pages 103–117, 2010.

[23] Carsten Lutz and Lutz Schröder. Probabilistic description logics for subjective uncertainty. In *12th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR), Toronto, Canada*, 2010.

[24] Jeff Z. Pan, Giorgos B. Stamou, Giorgos Stoilos, and Edward Thomas. Expressive querying over fuzzy DL-Lite ontologies. In *20th DL workshop, Bressanone, Italy*, 2007.

[25] G. Qi, Q. Ji, Jeff Z. Pan, and J. Du. Extending description logics with uncertainty reasoning in possibilistic logic. *International Journal of Intelligent Systems*, 26(4) :353–381, 2011.

[26] Glenn Shafer. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press, 1976.

[27] Wolfgang Spohn. *The Laws of Belief - Ranking Theory and Its Philosophical Applications*. Oxford University Press, 2014.

[28] Umberto Straccia. Towards top-k query answering in description logics : The case of DL-Lite. In *10th European Conference on Logics in Artificial Intelligence (JELIA), Liverpool, UK*, pages 439–451, 2006.

[29] Umberto Straccia. *Foundations of Fuzzy Logic and Semantic Web Languages*. Chapman & Hall/CRC, 2013.

[30] Fayçal Touazi, Claudette Cayrol, and Didier Dubois. Possibilistic reasoning with partially ordered beliefs. *Journal of Applied Logic*, 13(4) :770–798, 2015.

[31] Despoina Trivela, Giorgos Stoilos, and Vasilis Vassalos. Query rewriting for DL ontologies under the ICAR semantics. In *Rules and Reasoning - Third International Joint Conference, RuleML+RR, Bolzano, Italy*, pages 144–158, 2019.

[32] Lofti A. Zadeh. Fuzzy sets as a basis for a theory of probability. *Fuzzy Sets and Systems*, 1 :3–28, 1978.

Immersion de divisions territoriales et description de leur évolution dans le Web sémantique

C. Bernard[1], M. Villanova-Oliver[1], J. Gensel[1], P. Genoud[1], H. Dao[2]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG
[2] Univ. de Genève, Département de Géographie et Environnement

camille.bernard@univ-grenoble-alpes.fr, marlene.villanova-oliver@univ-grenoble-alpes.fr, jerome.gensel@univ-grenoble-alpes.fr, philippe.genoud@univ-grenoble-alpes.fr, hy.dao@unige.ch

Résumé

Partout dans le monde, les découpages géographiques, dont les territoires font l'objet, sont soumis à des modifications de noms, d'affiliations, de frontières, etc. Ces changements sont un obstacle à la comparabilité des données statistiques (socio-économiques, sanitaires, environnementales...) mesurées sur ces territoires sur de longues périodes. Afin d'apporter une solution conceptuelle et opérationnelle à cette problématique, nous proposons un framework, nommé Theseus, qui s'appuie sur les technologies du Web sémantique pour décrire l'évolution des découpages géographiques dans le Web des données ouvertes et liées (Linked Open Data (LOD) en anglais).

Mots-clés

Web Sémantique, Ontologies, Évolution, Données géographiques.

Abstract

All around the world, geographic divisions change of names, affiliations, borders, etc. These changes are an obstacle to the comparability of statistical data (socio-economic, health or environmental data) measured on these territories over long periods. In order to provide a conceptual and operational solution to this issue, we propose a framework, called Theseus, which uses semantic Web technologies to describe the evolution of geographic divisions on the Linked Open Data (LOD) Web.

Keywords

Semantic Web, Ontologies, Evolution, Geographic data.

1 Introduction

Depuis la mise en place de directives officielles visant à l'ouverture des données créées par les institutions publiques un peu partout dans le monde, le volume du Web des données ouvertes et liées augmente continuellement. En particulier, le secteur public, les organismes gouvernementaux et notamment les instituts officiels de statistique et de cartographie déversent de plus en plus de contenus. Ces institutions publient des statistiques géo-codées à travers des découpages géographiques permettant aux responsables politiques d'accéder à des analyses fines du territoire dont ils ont la charge. Les découpages géographiques sur lesquels reposent ces données statistiques sont construits pour les besoins de la statistique, mais dérivent généralement de structures électorales ou administratives. On parle dans ce contexte de *Nomenclatures Statistiques Territoriales* (acronyme TSN en anglais). Les TSN codifient les unités géographiques qui, sur plusieurs niveaux d'imbrication (par exemple, en France les niveaux régional, départemental, communal, etc.), composent un territoire observé.

Une TSN fournit ainsi un catalogue d'Unités Territoriales (UT, également appelées domaines statistiques), souvent présentés selon une hiérarchie qui se reflète dans les codes numériques ou alphabétiques qui leur sont attribués. Une TSN est utilisée pour compiler des données statistiques sur un ou plusieurs territoire(s) étudié(s), à un ou plusieurs niveau(x) de division géographique. Les TSN sont utilisées par les instituts statistiques (locaux, régionaux, nationaux, internationaux) ou d'autres organisations pour établir et publier des statistiques spatialisées et comparables.

Partout dans le monde, les divisions territoriales sont soumises à des modifications de noms, d'affiliations, de frontières, etc. Par exemple en 2016, en France, les régions administratives ont fusionné en grandes régions. Ces changements territoriaux sont très fréquents, d'autant plus que le maillage géographique est fin. Or, ces changements sont un obstacle à la comparabilité de données statistiques (socio-économiques, sanitaires, environnementales...) ayant été agrégées spatialement par régions géographiques (des données ponctuelles agrégées par régions administratives, par exemple). Ce problème de comparabilité, bien connu sous le nom de *problème d'agrégation spatiale* (*Modifiable Areal Unit Problem* en anglais) [22] décrit le phénomène selon lequel des données collectées dans différents découpages géographiques (ou différentes versions d'un découpage) ne sont pas comparables en raison des différences potentielles entre les zones géographiques observées.

Face à ces problèmes de changements territoriaux pouvant entraîner des ruptures dans les séries chronologiques, les instituts statistiques choisissent de fournir une estimation des données passées calculées pour les toutes dernières versions des découpages géographiques ou de s'af-

©AfIA 2020

franchir des frontières territoriales, en créant des cartes de chaleur par exemple. Les traces des changements territoriaux (changements des frontières des régions, changements de noms de communes, etc.) sont alors comme effacées, ignorées, bien qu'en général, de tels changements aient un sens et soient capitaux pour comprendre un territoire. Il est alors crucial de conserver et d'enrichir ces informations relatives aux changements territoriaux, par devoir de mémoire, mais aussi pour fiabiliser les traitements des données relatives à ces territoires. D'une part, l'objectif est de fournir les connaissances permettant une lecture du territoire fidèle à la réalité du terrain et assurant une certaine traçabilité des décisions politiques. D'autre part, il s'agit d'éviter toute erreur d'analyse des données par exemple lorsque les zones géographiques auxquelles elles se rapportent changent alors même qu'elles conservent leur identifiant dans les jeux de données statistiques (dans les TSN, des unités de même code peuvent ne plus couvrir tout à fait le même espace territorial). Ainsi, un enjeu est de structurer la connaissance permettant de comprendre l'organisation et l'évolution des territoires, dans l'optique de fournir à différents acteurs (statisticiens, chercheurs, décideurs ou encore citoyens) des descriptions riches aidant, par suite, à une meilleure exploitation et une meilleure compréhension des données statistiques géo-codées.

Afin d'apporter une solution conceptuelle et opérationnelle à cette problématique, nous proposons un framework, nommé *Theseus*, qui s'appuie sur les technologies du Web sémantique pour automatiser la représentation de découpages géographiques et de leurs évolutions au cours du temps, sous forme de données ouvertes et liées (*Linked Open Data* en anglais (LOD)). Nous adoptons les technologies du Web sémantique afin de bénéficier de la base de connaissances distribuées que constitue le LOD Web (ou LOD Cloud) nous permettant d'enrichir les informations sur les changements territoriaux avec des métadonnées et d'autres ressources disponibles dans le Web pouvant contribuer à expliquer les changements (par exemple, des événements historiques). Ces technologies garantissent également l'interopérabilité syntaxique et sémantique entre des systèmes échangeant des TSN produites par les agences statistiques. Le framework Theseus se compose d'un ensemble de modules permettant la gestion du cycle de vie des TSN dans le LOD : de la modélisation des zones géographiques et de leurs changements au cours du temps, à la détection automatique des changements via un algorithme d'appariement de versions de TSN [3], jusqu'à l'exploitation de ces descriptions dans le LOD Cloud au moyen de requêtes SPARQL. L'ensemble des modules logiciels est articulé autour de deux ontologies nommées TSN Ontology (http://purl.org/net/tsn) et TSN-Change Ontology (http://purl.org/net/tsnchange) [4], conçues pour une description spatiale et temporelle non ambiguë des structures géographiques et de de leurs modifications au cours du temps. Ces deux ontologies s'appuient sur des ontologies standards telles que l'ontologie OWL-Time (pour la dimension temporelle des données) et l'ontologie GeoSPARQL (pour la représentation de la dimension spatiale des données). Les graphes de connaissances générés par Theseus améliorent la compréhension des dynamiques territoriales, en fournissant aux décideurs politiques, aux techniciens, aux chercheurs et au grand public des descriptions sémantiques fines des changements territoriaux, exploitables pour des analyses fiables et traçables.

Cet article présente l'ensemble du travail que nous avons réalisé pour la publication de TSN évolutives dans le LOD : ensemble qui prend la forme d'un framework jamais présenté jusqu'alors. Cet objectif soulève des défis qui s'inscrivent à différentes étapes du cycle de vie établi par [27] pour la publication des données liées gouvernementales. Dans une première partie, nous présentons ces défis et montrons en quoi des approches existantes contribuent à les relever en partie, sans toutefois y répondre pleinement. Notre approche, qui comble les lacunes de travaux existants, est incarnée par le framework Theseus dont nous exposons les grands principes. Nous justifions des choix de modélisation retenus pour les ontologies TSN et TSN-Change qui offrent une solution inédite pour la représentation des versions de nomenclatures et la description des changements. Nous montrons comment ces ontologies ont été utilisées pour produire des graphes de connaissances sur les évolutions de trois nomenclatures territoriales officielles. Ceci illustre l'applicabilité et la généricité de notre approche pour verser sous forme de graphes RDF des divisions territoriales évolutives et la description de leurs changements dans le LOD. Enfin, nous présentons quelques unes des requêtes que nous avons prédéfinies pour interroger ces graphes de connaissances avant de conclure et de donner les perspectives envisagées pour ce travail.

2 Problématique et défis visés

2.1 Défi 1 : représenter les divisions territoriales évolutives de façon générique et interopérable

De nombreux instituts statistiques dans le monde publient désormais leurs statistiques sous forme de LOD (par exemple, les données statistiques italiennes [1], les données statistiques écossaises [2], les données statistiques du ministère britannique des communautés et des collectivités locales [3], les données statistiques aragonaises [4] ou les données statistiques japonaises [5]). Quand il s'agit d'associer une composante géographique à leurs données, ces instituts créent souvent leur propre ontologie pour la description des zones. Un état de l'art sur ces différentes initiatives est présenté dans [2]. Ceci se traduit par une prolifération contre-productive de vocabulaires non alignés. L'initiative la plus approfondie est celle de l'*Office for National Statistics* (ONS) du Royaume-Uni qui propose des vocabulaires [6] pour représenter les zones géographiques dans le contexte

1. http://datiopen.istat.it/index.php?language=eng
2. http://statistics.gov.scot/
3. http://opendatacommunities.org/data
4. http://opendata.aragon.es/
5. http://data.e-stat.go.jp/lodw/en
6. http://statistics.data.gov.uk/vocabularies

de la publication de données statistiques. Dans cette approche, on peut noter un certain niveau d'abstraction sur les termes utilisés pour décrire les UT, ce qui permet de décrire d'autres UT que celles du Royaume-Uni. Néanmoins, il est nécessaire d'ajouter de nouveaux concepts à l'ontologie Geography [7] si l'on veut décrire de nouveaux territoires et de nouvelles hiérarchies territoriales que ceux énumérés. Aucune des initiatives étudiées n'offre un niveau d'abstraction suffisant pour décrire sémantiquement n'importe quelle structure hiérarchique de type TSN. Dans [24], nous avons proposé un modèle de base de données relationnelle offrant un niveau d'abstraction suffisant pour décrire sémantiquement toute TSN. Ce modèle constitue un socle pertinent pour notre objectif mais doit être adapté en vue d'une immersion dans le Web sémantique. Cela nécessite de créer des identifiants uniques (URI dans le LOD) pour chaque ressource que constitue chaque représentation de ce qu'a été une UT au cours de sa vie (*i.e.*, chaque version d'UT). Ainsi, dans une perspective applicative, nous visons un modèle permettant à des producteurs de données de déclarer précisément, pour chaque observation ou mesure, quelle est exactement la version de l'UT concernée, et à quelle division géographique (hiérarchie) elle appartient (*i.e.*, version de TSN).

2.2 Défi 2 : représenter finement les changements territoriaux

En ce qui concerne la nature évolutive des zones géographiques couvertes par les observations et les TSN auxquelles ces zones évolutives appartiennent, aucune des ontologies décrites ci-dessus ne fournit un vocabulaire suffisamment générique et riche pour décrire la façon dont n'importe quelle TSN, mais aussi les niveaux territoriaux et les UT qui la composent, évoluent au fil du temps. Pourtant, représenter finement le changement territorial vise à en comprendre les raisons et à garantir le transfert fiable de données statistiques d'une version de TSN à l'autre. Il manque donc un modèle qui puisse aider à savoir comment un territoire a évolué dans le temps, un pré-requis essentiel à une interprétation et une compréhension plus justes des valeurs statistiques observées ou mesurées sur un territoire évolutif. La plupart des contributions des agences limitent leur description à des changements d'attributs isolés et ne proposent aucun vocabulaire pour décrire et regrouper les changements qui interviennent lors d'un même événement. Un état de l'art sur ces différentes initiatives est présenté dans [2] Ainsi, les changements intervenant dans les structures des TSN sont rarement décrits et lorsqu'ils le sont, les descriptions sont faites UT par UT, sans lien entre les changements. Il est donc difficile d'identifier chacun des composants de la TSN (territoires, niveaux et UT) qui change. Il manque également un support pour décrire des changements qui se propagent de niveau en niveau (par exemple, le changement des limites d'une UT peut également avoir un impact sur les limites de ses sous-UT). Compte tenu de la nature imbriquée des éléments d'une TSN, cet aspect est un élément favorisant une compréhension plus globale d'une évolution territoriale observée selon une approche *top-down* ou *bottom-up*.

La littérature sur la représentation de l'évolution territoriale propose des solutions pour l'expression de lien de filiation [11, 13] entre unités géographiques et la caractérisation du changement (à travers des typologies [7, 11, 24, 10] et des structures de représentations dédiées [18, 20, 19]). Ces travaux ont inspiré notre contribution visant à offrir un cadre conceptuel pertinent pour une représentation sémantiquement riche de l'évolution. Les modèles ontologiques que nous proposons répondent ainsi aux défis 1 et 2 que nous venons de présenter. Ils sont décrits dans [2] et brièvement rappelés dans la Section 4.

2.3 Défi 3 : automatiser la description des changements territoriaux

Dans [19], les auteurs proposent un processus semi-automatique pour créer et alimenter le modèle représentant de l'évolution d'unités administratives correspondant à des Domaines Juridictionnels proposés dans [20]. Le processus repose sur une approche qui permet de définir les caractéristiques des sources de données à intégrer afin de gérer les Domaines Juridictionnels de n'importe quel pays. Toutefois, pour peupler le modèle ontologique, il est nécessaire d'utiliser en entrée un dictionnaire énumérant tous les changements individuels. Cette contrainte est également observée dans le travail de [18]. Ceci constitue un inconvénient majeur pour les systèmes d'information statistique actuels, car l'établissement manuel de la liste des changements observés dans toute une nomenclature est coûteuse en temps. D'autres approches telles que [24] et [13] consistent à développer des algorithmes et programmes afin de *détecter* les changements entre deux versions, au lieu de les retranscrire à partir d'une liste préétablie. Détecter un changement entre deux UT puis le décrire sémantiquement nécessite de traiter la question de l'identité des UT. D'une part, pour qu'un changement soit décrété, il faut définir quelles sont les variations à observer pour conclure à un changement. Ensuite, selon ses variations, une seconde décision doit être prise concernant l'impact de ce changement. En effet, un changement peut être considéré comme suffisamment important en regard de l'identité d'une UT pour que soit questionnée la continuité de l'existence-même de cette UT. Par exemple, une UT, dont le nom ou la géométrie ou les deux sont modifiés, reste-elle la même UT après ces changements ? Il n'y a pas de réponse unique à cette question, car la définition de ce qui constitue l'identité d'une zone géographique varie d'une nomenclature à une autre. Il s'agit donc d'adopter une approche configurable pour répondre aux différents besoins. Des questions en termes de performance des algorithmes sont aussi à considérer puisque, s'agissant de détecter des changements dans des nomenclatures territoriales, les calculs vont impliquer des géométries à comparer.

A partir de ces trois défis, nous avons fait le constat qu'un

7. http://statistics.data.gov.uk/graph/ontology/geography

©AfIA 2020

système paramétrable était à développer pour que des utilisateurs tels que des agences de statistique puissent facilement, et en fonction des caractéristiques des nomenclatures qu'elles gèrent, créer de nouvelles versions de leur TSN, documenter leurs changements, déverser cette connaissance dans le Web LOD et l'exploiter (référencement, requêtes). Dans ce but, nous avons conçu et développé un framework, nommé Theseus présenté dans la partie suivante.

3 Le framework Theseus

3.1 Vue d'ensemble

Theseus [8] est un framework conçu et développé pour gérer l'ensemble du cycle de vie des TSN : de la modélisation des données à leur exploitation dans le LOD. Lors de la conception de ce framework, nous suivons les recommandations du W3C pour la publication de données liées [16] et l'approche de [27] pour la publication de données gouvernementales sous la forme de données liées. La Figure 1 illustre les cas d'utilisation auxquels Theseus permet de répondre [2].

Ce framework automatise la publication dans le LOD de toute TSN et de ses différentes versions, la détection des changements qui impactent leurs unités et la publication de ces changements dans le LOD. Il encapsule deux ontologies que nous avons conçues afin de décrire les TSN et leurs évolutions dans le temps : les ontologies TSN-Ontology et TSN-Change Ontology (voir Section 4). Il encapsule également une implémentation, appelée *TSN Semantic Matching Algorithm* [3], de l'algorithme de [24] qui détecte et décrit les similitudes et changements entre deux versions consécutives d'une TSN. L'algorithme original a été modifié pour produire des descriptions RDF d'une TSN et de ses changements dans le temps, sur la base des concepts définis dans l'ontologie TSN-Change.

Ce framework sémantique est, à notre connaissance, le premier à assurer la gestion de versions de structures de type TSN. De plus, bien plus que de simplement lier les éléments d'une TSN à travers les versions, Theseus fournit aux utilisateurs des descriptions sémantiques riches des changements des UT au fil du temps.

3.2 Pré-requis et portée

Le Framework Theseus prend en entrée plusieurs fichiers géospatiaux (fichiers au format shapefile ESRI [9]), un pour chaque version de TSN, et les transforme en graphes RDF. Concernant la description des changements, qui opère en partie sur la géométrie des UT, une condition préalable pour des résultats optimaux est que toutes les géométries soient de même niveau de généralisation et dans le même référentiel spatial. Cela a en effet un impact sur la pertinence des résultats comme discuté dans [2].

Dans cet article, nous montrons comment le framework permet de décrire les changements de nature géographique et liés à une nomenclature. Il s'agit donc de changements portant par exemple sur la géométrie, la surface, l'emplacement d'une capitale, l'organisation de la structure spatiale, les informations toponymiques, etc. Plus largement, il est possible de faire évoluer le framework pour permettre la détection de changements liés à d'autres informations, qualifiées de thématiques, qui seraient associées à une UT (telles que son nombre d'habitants, ou tout autre mesure la concernant).

Comme évoqué précédemment la question identitaire est centrale pour qualifier finement le changement. Il est possible de paramétrer au sein du framework une définition de ce qui constitue l'identité des UT de la TSN traitée. Cette définition apparaît sous la forme d'une liste d'attributs d'UT pondérés. Cette définition est établie par un expert de la nomenclature qui détermine d'abord quels attributs doivent être considérés lors de la comparaison des UT de version à version et quelle importance ont ces attributs dans la définition de l'identité des UT, via l'attribution de poids à chacun des attributs de la liste. Ainsi, il est par exemple possible de définir l'identité d'une UT comme étant constituée à 40% de son code dans la nomenclature, à 40% de sa géométrie, à 10% de son nom et à 10% de son unité englobante.

Cette souplesse répond à l'hétérogénéité avec laquelle est définie l'identité dans les nomenclatures. Dans certaines TSN, le nom d'une UT est primordial et si ce nom change, l'UT n'est plus considérée comme la même UT, bien que sa géométrie soit restée la même. Au contraire, dans une autre TSN, bien que le nom ait changé, l'UT est considérée comme "la même UT" car ses frontières sont inchangées. La liste définissant l'identité des UT dans la TSN est un paramètre en entrée d'une fonction de calcul de similarité, implémentée au sein du framework pour calculer automatiquement si l'identité d'une UT est préservée dans la version suivante de la nomenclature.

Deux UT sont considérées comme similaires si la fonction renvoie un score de correspondance supérieur à un seuil global, fixé par l'expert de la nomenclature qui estime le taux de variation admis, permettant de conclure que l'UT persiste malgré ces variations. Cela se traduit alors par un lien de filiation de type *Continuation* entre les deux UT : l'identité de l'UT est conservée dans la version suivante de la nomenclature.

3.3 Architecture globale du framework

Le Framework Theseus est composé de plusieurs modules organisés en quatre niveaux fonctionnels comme illustré par la Figure 2. Les niveaux correspondent aux étapes de la procédure établie par [27] pour la publication de données gouvernementales dans le LOD Cloud :

1. Spécifier et modéliser : au cœur même du Framework Theseus se trouve son modèle de données, composé des ontologies TSN et TSN-Change. Nous avons spécifié ce modèle selon la méthodologie pour la conception d'ontologies exposée dans [1] : un corpus de TSN et d'ontolo-

8. Ce nom a été choisi en référence à la question philosophique identitaire soulevée par le bateau de Thésée reconstruit entièrement au fil des ans, ses planches ayant été cassées et remplacées les unes après les autres, soulevant alors une question relative à l'identité de ce bateau, préservée ou non alors que le bateau est été entièrement reconstruit ?

9. https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf

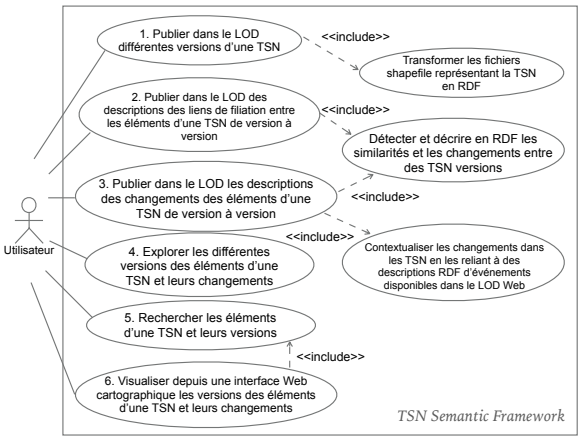


FIGURE 1 – Cas d'utilisation du framework Theseus.

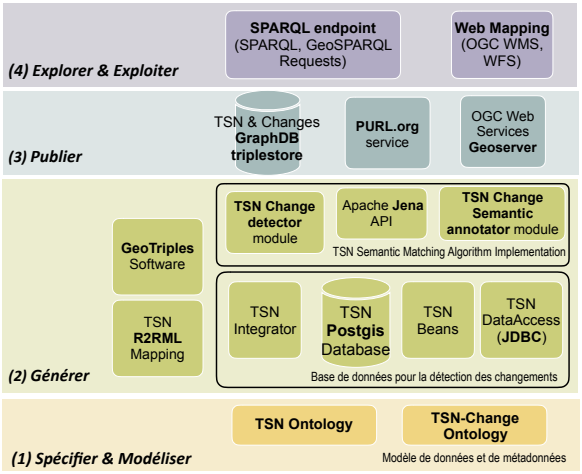


FIGURE 2 – Les modules du framework Theseus.

gies existantes (présenté dans [2]) nous a aidés à déterminer les concepts et le vocabulaire à utiliser pour être proche des désignations utilisées notamment par les agences produisant des statistiques géocodées. Le modèle ontologique TSN/TSN-Change fournit aux modules du framework une représentation formelle des TSN et de leur évolution dans le temps. Il est brièvement mis en regard de l'état de l'art et expliqué dans la Section 4.

2. Générer : pour la génération de données RDF à partir des ontologies TSN et TSN-Change, plusieurs modules logiciels sont utilisés. Le logiciel *Geotriples* vise à transformer les fichiers géospatiaux (shapefile) TSN en triplets RDF, en utilisant les concepts définis par l'ontologie TSN. Les modules *TSN Change Detector* et *TSN Change annotator*, que nous avons développés pour implémenter l'algorithme TSN Semantic Matching, détectent les changements dans les géométries et autres attributs, et décrivent ces changements en RDF via les concepts de l'ontologie TSN-Change. Ce sont notamment ces modules qui ont permis de produire les connaissances relatives à trois nomenclatures territoriales comme expliqué dans la Section 5.

3. Publier : à cette étape, trois logiciels existants sont utilisés : le service purl.org (pour fournir un URI persistant aux données) ; le triplestore GraphDB (pour publier les données RDF créées) ; le logiciel GeoServer (pour publier les géométries des UT liées à leur représentation LOD).

4. Explorer et exploiter : afin de fournir aux utilisateurs des outils pour explorer et exploiter les données publiées, nous avons mis en place divers moteurs de recherche, en utilisant des mécanismes Web standard : un point d'accès SPARQL pour effectuer des requêtes SPARQL et GeoSPARQL sur les données RDF (disponible depuis l'URL http://steamerlod.imag.fr/sparql) ; une interface utilisateur (UI) pour visualiser et interroger les données géospatiales, via des Web services OGC WMS et WFS générés par une instanciation du logiciel GeoServer se connectant à la base de données TSN PostGIS de notre framework.

4 Représenter des nomenclatures territoriales et leurs évolutions

4.1 Etat de l'art

La représentation de la dynamique des territoires nécessite de modéliser les entités et les relations spatiales, spatio-temporelles et de filiation entre elles [11]. La modélisation des entités spatio-temporelles, dont on souhaite capturer l'évolution, repose sur des fondamentaux (voir [2], Chapitre 3) que nous rappelons brièvement car ils constituent un cadre utile à la compréhension de l'approche décrite dans cet article.

Parler d'évolution requiert de déterminer ce qui fait qu'une entité est toujours ou non la même, dans le temps, donc ce qui constitue son identité. La question de l'identité des entités spatio-temporelles est discutée dans les travaux de [15, 13].

Par ailleurs, des typologies de processus spatio-temporels ([7, 11, 24, 10]) introduisent des termes pour la description de changements observables d'entités (comme par exemple, une *fusion* d'unités pour en créer une nouvelle, ou à l'inverse une *scission*, donnant lieu à de nouvelles entités à partir d'une autre). Ces travaux définissent également une sémantique pour caractériser les liens de filiation entre entités, selon qu'il s'agit de relation de *Continuation* (une entité subit un changement mais continue d'être cette même entité) ou de *Dérivation* (la modification d'une entité entraine la perte de son identité, ce n'est alors plus la même entité suite au changement).

Du côté des ontologies de haut niveau, l'ontologie BFO (Basic Formal Ontology [12]) offre un cadre théorique pour la représentation d'entités et de leurs évolutions. BFO se structure en deux sous-ontologies exploitées à ces fins : les ontologies pour *continuants* aussi appelées *SNAP* permettant de représenter des entités qui ont une existence continue et une capacité à supporter (persister de façon identique) à travers le temps même en subissant différentes sortes de changements (par exemple, un personne, la pla-

©AfIA 2020

nète Terre) ; et les ontologies pour *occurrents* aussi appelées *SPAN* permettant de décrire des processus ou des événements (par exemple, un sourire, le passage d'une tempête de pluie sur une forêt) [12].
Les concepts introduits brièvement ci-dessus se retrouvent dans plusieurs modèles de la littérature visant à représenter l'évolution dans le temps d'unités territoriales. Différentes approches s'inscrivent dans le Web sémantique comme nous le faisons. Elles traitent d'espaces géographiques particuliers comme de parcelles de couverture terrestre [13], de régions historiques [17, 18], ou encore de domaines juridictionnels ou régions administratives [20, 19]). Dans [2] un état de l'art de ces différentes approches ontologiques est proposé. Il analyse notamment les travaux dont s'est nourrie notre proposition d'un système basé sur les deux ontologies TSN et TSN-Change. Nous rappelons dans la section suivantes leurs grand principes.

4.2 Les Ontologies TSN et TSN-Change

Notre proposition s'inspire tout d'abord des systèmes de gestion de version utilisés dans le développement logiciel et de la façon dont ces systèmes gèrent les changements [25, 28].
Notre modèle ontologique est, au sens de [12], une Trans-Ontologie SNAP-SPAN. Elle décrit les entités spatiales et leur structure, et dépeint leur vie (ou leur histoire) dans le temps, en gérant à cet effet respectivement les vues SNAP et SPAN.
D'un côté, une TSN et ses composants sont des entités continues (voir Figure 3) : les concepts de l'ontologie TSN *Unit*, *Nomenclature*, *Level* héritent du concept *Continuant* de BFO. De l'autre, tous les composants versionnés d'une TSN et les changements qu'ils subissent sont des entités occurrentes (qui dépendent des objets continus précédemment cités dont elles sont des versions). Ensemble, les composants versionnés et les changements dépeignent la vie des UT au fil du temps. Ces tranches de vie reposent sur des constructions 4D conformément à l'approche perdurantiste de l'ontologie pour les *fluents* [29] aussi exploités dans [13] et dont nous reprenons les principes. Cependant, là où les ontologies pour les *fluents* utilisent le terme "tranche de temps" *Slice*, nous préférons utiliser le terme "version", pour être aussi proches que possible du vocabulaire des statisticiens qui constituent des utilisateurs cibles.
Nous adoptons également l'approche Change Bridges de [18], pour gérer l'union des versions successives. Au sein de ces ponts de changement (que nous appelons *XChange-Bridges*, *X* pour *eXtended*), nous décrivons les différences entre deux versions et caractérisons la nature des changements territoriaux, en utilisant une typologie des changements basée sur les typologies de [7] et [24] que nous étendons afin de décrire des changements de frontières des territoires (par exemple, l'élargissement de l'UE). La structure d'un changement territorial XChange-Bridges est présentée dans la figure 4. Comme [24], nous considérons qu'un changement est rarement isolé et indépendant des autres changements qui se produisent simultanément au sein des autres unités à l'intérieur d'une zone donnée. Sur la base de cette observation, nous créons des graphes de changement territorial à plusieurs niveaux qui décrivent et relient des changements concomitants qui ont un impact sur plusieurs niveaux de la TSN. Ainsi, nous fournissons aux analystes une représentation détaillée d'un changement territorial dans une TSN, via les informations suivantes :
– la connaissance des versions d'UT impactées. Le prédicat *tsnchange :input* (propriété inverse *tsnchange :before*) pointe vers un *TSNComponent* (*LevelVersion* et / ou *UnitVersion*) qui change ; le prédicat *tsn-change :output* pointe vers un *TSNComponent* créé ou modifié après l'événement de changement.
– des liens pour découvrir les conséquences d'un changement. Par exemple, un changement de frontières d'une UT sera relié aux changements affectant ses sous-UT. Le prédicat *tsnchange :lowerChange* (propriété inverse *tsnchange :upperChange*) permet de relier des changements affectant l'élément courant à des changements subis par des sous-élément à l'élément courant.
– une représentation détaillée des causes de ce changement en le reliant à des ressources dans le LOD cloud (événements historiques par exemple). Le prédicat *isCausedBy* indique les raisons contextuelles du changement (à condition que ces informations soient disponibles dans le LOD, dans DBpedia par exemple). Nous recommandons l'utilisation de l'ontologie Linking Open Descriptions of Events (LODE) [26] pour la représentation des événements (historiques) causant les changements des UT.
Pour la représentation des propriétés spatiales et temporelles des éléments d'une TSN (par ex., la géométrie des UT), les ontologies TSN et TSN-Change s'appuient sur les ontologies GeoSPARQL [23] de l'OGC et OWL Time [9] du W3C. Les ontologies TSN et TSN-Change constituent une approche innovante (combinant l'approche Change-Bridge et l'approche des ontologies de fluents) pour la représentation de changements territoriaux dans le LOD via des graphes RDF de changements territoriaux multi-niveau.

5 Production de connaissances reversées dans le Web des Données

Certains jeux de données correspondant à des TSN sont publiés dans le Web LOD au format RDF, tels que, par exemple des versions de la nomenclature européenne NUTS. Néanmoins, ces jeux de données sont, soit des versions isolées, ne reflétant pas les différents stades de l'évolution de la nomenclature (le NUTS-RDF Geovocab [10], ou encore une instanciation de l'ontologie Eionet RAMON [11]), soit, lorsqu'ils décrivent des changements, ces descriptions ne sont que très partielles (Linked NUTS [8]).

Nous avons testé notre approche en l'appliquant à la pro-

10. http://nuts.geovocab.org/
11. http://rdfdata.eionet.europa.eu/ramon/nuts.rdf http://rdfdata.eionet.europa.eu/ramon/nuts2008.rdf http://rdfdata.eionet.europa.eu/ramon/nuts2003.rdf

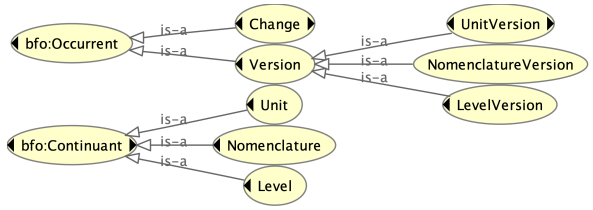


FIGURE 3 – Principaux concepts du Modèle Ontologique TSN hérités de l'ontologie BFO (Concepts Occurrents et Continuants de [12]).

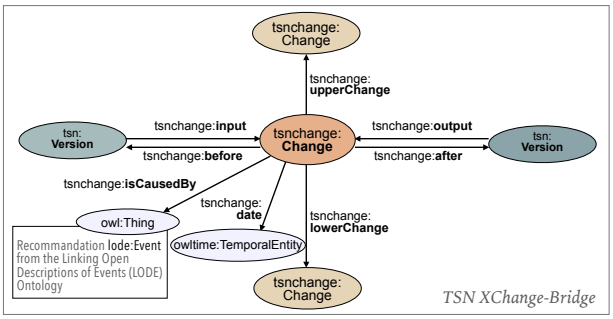


FIGURE 4 – Proposition de structure X-ChangeBridge pour la description de changement territoriaux dans des TSN.

duction de connaissances pour trois TSN :
– La Nomenclature européenne des Unités Territoriales Statistiques (NUTS) (versions 1999, 2003, 2006 et 2010) de l'Institut statistique européen d'Eurostat disponibles dans le Web sous forme de fichiers vectoriels (shapefile ESRI) contenant la liste des UT de chaque version avec leurs attributs (code, nom, niveau, géométrie, ...).
– La nomenclature australienne *Australian Statistical Geography Standard (ASGS)*, élaborée par le Bureau australien des statistiques, qui comprend sept divisions imbriquées du territoire australien, dans les versions 2011 et 2016.
– La nomenclature des unités administratives suisses (SAU) de l'Office fédéral de la statistique, qui décrivent les cantons, districts et communes de Suisse en 2017 et 2018.

Après avoir instancié l'ontologie TSN pour chacune des versions de nomenclatures retenues, nous avons exécuté l'algorithme TSN Semantic Matching Algorithm pour ces différents jeux de données (et donc instancié l'ontologie TSN-Change).

En ce qui concerne la question de l'identité, ces trois nomenclatures utilisent des définitions similaires. Nous avons néanmoins montré dans [2], chapitre 10) l'impact du choix des attributs constituant l'identité d'une UT et des poids associés sur la détection et la caractérisation des changements en simulant des définitions d'identité différentes.

Du point de vue des territoires décrits, les deux jeux de données NUTS et SAU, bien qu'ils soient tous deux basés en Europe, diffèrent par la taille des UT qu'ils contiennent. Les plus grandes UT de la NUTS sont les États membres de l'UE, tandis que les plus grandes UT de SAU sont les cantons, ce qui équivaut aux plus petites régions de la NUTS (niveau 3). Les plus petites unités de SAU sont des communes, des unités beaucoup plus petites et plus nombreuses que dans la NUTS. Nous avons fait le choix du troisième jeu de données australien ASGS parce qu'il couvre une région du monde très différente, un vaste territoire dont les géométries des UT sont composées de 4 000 sommets en moyenne (contre une moyenne de 28 sommets dans la NUTS).

Ces nomenclatures nous ont permis d'évaluer la capacité de notre système Theseus à générer des descriptions de filiations et de changements pour des jeux de données de taille importante et de tester son aptitude à calculer, notamment, des distances surfaciques entre deux géométries très précises (donc composées de nombreux sommets) ou de niveaux de généralisation différents (voir [2], chapitre 10 pour une discussion sur les performances de l'algorithme TSN). Notre programme a ainsi détecté et décrit les similarités et changements entre les versions des trois nomenclatures. Ces connaissances nouvelles ont été versées dans le LOD. Le triplestore Theseus compte 156 162 triplets pour les 4 versions traitées de la NUTS (http://purl.org/steamer/nuts), 76 504 pour les 2 versions de SAU (http://purl.org/steamer/sau), et 89 974 triplets pour les 2 versions de la nomenclature australienne ASGS (http://purl.org/steamer/asgs).

Matching of the versions	SAU 2017 - 2018
Number of Feature Change	336
Number of GeometryChange	65
Number of NameChange	0
Number of IdentifierChange	30
Number of SubUnitChange	19
Number of SuperUnitChange	7
Number of Structure Change	25
Number of Split	0
Number of Merge	14
Number of Redistribution	1
Number of IdentificationRestructuration	6
Total Number of Change	361

FIGURE 5 – Nombre de changements détectés entre les deux versions 2017 et 2018 de SAU

A titre d'exemple, la Figure 5 donne le nombre de changements détectés entre les deux versions 2017 et 2018 de la nomenclature SAU. Notre algorithme détecte automatiquement tous les changements recensés dans la liste officielle qui présente 33 "mutations" (numérotées de 3580 à 3622), incluant chacune des changements tels que des fusions d'unités, des modifications de code ou de noms, etc. Pour chacun de ces changements, des descriptions sémantiquement plus riches (grâce à notre typologie des changements) et plus complètes (grâce au chainage multi-niveau des changements) sont fournies ce qui explique les 361 changements décrits. Nous avons confronté nos résultats

©AfIA 2020

à la liste officielle des changements recensés [12] et créé un catalogue confrontant nos résultats aux descriptions textuelles présentes dans la liste officielle [13].

Les graphes RDF créés constituent des catalogues d'UT et de leurs évolutions. Ils améliorent la compréhension des dynamiques territoriales, en fournissant aux statisticiens des descriptions pour comprendre les motivations et l'impact du redécoupage, et les moyens de référencer précisément les territoires pour lesquels ils produisent des données.

6 Exploitation des graphes créés et génération de nouvelles connaissances

Les graphes RDF créés par notre framework, basés sur le modèle ontologique TSN/TSN-Change, réutilisant lui-même GeoSPARQL et OWL Time, fournissent une représentation des relations spatiales, temporelles et de filiation entre les éléments d'une TSN. Ainsi, en utilisant le module SPARQL endpoint de notre framework http://steamerlod.imag.fr/, les utilisateurs peuvent interroger ces trois types de relations.

Nous avons, à titre d'exemples de ce qu'il est possible d'obtenir comme information, défini un ensemble de requêtes SPARQL permettant l'exploration des graphes produits pour les jeux de données NUTS, SAU et ASGS http://purl.org//steamer/tsndoc/resources/tsn_sparql_requests.pdf. Nous illustrons simplement ici par un exemple la capacité offerte par notre approche à produire de la connaissance.

Ainsi, la requête présentée par la figure 6 permet de reconstruire la ligne de vie d'une unité territoriale (ici l'unité ayant pour code ES63 dans la nomenclature NUTS) en parcourant les 4 versions successives de cette nomenclature que nous avons instanciées et pour lesquelles nous avons généré les liens de filiation et documenté les changements. La Figure 7 montre une représentation graphique automatiquement générée à partir du graphe résultat de la requête. Les nœuds rouges de la ligne supérieure représentent les versions successives de l'UT de code ES63 dans la NUTS. Le nœud étiqueté `nuts:V2003_L2_ES64`, représenté en rouge également, est un nœud en sortie du changement de type *extraction*, selon notre terminologie, qui a eu lieu entre les versions 1999 et 2003 de la NUTS. Ce changement a donné lieu à des modifications de la géométrie et du nom de l'UT ES63. Comme le montre cette vue, il s'agit du seul changement qui a affecté l'UT ES63 au cours de sa vie depuis 1999, dénotant une certaine stabilité territoriale pour cette unité (au moins jusqu'à la version NUTS 2010). Cette capacité à reconstituer la ligne de vie de chaque UT dans le temps par une lecture horizontale des graphes, en suivant la même entité à travers le temps, à travers les versions, est complétée par la capacité à parcourir les graphes selon une lecture verticale : nous avons créé d'autres requêtes qui fournissent une représentation de la propagation d'un changement à travers les niveaux de la nomenclature. Un exemple de requête est donné dans [2], page 172), et le résultat associé visible depuis http://purl.org/steamer/nuts_V1999_ES6_change_graph.

En exploitant les données disponibles dans le LOD, il est possible d'enrichir les graphes générés, par exemple en recherchant dans d'autres graphes de connaissances tels que DBPedia ou Wikidata (le versant LOD de Wikipedia) des informations complémentaires (telles que le nom des gouvernants, le nombre d'habitants, voire (et surtout) une explication des changements...) sur les unités territoriales à partir de leur nom. En outre, on constate, dans ces graphes de données encyclopédiques, la quasi absence de représentation ontologique des changements territoriaux au cours du temps. En effet, s'il existe bien une classe DBPedia pour la représentation d'événements (http://dbpedia.org/ontology/Event), les événements décrits sont essentiellement des événements de type bataille militaire ou événement sportif [14]. De fait, lorsque les changements subis par des régions sont décrits, ils ne le sont qu'à travers des champs de texte libre (tels que `dbo:abstract`), donc non structurés et non directement exploitables via des requêtes SPARQL. Ceci milite pour un référencement croisé des graphes de connaissances dédiées à l'évolution des unités territoriales statistiques proposés par notre approche, et des graphes de connaissances plus générales et grand public tels que ceux accessibles via DBPedia.

7 Conclusion et Perspectives

Dans cet article nous avons présenté une solution conceptuelle basée sur deux ontologies (TSN et TSN-Change), et logicielle (le framework Theseus, incluant notamment un algorithme, nommé TSN Semantic Matching Algorithm) pour représenter, dans le Web Sémantique, des connaissances relatives aux évolutions des territoires décrits par des nomenclatures territoriales statistiques. Notre approche est suffisamment générique pour couvrir tous les cas de structure hiérarchique de type TSN. En utilisant notre approche, les agences statistiques peuvent créer des unités spatiales déversables dans le LOD sous la forme de ressources référençables. Cela permet l'association précise de leurs données statistiques aux unités du territoires concernés qui sont désormais disponibles dans toutes les versions de la nomenclature. Des liens de filiation sont établis entre versions et nœuds de changements, contribuant à une meilleure compréhension des dynamiques territoriales. Le modèle intègre enfin le moyen de décrire et relier des changements qui affectent plusieurs niveaux de la TSN pour en donner une vision plus précise et plus complète, selon une approche ascendante ou descendante. Nos descriptions des changements territoriaux sont générées automatiquement grâce à l'algorithme TSN *Semantic Matching Algorithm*, capable de s'adapter aux spécificités des TSN décrites, notamment sur la question de l'identité des unités territoriales.

12. https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/catalogues-banques-donnees/publications.assetdetail.4123244.html
13. http://purl.org/steamer/tsndoc/resources/sau_2017_2018_tsn_change_descriptions.pdf

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX tsnchange: <http://purl.org/net/tsnchange#>
PREFIX tsn: <http://purl.org/net/tsn#>
CONSTRUCT { ?TU_input tsnchange:inputUnitVersion ?change ;
                tsnchange:hasNextVersion ?TU_output  .}
FROM <http://purl.org/steamer/nuts> WHERE{{
    ?TU_input tsnchange:inputUnitVersion ?change .
        ?change   tsnchange:unitVersionAfter ?TU_output .
        ?TU_input tsn:hasIdentifier "ES63".}
UNION {?TU_input tsnchange:hasNextVersion ?TU_output .
    ?TU_input tsn:hasIdentifier "ES63".}}
```

FIGURE 6 – Requête SPARQL retournant la ligne de vie d'une UT, ici l'unité ES63 telle que codifié dans la NUTS

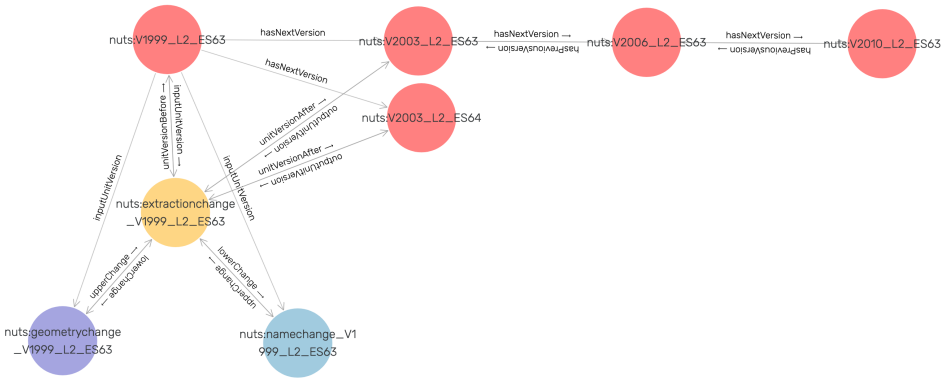


FIGURE 7 – Visualisation de la ligne de vie de l'UT ES63 (résultat de la requête précédente), visible aussi à http://purl.org/steamer/nuts_ES63_lifeline

Parmi les perspectives de ce travail, nous prévoyons d'étudier l'applicabilité de la démarche à d'autres types de nomenclatures utilisées notamment dans la description de zones médico-sociales, de zones trans-frontalières, de zones d'emploi, de zones urbaines. Un des points à explorer concerne la question de la modélisation de hiérarchies différentes des TSN car elles peuvent être non couvrantes (certaines unités peuvent avoir une ou plusieurs unités supérieures à un niveau territorial qui n'est pas immédiatement supérieur), non strictes (une UT peut avoir plusieurs UT englobantes), non hiérarchiques, etc.

Du côté de la restitution des connaissances, nous travaillons à la création d'un outil de visualisation des changements. Des outils logiciels spécialisés dans la gestion de version tels que *GeoGIG* ou le projet *GitHub Inc.* fournissent un moyen de visualiser les différences de géométries, UT par UT [21, 6, 5]. Néanmoins, ils ne permettent pas de regrouper des changements qui affectent plusieurs objets géographiques en même temps (par exemple, une fusion de deux UT), ou d'adjoindre une sémantique donnant le contexte et la nature de ce changement territorial. Notre objectif est de doter le framework Theseus d'un module de géovisualisation des changements intégrant les apports et originalités de l'approche de représentation des connaissances territoriales évolutives basée sur TSN et TSN-Change.

8 Remerciements

Nos remerciements vont à la Région Française Auvergne-Rhône-Alpes ayant financé ce travail [grant number REGION 2015-DRH-0367]. ARC7 : Innovations, mobilités, territoires et dynamiques urbaines.

Références

[1] Bruno Bachimont, Antoine Isaac, and Raphaël Troncy. Semantic commitment for designing ontologies : a proposal. In *International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management*, pages 114–121. Springer, 2002.

[2] Camille Bernard. *Immersing evolving geographic divisions in the semantic Web*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2019.

[3] Camille Bernard, Christine Plumejeaud-Perreau, Marlène Villanova-Oliver, Jérôme Gensel, and Hy Dao. An ontology-based algorithm for managing the evolution of multi-level territorial partitions. In *Proceedings of the 26th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, SIGSPATIAL '18, pages 456–459, New York, NY, USA, 2018. ACM.

[4] Camille Bernard, Marlène Villanova-Oliver, Jérôme Gensel, and Hy Dao. Modeling changes in territorial partitions over time : Ontologies tsn and tsn-

©AfIA 2020

change. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing*, SAC '18, pages 866–875. ACM, 2018.

[5] Boundless. GeoGit in Action : Distributed Versioning Geospatial Data - Boundless, March 2014.

[6] Boundless. Introducing Versio : Version Control for Spatial Data - Boundless, October 2014.

[7] Christophe Claramunt and Marius Thériault. Managing Time in GIS An Event-Oriented Approach. In C. J. van Rijsbergen, James Clifford, and Alexander Tuzhilin, editors, *Recent Advances in Temporal Databases*, pages 23–42. Springer London, London, 1995. DOI : 10.1007/978-1-4471-3033-8_2.

[8] Gianluca Correndo and Nigel Shadbolt. Linked nomenclature of territorial units for statistics. *Semantic Web*, 4(3) :251–256, 2013.

[9] Simon Cox and Chris Little. Time Ontology in OWL - W3C Recommendation 19 October 2017, 2017.

[10] Géraldine Del Mondo, M.A. Rodríguez, C. Claramunt, L. Bravo, and R. Thibaud. Modeling consistency of spatio-temporal graphs. *Data & Knowledge Engineering*, 84 :59–80, March 2013.

[11] Géraldine Del Mondo, John G Stell, Christophe Claramunt, and Rémy Thibaud. A graph model for spatio-temporal evolution. *J. UCS*, 16(11) :1452–1477, 2010.

[12] Pierre Grenon and Barry Smith. SNAP and SPAN : Towards Dynamic Spatial Ontology. *Spatial Cognition & Computation*, 4(1) :69–104, March 2004.

[13] Benjamin Harbelot, Helbert Arenas, and Christophe Cruz. LC3 : A spatio-temporal and semantic model for knowledge discovery from geospatial datasets. *Web Semantics : Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 35 :3–24, 2015.

[14] Daniel Hienert and Francesco Luciano. Extraction of Historical Events from Wikipedia. In Elena Simperl, Barry Norton, Dunja Mladenic, Emanuele Della Valle, Irini Fundulaki, Alexandre Passant, and Raphaël Troncy, editors, *The Semantic Web : ESWC 2012 Satellite Events*, volume 7540, pages 16–28. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.

[15] Kathleen Hornsby and Max J. Egenhofer. Identity-based change : a foundation for spatio-temporal knowledge representation. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(3) :207–224, April 2000.

[16] Bernadette Hyland, Ghislain Auguste Atemezing, and Boris Villazón-Terrazas. Best Practices for Publishing Linked Data, January 2014.

[17] Tomi Kauppinen and Eero Hyvönen. Modeling and reasoning about changes in ontology time series. In *Ontologies*, pages 319–338. Springer, 2007.

[18] Tomi Kauppinen, Jari Väätäinen, and Eero Hyvönen. *Creating and using geospatial ontology time series in a semantic cultural heritage portal*. Springer, 2008.

[19] Javier Lacasta, Francisco Javier Lopez-Pellicer, Aneta Florczyk, Francisco Javier Zarazaga-Soria, and Javier Nogueras-Iso. Population of a spatio-temporal knowledge base for jurisdictional domains. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(9) :1964–1987, September 2014.

[20] Francisco J. Lopez-Pellicer, Javier Lacasta, Aneta Florczyk, Javier Nogueras-Iso, and F. Javier Zarazaga-Soria. An ontology for the representation of spatiotemporal jurisdictional domains in information retrieval systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(4) :579–597, April 2012.

[21] Marco Negretti. Operation-based revision control for geospatial data sets. page 15, 2015.

[22] Stan Openshaw. The modifiable areal unit problem. *Concepts and Techniques in Modern Geography*, 38, 1984.

[23] Matthew Perry and John Herring. OGC GeoSPARQL - A Geographic Query Language for RDF Data. page 75, 2012.

[24] Christine Plumejeaud, Hélène Mathian, Jérôme Gensel, and Claude Grasland. Spatio-temporal analysis of territorial changes from a multi-scale perspective. *International Journal of Geographical Information Science*, 25(10) :1597–1612, 2011.

[25] Timothy Redmond, Michael Smith, Nick Drummond, and Tania Tudorache. Managing Change : An Ontology Version Control System. page 10, 2008.

[26] Ryan Shaw, Raphaël Troncy, and Lynda Hardman. LODE : Linking Open Descriptions of Events. *ASWC*, 9 :153–167, 2009.

[27] Boris Villazón-Terrazas, Luis. M. Vilches-Blázquez, Oscar Corcho, and Asunción Gómez-Pérez. Methodological Guidelines for Publishing Government Linked Data. In David Wood, editor, *Linking Government Data*, pages 27–49. Springer New York, New York, NY, 2011.

[28] Max Völkel and Tudor Groza. SemVersion : an RDF-based ontology versioning system. page 9, March 2012.

[29] Chris Welty, Richard Fikes, and Selene Makarios. A reusable ontology for fluents in OWL. In *FOIS*, volume 150, pages 226–236, 2006.

BEN : Une architecture pour des agents cognitifs, affectifs et sociaux dans la simulation

M. Bourgais[1], P. Taillandier[2], L. Vercouter[1]

[1] Normandie Univ, INSA Rouen, UNIHAVRE, UNIROUEN, LITIS
76000 Rouen, France
[2] MIAT, INRA, 31000 Toulouse, France

Résumé

La simulation sociale en tant qu'outil scientifique nécessite le développement de comportements crédibles pour les agents simulant le comportement d'acteurs humains. Une façon d'améliorer la crédibilité des simulations obtenues est d'intégrer des dimensions cognitive, affective et sociales dans la prise de décision des agents. Pour autant, développer des agents avec ces dimensions peut s'avérer compliqué si l'on veut rester accessible à des chercheurs qui ne sont pas experts en informatique. L'architecture BEN (Behavior with Emotions and Norms) intègre des dimensions affectives et sociales à une prise de décisions basée sur une architecture BDI pour la réalisation de simulations sociales. Cette architecture modulaire s'appuie sur une formalisation des dimensions cognitives, affectives et sociales. BEN est implémenté dans la plateforme de modélisation et de simulation multi-agent GAMA et est ici illustrée sur un cas d'évacuation d'urgence.

Mots-clés

Simulation sociales, cognition, émotion, personnalité, normes

Abstract

Social simulation as a scientific tool requires the development of credible behaviours for agents simulating the behaviour of human actors. One way to improve the credibility of the simulations obtained is to integrate cognitive, emotional and social dimensions into agents' decision-making. However, developing agents with these dimensions can be complicated for social science researchers who do not have expert knowledge of computer programming. The BEN architecture (Behavior with Emotions and Norms) integrates emotional and social dimensions into decision making based on a BDI architecture for an application in the field of social simulations. This modular architecture is based on a formalization of the cognitive, affective and social dimensions. BEN is implemented in the GAMA multi-agent modeling and simulation platform and used on an example case of nightclub evacuation.

Keywords

Social Simulations, cognition, emotion, personnality, norms

1 Introduction

Les simulations à base d'agents sont utilisées pour étudier les systèmes complexes impliquant des acteurs humains ; il est désormais question, dans ce cas, de simulations sociales [18]. Le but principal est alors de reproduire par simulation des situations réelles où un très grand nombre d'acteurs humains prennent des décisions, influençant ainsi l'évolution globale du système. De cette façon, la situation reproduite peut être étudiée dans un cadre contrôlé.

Le défi consiste alors à développer un comportement de prise de décision crédible pour les agents simulant des acteurs humains. Pour se faire, il est nécessaire d'intégrer des processus cognitifs, affectifs et sociaux dans la prise de décision des agents [39], un point de vue soutenu par le principe EROS (Enhancing Realism of Simulation) [21] qui favorise des simulations à la modélisation proche du cas réel, contrairement aux principes KISS (Keep It Simple, Stupid) [6] et KIDS (Keep It Descriptive, Stupid) [17] qui favorisent des modèles simples, facilement compréhensibles.

Dans cette optique, l'architecture BEN (Behavior with Emotions and Norms), proposée dans cet article et s'appuyant sur de précédents travaux [9], intègre la cognition, les émotions, la personnalité, la contagion émotionnelle, les relations sociales et la définition d'un système normatif pour la prise de décisions en simulation sociale. Ces dimensions cognitives, affectives et sociales sont formalisées dans un même cadre pour pouvoir interagir entre-elles, tout en étant suffisamment indépendantes pour ne pas obliger l'utilisateur à toutes les utiliser si ce n'est pas nécessaire.

BEN a été implémenté dans la plateforme de modélisation et de simulation multi-agent GAMA [42], réputée pour être accessible à un public non expert en programmation informatique [34][26]. L'utilisation de BEN est illustrée par la simulation d'un cas réel d'évacuation de boîte de nuit pour montrer comment le comportement des agents peut être exprimé de manière crédible et explicable dans les termes de la psychologie naïve [29].

La section 2 de l'article propose un état de l'art sur la prise de décision en simulation sociale, la section 3 expose le formalisme utilisé pour définir les notions liées aux dimensions cognitives, affectives et sociales utilisée dans l'architecture BEN, qui est présentée dans la section 4. La section 5 présente une mise en application de BEN sur le cas

©AfIA 2020

d'étude de l'évacuation du Kiss Nightclub au Brésil et la section 6 conclut l'article.

2 État de l'art

Le développement d'agents crédibles est un élément clé pour la simulation sociale qui a été étudié précédemment. Plusieurs travaux ont donc été mené pour créer des architectures agent en s'appuyant sur différentes théories issue de travaux en psychologie ou en sociologie.
Dans le contexte de la simulation sociale, l'ajout de cognition à la prise de décision est une première étape permettant aux agents de prendre des décisions plus complexes que la simple réponse réflexive à une perception [1][7]. Ainsi, la mise en place d'un moteur cognitif doit être la base d'une architecture pour la simulation sociale.

2.1 Prise de décision cognitive

Parmi les différentes plates-formes multi-agents [24], certaines comme JACK [20] ou Jadex [33] implémentent le paradigme BDI (Belief Desire Intention) [12], donnant un comportement cognitif aux agents, en s'appuyant sur un formalisme basé sur la logique modale [15]. Pour autant, ces plates-formes ne sont pas adaptées à la simulation de milliers d'agents.
Pour contourner ce problème, Sing et Padgham [37] proposent de connecter une plate-forme de simulation à un framework BDI existant (comme JACK ou Jadex) et, sur cette même idée [32], la plate-forme Matsim [8] a été liée au framework BDI GORITE [35]. Ces travaux exigent un haut niveau en informatique, ce qui rend difficile leur utilisation par des modélisateurs ayant de faibles compétences en programmation.
D'autre part, les plates-formes de simulation comme Netlogo [46] ou GAMA [42] sont des logiciels dédiés avec leur propre langage de programmation, leur propre interface et leur propre interpréteur et compilateur. Par défaut, ces plates-formes ne proposent pas d'architecture particulière pour le comportement de l'agent : les modélisateurs doivent définir ces comportements avec des règles "if-then-else". Cependant, il existe des plugins, pour NetLogo [36] et pour GAMA [41], pour utiliser des architectures agents basées sur le paradigme BDI afin de créer des simulations sociales avec un comportement plus complexe et plus crédible. Ils fournissent tous deux aux agents des concepts de haut niveau tels que les croyances et les intentions et le plugin de GAMA va au-delà, offrant un moteur de raisonnement, conduisant les agents à prendre des décisions basées sur la perception de son environnement.

2.2 Prise de décision affective et sociale

Une autre approche consiste à axer le raisonnement des agents autour de leurs émotions. Par exemple, EMA [19] est basé sur la théorie de l'évaluation cognitive des émotions [4] développée par Smith et Lazarus [38] tandis que DETT [45] est basé sur la théorie OCC [31] des émotions. Ces deux systèmes créent des émotions en évaluant les perceptions de l'environnement et en déduisant ensuite un comportement de l'état émotionnel de l'agent.
eBDI [22] s'appuie également sur la théorie OCC mais utilise une architecture BDI pour prendre des décisions. Cela signifie que les émotions sont créées par les perceptions et agissent ensuite sur les croyances, les désirs et les intentions. Enfin, ces états mentaux modifiés sont utilisés pour prendre une décision. Cette proposition n'a pas encore été intégrée à une plate-forme de simulation.
Enfin, certains chercheurs proposent de s'appuyer sur le contexte social de l'agent pour décrire son comportement : cela se fait avec des architectures normatives. EMIL-A [3] et NoA [23] décrivent le comportement de l'agent avec des normes, obligations et sanctions sociales. En d'autres termes, un agent prend une décision en fonction de l'état du système normatif au niveau d'une société d'agents.
BOID [13] et BRIDGE [16] proposent de combiner une architecture normative avec un paradigme BDI, conduisant l'agent à prendre en compte le système social dans sa décision. Cependant, contrairement à EMIL-A et NoA, l'agent a des croyances, des désirs et des intentions personnels, créant un comportement plus hétérogène et crédible. Mais, à notre connaissance, ces architectures n'ont pas été mises en œuvre en plate-forme de simulation pour traiter avec des milliers d'acteurs simulés.

2.3 Synthèse

Pour respecter le principe EROS, les modélisateurs ont besoin d'architectures proposant plusieurs dimensions psychologiques et sociales. Actuellement, comme le montre cette section, il n'existe pas d'architecture unique proposant à la fois des dimensions cognitives, affectives et sociales pour la simulation. Les seules tentatives, à notre connaissance, de combiner plus de deux traits ont utilisé la notion de personnalité, associant la cognition avec les émotions et la contagion émotionnelle [25] ou de combiner la cognition avec les émotions et les relations sociales [30].
Dans cet article, nous abordons cette question en proposant BEN (Behavior with Emotions and Norms), une architecture d'agent mettant en scène la cognition, les émotions, la personnalité, la contagion émotionnelle, les relations sociales et la gestion des normes. Pour le mettre en œuvre, nous avons basé notre travail sur l'architecture cognitive existante fournie par GAMA. Pour faciliter l'utilisation de BEN, nous l'avons implémenté en utilisant les principes de GAMA qui a prouvé sa facilité d'utilisation [26][34] grâce à son langage de modélisation GAML que nous avons étendu.

3 Formalisation des dimensions cognitives, affectives et sociales

L'architecture BEN se compose des notions telles que la cognition, la personnalité, les émotions, la contagion émotionnelle, les normes et les relations sociales pour décrire le comportement des agents dans le contexte d'une simulation sociale. Chacun de ces composants est représenté à l'aide d'un formalisme unifié pour assurer leur compatibilité. Ce formalisme est discuté plus en détails dans [10] et

présenté dans des travaux précédents [11].
La partie principale de BEN est la cognition de l'agent. Un agent cognitif peut raisonner sur un ensemble de perceptions de son environnement et sur un ensemble de connaissances précédemment acquises. Dans BEN, cet environnement est représenté par le concept de prédicats. **P_j(v)** représente un prédicat de façon générale avec les éléments suivants :

- **P** : l'identifiant du prédicat.
- **j** : l'agent causant l'information.
- **v** : l'ensemble de valeurs stockées dans le prédicat.

En fonction du contexte, cette représentation générale peut évoluer. **P_j** représente une information sans valeur particulière attachée, **P(v)** représente une information qui n'est pas causée par un agent en particulier et **P** représente une information sans valeur particulière et sans qu'un agent en soit la cause.
Par exemple, l'information qu'il y a un incendie dans l'environnement est représentée par le prédicat **fire**. Si ce feu est causé par l'agent *Bob*, le prédicat devient **fire**$_{Bob}$. Enfin, si cet incendie causé par Bob est à un endroit (x ;y), cette information est représentée par **fire**$_{Bob}$**(location : :(x,y))**.

3.1 Formalisme des notions cognitives

Avec BEN, un agent dispose d'états mentaux cognitifs sur lesquels il effectue son raisonnement. **M_i(PMEm,Val,Li)** représente un état mental de façon générale de l'agent *i* avec les éléments suivants :

- **M** : la modalité indiquant le type de l'état mental cognitif (par exemple une croyance).
- **PMEm** : l'objet sur lequel porte l'état mental cognitif, pouvant être un prédicat, un autre état mental cognitif ou une émotion.
- **Val** : une valeur réelle dont la signification dépend de la modalité. Permet de comparer deux états mentaux cognitifs de même modalité.
- **Li** : une durée de vie indiquant le temps que mettra l'agent pour oublier cet état mental.

Dans BEN, la cognition s'appuie sur le modèle BDI [12] qui indique que l'agent possède des croyances, des désirs et des intentions. Pour lier la cognition avec les dimensions affectives et sociales, l'architecture définit 6 modalités d'états mentaux cognitifs : **Belief$_i$(P)**, **Uncertainty$_i$(P)**, **Desire$_i$(P)**, **Intention$_i$(P)**, **Ideal$_i$(P)** et **Obligation$_i$(P)**.
Pour agir sur le monde selon ses intentions, un agent a besoin d'un plan d'actions, c'est-à-dire un ensemble de comportements exécutés dans un certain contexte en réponse à une intention.

3.2 Formalisme des dimensions affectives

La définition de traits de personnalité dans BEN suit le modèle OCEAN (Ouverture, Conscience, Extraversion, Agreabilité, Neurotisme) [27]. La personnalité d'un agent est représentée par un vecteur de 5 valeurs réelles comprises entre 0 et 1, avec la valeur neutre placée à 0.5.
Les émotions dans BEN sont basées sur la théorie OCC [31] ; les émotions sont des réponses valuées à l'évaluation cognitive d'une situation. **Em$_i$(P,Ag,I,De)** représente une émotion possédée par l'agent *i* avec les éléments suivants :

- **Em** : le nom de l'émotion.
- **P** : le prédicat à propos duquel l'émotion est ressentie.
- **Ag** : l'agent responsable de l'émotion.
- **I** : l'intensité de l'émotion. Cette valeur est positive ou nulle.
- **De** : la valeur de décroissance de l'intensité émotionnelle.

Cette représentation permet à l'agent d'avoir plusieurs émotions en même temps, toutes sur des prédicats différents. Aussi, cette représentation peut être adaptée, avec **Em$_i$(P,Ag)** représentant une émotion sans intensité particulière ni valeur de déclin.

3.3 Formalisme des dimensions sociales

Chaque agent possède relations sociales avec d'autres agents simulant des acteurs humains en s'appuyant le travail de Svennevig [40] qui identifie quatre dimensions minimales pour décrire une relation sociale entre deux personnes. Dans BEN, la confiance est ajoutée comme cinquième dimension sociale. **R$_{i,j}$(L,D,S,F,T)** représente une relation sociale, de l'agent *i* vers agent j, avec les éléments suivants :

- **R** : l'identifiant de la relation sociale.
- **L** : une valeur réelle entre -1 et 1 représentant le degré d'appréciation avec l'agent concerné par le lien. Une valeur de -1 indique que l'agent j est détesté, une valeur de 1 indique que l'agent j est adoré.
- **D** : une valeur réelle entre -1 et 1 représentant le degré de pouvoir exercé sur l'agent concerné par le lien. Une valeur de -1 indique que l'agent j domine la relation, une valeur de 1 indique que l'agent j est dominé dans la relation.
- **S** : une valeur réelle entre 0 et 1 représentant le degré de solidarité avec l'agent concerné par le lien. Une valeur de 0 indique qu'il n'y a aucune solidarité envers l'agent j, une valeur de 1 indique une solidarité totale avec l'agent j.
- **F** : une valeur réelle entre 0 et 1 représentant le degré de familiarité avec l'agent concerné par le lien. Une valeur de 0 indique qu'il n'y a aucune familiarité avec l'agent j, une valeur de 1 indique qu'il y a une familiarité totale avec l'agent j.
- **T** : une valeur réelle entre -1 et 1 représentant le degré de confiance avec l'agent concerné. Une valeur de -1 indique que l'agent i n'a aucune confiance envers l'agent j, une valeur de 1 indique une totale confiance envers l'agent j.

Pour agir sur l'environnement selon un système normatif, l'agent suit des normes, représentant dans BEN des séquences d'instructions auxquelles l'agent peut désobéir.

4 BEN : une architecture cognitive, affective et sociale

L'architecture BEN, représentée par la figure 1, est la principale contribution de cet article. Dans cette section,

©AfIA 2020

nous expliquons comment un agent utilisant BEN prend une décision avec la cognition, les émotions, la contagion émotionnelle, la personnalité, les relations sociales et les normes. Avec ces dimensions, un agent simulant un acteur peut réagir à un changement dans l'environnement et expliquer son comportement avec des concepts de haut niveau dans le cadre d'une simulation sociale. Par manque de place, le fonctionnement de l'architecture BEN est ici résumé ; une présentation détaillée est disponible dans [10].

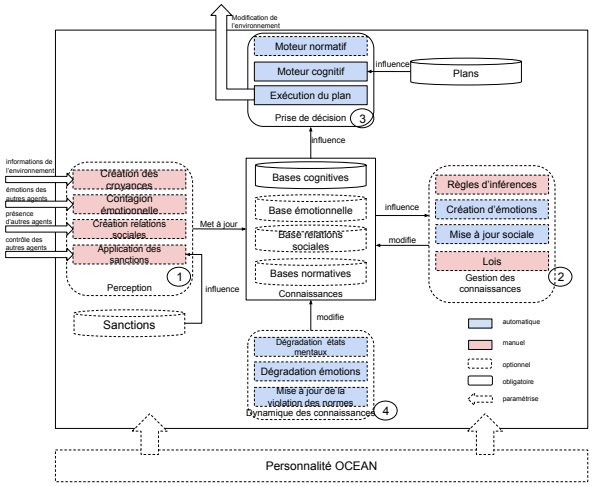


FIGURE 1 – L'architecture BEN

4.1 Présentation globale de l'architecture

BEN est composé de quatre modules, chacun abritant plusieurs processus obligatoires (en lignes pleines) ou optionnels (en pointillés), gérés automatiquement (en bleu) ou devant être définis par l'utilisateur (en rose). Ces modules communiquent avec les bases de connaissances de l'agent et sont reliés à la personnalité de l'agent décrite par les cinq dimensions du modèle OCEAN [27].

Pour faciliter l'utilisation de BEN, ces traits de personnalité sont le seul paramètre auquel un modélisateur peut accéder ; ils sont utilisés pour calculer tous les autres paramètres nécessaires aux différents processus : probabilité de supprimer un plan ou une intention non réalisée dans la partie cognitive, charisme et réceptivité émotionnelle pour la contagion émotionnelle, intensité initiale et déclin des émotions créées par le moteur émotionnel, actualisation des valeurs des relations sociales obtenues avec le moteur social, et valeur d'obéissance utilisée par le moteur normatif.

La connaissance de l'agent est composée de bases cognitives, contenant des états mentaux cognitifs formalisés en section 3, une base émotionnelle, une base sociale et une base de normes. Cette connaissance peut évoluer à travers la simulation, ce qui n'est pas le cas des plans pour le moteur cognitif et des sanctions pour le moteur normatif, qui sont stockés dans des bases dédiées, hors de la connaissance de l'agent, comme le montre la figure 1.

4.2 Fonctionnement de l'architecture pour la prise de décision

Sur la figure 1, chaque module possède un numéro, indiquant son ordre d'exécution. Chaque fois qu'un agent est activé, il perçoit l'environnement, il gère ses connaissances en fonction des nouvelles perceptions, il prend une décision et enfin il donne une dynamique temporelle à ses connaissances.

4.2.1 Perceptions

La première étape de BEN consiste à percevoir l'environnement. Cette étape permet de faire le lien entre l'environnement et les connaissances de l'agent, en créant des croyances et des incertitudes sur les informations de l'environnement, en définissant la contagion émotionnelle avec d'autres agents ou en créant de nouvelles relations sociales. Ces trois processus sont définis manuellement, ce qui signifie que le modélisateur doit indiquer quelle information est transformée en prédicat et quel état mental cognitif est construit sur ce prédicat, quelle émotion est soumise à une contagion émotionnelle et quelle est la valeur initiale pour chaque dimension d'une nouvelle relation sociale. Le dernier processus de ce module permet à un agent d'exécuter des sanctions sur les autres agents perçus.

4.2.2 Gestion des connaissances

La deuxième étape de BEN permet à l'agent de gérer ses connaissances après la perception et avant la prise de décision. Dans cette phase, les modélisateurs peuvent définir des règles d'inférence, qui permettent de créer ou de supprimer tout état mental cognitif en fonction de l'état réel des connaissances de l'agent. Sur le même modèle, des lois peuvent être définies pour créer des obligations si la valeur d'obéissance de l'agent, calculée à partir de sa personnalité, est suffisamment grande.

La gestion des connaissance passe aussi par l'utilisation d'un moteur émotionnel et d'un moteur de relations sociales. Ils permettent, respectivement, de créer automatiquement des émotions en fonction des connaissances de l'agent, et de mettre à jour les relations sociales avec les autres agents sans que l'utilisateur n'ait besoin d'intervenir dans ces processus.

4.2.3 Prise de décision

La troisième étape de BEN est la seule partie obligatoire. Ce module permet à l'agent de prendre des décisions puis d'exécuter une action, le tout au travers d'un moteur cognitif sur lequel un moteur normatif peut être ajouté. Il s'exécute automatiquement, sans intervention du modeleur.

L'architecture cognitive est basée sur le modèle BDI [12] : l'agent a des intentions basées sur ses désirs et une des intentions comme intention courante. Le modélisateur définit des plans d'action qui indiquent ce qu'un agent doit faire pour une intention courante particulière dans un contexte donné ; le plan choisi est conservé comme le plan courant. Le moteur normatif fonctionne de la même manière que le moteur cognitif, avec des obligations comme désirs et des normes comme plans. La seule différence est une valeur

d'obéissance qui peut être ajoutée aux normes et obligations.

4.2.4 Dynamisme temporel

La dernière partie de l'architecture donne une dynamique temporelle au comportement de l'agent. Ceci se fait automatiquement en dégradant les états mentaux cognitifs et les émotions et en mettant à jour l'état de chaque norme.

5 Application à l'évacuation d'une boite de nuit

L'architecture définie dans la section 4 a été implémentée dans la plateforme de modélisation et de simulation GAMA [42], étendant le langage de programmation GAML pour aider les modélisateurs à définir des agents sociaux aux dimensions cognitives, affectives et sociales. Cette implémentation est utilisée dans le cas d'exemple d'une évacuation d'une boîte de nuit en feu détaillé dans cette section.

5.1 Présentation du cas d'exemple

Le 27 janvier 2013, le Kiss Nightclub de Santa Maria, Rio Grande do Sul (Brésil), a pris feu à la fin d'un spectacle dirigé par un groupe de musique local. Le plafond s'est enflammé à cause des feux d'artifice, émettant des fumées toxiques qui ont causé la mort de 242 personnes. L'enquête officielle a mis en lumière différents facteurs qui ont aggravé la tragédie : il y avait entre 1200 et 1400 personnes dans le bâtiment qui pouvaient normalement accueillir 641 personnes, il n'y avait qu'une seule porte d'entrée/sortie, il n'y avait ni détecteur de fumée ni alarme et enfin, les panneaux de sortie montraient la direction des toilettes. L'enquête montre également que la plupart des décès sont dus à l'asphyxie, près des toilettes [5].

Notre but ici est de reproduire le comportement des personnes prises dans cette tragédie de la manière la plus crédible possible. En d'autres termes, nous utilisons l'architecture BEN pour créer les comportements des agents afin d'obtenir un résultat aussi proche que possible de ce qui s'est passé dans cette boîte de nuit pendant l'incendie.

5.2 Modélisation du cas avec BEN

Les connaissances initiales de l'agent, au lancement de la simulation, peuvent être divisées en trois types : les croyances sur le monde, les désirs initiaux et les relations sociales. De plus, chaque agent dispose d'une personnalité décrite par une valeur dans chacune des dimensions du modèle OCEAN. Quelques exemples de ces connaissances initiales ainsi que leur formalisation avec BEN sont données ci-dessous :

- Une croyance sur la localisation exacte de la porte de sortie avec une durée de vie fixée -> $Belief_i(exitDoor, lifetime1)$
- Le désir qu'il n'y ait pas de feu -> $Desire_i(notFire, 1.0)$
- Une relation d'amitié avec un agent j -> $R_{i,j}(L, D, S, F, T)$

Le premier processus de BEN est la perception de l'environnement, qui sera réduite en fonction de la fumée entourant l'agent. Il faut donc indiquer ce que l'agent perçoit et comment ces perceptions influencent ses connaissances, ce qui est montré dans un cas pratique par le bloc de code 1 :

- Percevoir la porte de sortie met à jour les croyances liées à celle-ci.
- Percevoir le feu ajoute la croyance qu'il y a un feu.
- Percevoir la fumée ajoute une croyance liée au niveau de fumée détectée.
- Percevoir les autres agents permet la création de relations sociales avec eux. Une contagion émotionnelle portant sur la peur de l'incendie est aussi définie.

```
perceive target:exit
  in:perceived_area{
      focus id:"exitLocation"
          lifetime: 20;
}

perceive target:fire
  in:perceived_area{
    focus id:"fire";
}
```

Code 1: Exemple de définition de perceptions dans le cas du Kiss Nightclub

Une fois que les connaissances de l'agent sont à jour avec son environnement, elles vont réagir à ce qui a été perçu. Cela se fait avec la définition des règles d'inférence et des lois, dont le bloc de code 2 montre une implémentation pratique :

- Une loi crée l'obligation de suivre les panneaux de sortie s'il y a un doute raisonnable (modélisé par la valeur d'obéissance attachée à la loi et la quantité de fumée perçue) de catastrophe.
- Une règle d'inférence ajoute le désir de fuir si l'agent a la croyance qu'il y a un incendie.
- Une règle d'inférence ajoute une incertitude qu'il y a un incendie si l'agent a la croyance qu'il y a de la fumée.
- Une règle d'inférence ajoute le désir de fuir si l'agent a une émotion de peur portant sur l'incendie si son intensité est supérieure à un seuil donné.

```
rule belief: fireSaw
     new_desire:fleeing
     remove_intention:wandering
     remove_desire:wandering ;
rule belief: smokeSaw
     new_uncertainty:fireSaw
     strength: smokeQuantity/100
     when: not has_belief(fireSaw);
```

Code 2: Exemple de définition de lois et de règles d'inférence dans le cas du Kiss Nightclub

©AfIA 2020

Avec l'exécution des règles d'inférence et des lois, chaque agent crée des émotions par le biais du moteur émotionnel. Dans ce cas d'exemple, la présence d'une incertitude sur l'incendie (ajoutée par la règle d'inférence concernant la croyance sur la fumée) avec le désir initial qu'il n'y a pas de feu produit une émotion de peur, dont l'intensité est calculée en fonction de la quantité de fumée perçue.

Une fois que l'agent a le désir de fuir (parce qu'il a perçu l'incendie ou sa peur d'un incendie est d'une intensité assez grande), il a besoin de plans d'action et de normes qui lui indiquent comment agir. La définition de quelques plans d'action et normes pour répondre à l'intention de fuir est donnée ci-dessous, avec le contexte de déclenchement et le résultat de l'action :

- l'agent a une bonne visibilité et possède une croyance sur la position exacte de la sortie **->** un plan indique à l'agent de courir vers la porte de sortie en suivant le plus court chemin.
- l'agent a une bonne visibilité mais aucune croyance sur l'emplacement de la sortie **->** une norme amène l'agent à suivre les agents autour de lui en qui il a confiance.
- l'agent a une mauvaise visibilité et possède l'obligation de suivre les panneaux de sortie **->** une norme indique à l'agent de suivre les panneaux de sortie, ce qui l'amène dans ce cas vers les toilettes.
- l'agent a une mauvaise visibilité et la croyance que les panneaux de sortie sont erronés **->** un plan amène l'agent à se déplacer au hasard.
- l'agent perçoit un ami perdu dans la fumée **->** un plan indique à l'agent d'aller trouver son ami pour l'amener vers la sortie.

Au fur et à mesure que la situation évolue au cours de la simulation, un agent peut modifier son plan en cours. Par exemple, si un agent quitte la zone enfumée alors qu'il fuit vers les toilettes, il peut percevoir la sortie et s'y rendre au lieu de continuer à suivre les panneaux.

5.3 Résultats et discussion

Au début de la simulation, les agents sont placés au hasard dans le Kiss Nightclub recréé avec une personnalité initialisée par une distribution gaussienne centrée sur 0,5 et avec un écart type de 0,12 pour chaque dimension. La propagation de la fumée est modélisée selon un rapport officiel du gouvernement français [14] ; un agent est considéré mort après 50 secondes dans la fumée dense.

La figure 2 montre un résultat visuel de la simulation où les lignes noires représentent les murs de la discothèque, les carrés gris représentent la fumée et les triangles représentent les acteurs simulés, la couleur de chaque triangle indique le plan suivi. Une vidéo de la simulation ainsi que le modèle complet se trouvent à l'adresse suivante :
https ://github.com/mathieuBourgais/ExempleThese

Comme le nombre exact de personnes dans la boîte de nuit n'est pas connu, nous avons testé trois cas : 1200 personnes au début, 1300 personnes au début et 1400 personnes au début. Les résultats statistiques obtenus dans le tableau 1 sont calculés à partir de 10 simulations pour chaque scénario.

FIGURE 2 – Simulation de l'évacuation du Kiss Nightclub

TABLE 1 – Nombre d'agents décédés dans la simulation de l'incendie du Kiss Nightclub

Nombre d'agents	1200	1300	1400
moyenne	230.2	237.7	249.4
écart type	20.1	15.6	32.6

Les résultats statistiques indiquent que notre modèle est bien calibré pour reproduire le cas réel où 242 personnes sont décédées. Cependant, le principal résultat concerne l'explicabilité et l'expressivité du modèle. La vidéo de la simulation montre différents types de comportement qui peuvent être exprimés avec des concepts de haut niveau grâce à BEN.

Par exemple, beaucoup d'agents quittent le club au début de la simulation parce qu'ils ont directement perçu l'incendie. Ce comportement semble correspondre à un cas réel où les gens qui voient un incendie dans une boîte de nuit s'enfuient. Par contre, les agents qui ne perçoivent pas la fumée ou l'incendie fuient plus tard. Pendant ce temps, ils ont oublié l'emplacement de la sortie et ont dû suivre les panneaux de sortie officiels, ce qui les a conduit, dans ce cas, aux toilettes.

Grâce à l'architecture BEN, nous avons pu traduire un comportement exprimé en langage commun en un comportement réel pour des acteurs simulés. A tout moment, il est possible de mettre en pause la simulation pour inspecter le comportement d'un agent ; ce comportement sera exprimé en termes d'états mentaux cognitifs, d'émotions, de relations sociales, de normes et de plans qui sont, de notre point de vue, plus faciles à lire et à comprendre que des équations abstraites. Ce point est soutenu par le fait que le BEN et sa partie cognitive reposent sur la psychologie populaire [29].

6 Conclusion

Cet article présente BEN, une architecture comportementale et modulaire pour la prise de décision d'agents sociaux dans la simulation. Cette architecture s'appuie sur une formalisation des notions de cognition, d'émotions, de personnalité, de contagion émotionnelle, de relations sociales et de systèmes normatifs leur permettant d'interagir entre elles dans un processus de prise de décision amenant à des résultats crédibles en simulation de situations impliquant des acteurs humains. Cette architecture a été implémentée dans la plateforme de modélisation et de simulation multi-agent GAMA [42] et mise en oeuvre sur le cas d'étude de l'évacuation d'une discothèque en feu au Brésil, permettant de reproduire de façon crédible une situation réelle, tout en utilisant les mêmes composants de haut niveau utilisés pour décrire le comportement d'acteurs humains.
BEN a déjà été utilisé, tout ou en partie, sur d'autres projets par d'autres chercheurs : l'étude de l'évacuation d'une discothèque aux États-Unis [44], l'étude d'évacuation de zones ouvertes lors d'incendies de brousse en Australe [2], l'étude de comportements de foyers sur leur consommation d'énergie [28] ou encore l'étude de fermiers vietnamiens dans le delta du Mekong [43]. Ces différents travaux montrent que la modularité de BEN lui permet de s'adapter à différents cas d'étude et d'être utilisé par des chercheurs spécialistes de leur domaine n'ayant pas pour autant des compétences expertes en programmation.

Références

[1] Carole Adam and Benoit Gaudou. Bdi agents in social simulations : a survey. *The Knowledge Engineering Review*, 2016.

[2] Carole Adam, Patrick Taillandier, Julie Dugdale, and Benoit Gaudou. Bdi vs fsm agents in social simulations for raising awareness in disasters : A case study in melbourne bushfires. *International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management (IJISCRAM)*, 9(1) :27–44, 2017.

[3] Giulia Andrighetto, Rosaria Conte, Paolo Turrini, and Mario Paolucci. Emergence in the loop : Simulating the two way dynamics of norm innovation. In *Dagstuhl Seminar Proceedings*. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2007.

[4] Magda B Arnold. *Emotion and personality.* Columbia University Press, 1960.

[5] B Atiyeh. Brazilian kiss nightclub disaster. *Annals of burns and fire disasters*, 26(1) :3, 2013.

[6] Robert Axelrod. Advancing the art of simulation in the social sciences. In *Simulating social phenomena*, pages 21–40. Springer, 1997.

[7] Tina Balke and Nigel Gilbert. How do agents make decisions ? a survey. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 17(4) :13, 2014.

[8] Michael Balmer, Marcel Rieser, Konrad Meister, David Charypar, Nicolas Lefebvre, Kai Nagel, and K Axhausen. Matsim-t : Architecture and simulation times. *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering*, 2009.

[9] M Bourgais, P Taillandier, and Laurent Vercouter. Cognition, émotions et relations sociales pour la simulation multi-agent. In *JFSMA 2017*, Caen, France, July 2017.

[10] Mathieu Bourgais. *Vers des agents cognitifs, affectifs et sociaux pour la simulation*. Theses, Normandie Université, 2018.

[11] Mathieu Bourgais, Patrick Taillandier, and Laurent Vercouter. Ben : An agent architecture for explainable and expressive behavior in social simulation. In *International Workshop on Explainable, Transparent Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pages 147–163. Springer, 2019.

[12] M Bratman. *Intentions, plans, and practical reason.* Harvard Univ. Press, 1987.

[13] Jan Broersen, Mehdi Dastani, Joris Hulstijn, Zisheng Huang, and Leendert van der Torre. The boid architecture : conflicts between beliefs, obligations, intentions and desires. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, pages 9–16. ACM, 2001.

[14] C. Chivas and J. Cescon. Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (dra-35) - toxicité et dispersion des fumées d'incendie phénoménologie et modélisation des effets. Technical report, INERIS, 2005.

[15] Philip R Cohen and Hector J Levesque. Intention is choice with commitment. *Artificial intelligence*, 42(2-3) :213–261, 1990.

[16] Frank Dignum, Virginia Dignum, and Catholijn M Jonker. Towards agents for policy making. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 141–153. Springer, 2008.

[17] Bruce Edmonds and Scott Moss. From kiss to kids–an 'anti-simplistic'modelling approach. In *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation*, pages 130–144. Springer, 2004.

[18] Nigel Gilbert and Klaus Troitzsch. *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK), 2005.

[19] Jonathan Gratch and Stacy Marsella. A domain-independent framework for modeling emotion. *Cognitive Systems Research*, 2004.

[20] Nick Howden, Ralph Rönnquist, Andrew Hodgson, and Andrew Lucas. Jack intelligent agents-summary of an agent infrastructure. In *5th International conference on autonomous agents*, 2001.

[21] Wander Jager. Enhancing the realism of simulation (eros) : On implementing and developing psychological theory in social simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 20(3) :14, 2017.

©AfIA 2020

[22] Hong Jiang, Jose M Vidal, and Michael N Huhns. Ebdi : an architecture for emotional agents. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 2007.

[23] Martin Josef Kollingbaum. *Norm-governed practical reasoning agents*. PhD thesis, University of Aberdeen, 2005.

[24] Kalliopi Kravari and Nick Bassiliades. A survey of agent platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18(1) :11, 2015.

[25] Margaux Lhommet, Domitile Lourdeaux, and Jean-Paul Barthès. Never alone in the crowd : A microscopic crowd model based on emotional contagion. In *Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2011 IEEE/WIC/ACM International Conference on*, volume 2, pages 89–92. IEEE, 2011.

[26] EG Macatulad and AC Blanco. 3dgis-based multiagent geosimulation and visualization of building evacuation using gama platform. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014.

[27] Robert R McCrae and Oliver P John. An introduction to the five-factor model and its applications. *Journal of personality*, 1992.

[28] Alice Micolier, Franck Taillandier, Patrick Taillandier, and Frédéric Bos. Li-bim, an agent-based approach to simulate occupant-building interaction from the building-information modelling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82 :44–59, 2019.

[29] Emma Norling. Folk psychology for human modelling : Extending the bdi paradigm. In *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pages 202–209, 2004.

[30] Magalie Ochs, Nicolas Sabouret, and Vincent Corruble. Simulation of the dynamics of nonplayer characters' emotions and social relations in games. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 1(4) :281–297, 2009.

[31] Andrew Ortony, Gerald L Clore, and Allan Collins. *The cognitive structure of emotions*. Cambridge university press, 1990.

[32] Lin Padgham, Kai Nagel, Dhirendra Singh, and Qingyu Chen. Integrating bdi agents into a matsim simulation. In *Proceedings of the Twenty-first European Conference on Artificial Intelligence*, 2014.

[33] Alexander Pokahr, Lars Braubach, and Winfried Lamersdorf. Jadex : A bdi reasoning engine. In *Multi-agent programming*. Springer, 2005.

[34] Nur Raihan Ramli, Sazalinsyah Razali, and Mashanum Osman. An overview of simulation software for non-experts to perform multi-robot experiments. In *ISAMSR*. IEEE, 2015.

[35] Ralph Rönnquist. The goal oriented teams (gorite) framework. In *International Workshop on Programming Multi-Agent Systems*. Springer, 2007.

[36] Ilias Sakellariou, Petros Kefalas, and Ioanna Stamatopoulou. Enhancing netlogo to simulate bdi communicating agents. In *Hellenic Conference on Artificial Intelligence*. Springer, 2008.

[37] Dhirendra Singh and Lin Padgham. Opensim : A framework for integrating agent-based models and simulation components. In *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications-Volume 263 : ECAI*, 2014.

[38] Craig A Smith, Richard S Lazarus, et al. Emotion and adaptation. *Handbook of personality : Theory and research*, pages 609–637, 1990.

[39] Ron Sun. *Cognition and multi-agent interaction : From cognitive modeling to social simulation*. Cambridge Univ. Press, 2006.

[40] Jan Svennevig. *Getting acquainted in conversation : a study of initial interactions*. John Benjamins Publishing, 2000.

[41] Patrick Taillandier, Mathieu Bourgais, Philippe Caillou, Carole Adam, and Benoit Gaudou. A bdi agent architecture for the gama modeling and simulation platform. In *MABS 2016*, 2016.

[42] Patrick Taillandier, Benoit Gaudou, Arnaud Grignard, Quang-Nghi Huynh, Nicolas Marilleau, Philippe Caillou, Damien Philippon, and Alexis Drogoul. Building, composing and experimenting complex spatial models with the gama platform. *GeoInformatica*, Dec 2018.

[43] Quang Chi Truong, Patrick Taillandier, Benoit Gaudou, Minh Quang Vo, Trung Hieu Nguyen, and Alexis Drogoul. Exploring agent architectures for farmer behavior in land-use change. a case study in coastal area of the vietnamese mekong delta. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 146–158. Springer, 2015.

[44] Marion Valette, Benoit Gaudou, Dominique Longin, and Patrick Taillandier. Modeling a real-case situation of egress using bdi agents with emotions and social skills. In *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 3–18. Springer, 2018.

[45] H. Van Dyke Parunak, Robert Bisson, Sven Brueckner, Robert Matthews, and John Sauter. A model of emotions for situated agents. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 2006.

[46] Uri Wilensky and I Evanston. Netlogo : Center for connected learning and computer-based modeling. *Northwestern Univ., Evanston, IL*, 1999.

On the Convergence of Swap Dynamics to Pareto-Optimal Matchings

F. Brandt and A. Wilczynski
Technical University of Munich, DSS

{brandtf,wilczyns}@in.tum.de

Résumé

On étudie la possibilité et la nécessité d'atteindre des couplages Pareto-optimaux par le biais d'échanges entre paires d'agents dans des problèmes d'appariement. Trois problèmes d'appariement classiques sont examinés (allocation de maisons, mariages stables et problème de colocataires) ainsi que trois notions d'échanges améliorants. La convergence vers des couplages Pareto-optimaux est explorée du point de vue de la complexité algorithmique et pour des restrictions de préférences naturelles : unimodales, corrélées ou unidimensionnelles.

Mots-clés

Couplage stable, échanges, Pareto-optimal, convergence.

Abstract

We study the possibility and the necessity to reach Pareto-optimal matchings via pairwise swaps between agents in one-to-one matching markets. Three matching markets are examined (housing, marriage and roommate markets) as well as three notions of swap rationality. Convergence to Pareto-optimal matchings is explored in a complexity point of view and for natural preference restrictions: single-peaked, globally-ranked or one-dimensional Euclidean.

Keywords

Stable matching, swaps, Pareto-optimal, convergence.

1 Introduction

One-to-one matchings, where individuals are matched with resources or other individuals, are omnipresent in everyday life. Examples include the job market, assigning offices to workers, pairing students in working groups, and online dating. The formal study of matching procedures leads to challenging algorithmic problems while being of immediate practical interest [23, 26]. One typically distinguishes between three different types of abstract one-to-one matching settings. In *housing markets* [30], each agent is matched with an object (usually referred to as a house). In *marriage markets* [19], agents are partitioned into two groups—say, males and females—and each member of one group is matched with an agent from the other group. Finally, in *roommate markets* [19], all agents belong to the same group and each agent is matched with another agent. By supposing that agents are rational and want to maximize their satisfaction, individual agreements may naturally occur among them and especially, for realistic reasons, between small groups of agents. An important question is then whether sequences of such individual agreements can lead to socially optimal outcomes. In many applications, it is reasonable to assume that there is an initial assignment because agents already live in a house, are engaged in a relationship, and are employed by a company [1, 27]. Under these assumptions, we focus on atomic agreements which require the least coordination: *pairwise swaps*.

We consider three different types of individual rationality for pairwise swaps. In housing markets, there is only one meaningful notion of swap rationality: two agents will only exchange objects if both of them are better off. By contrast, when matching agents with each other, one could require that all four agents involved in a swap or only two of them are better off. The latter requirement allows for two kinds of swap rationality: two agents who exchange their match are better off (e.g., a company and its subsidiary exchange employees without asking their consent) or two agents who decide to form a new pair are better off (e.g., two lovers leave their current partners to be together).

Social optimality in settings with ordinal preferences is commonly measured in terms of Pareto-optimality. We therefore study whether there exists a sequence of pairwise swaps that results in a Pareto-optimal matching that does not allow for further swaps (and hence is called stable). Whenever all sequences of pairwise swaps are of this kind, we say that the given type of swap dynamics converges.

It turns out that in all three types of matching markets and all three notions of swap rationality, it may not be possible to reach a Pareto-optimal stable matching from the initial assignment. We prove that deciding whether this is the case is NP-hard for two types of swap rationality while it can be solved in polynomial time for swaps based on blocking pairs. However, for all types of rationality, checking convergence is co-NP-hard. On the other hand, we show that when preferences are one-dimensional Euclidean—a natural but demanding restriction—swap dynamics for two types of swap rationality will always converge.

2 Related Work

Damamme et al. [15] investigated the dynamics of rational pairwise swaps in housing markets, where two agents are

©AfIA 2020

better off by exchanging their objects. Recently, variants that further restrict the agents' interactions using underlying graph structures have been examined [20, 21, 29].
In marriage and roommate markets, most of the literature focuses on deviations based on blocking pairs, where two agents decide to leave their old partners in order to be matched with each other. Blocking pairs are best known for their role in the definition of stability [19], but some papers also studied the dynamics of blocking pair swaps [2, 28]. The notion of exchange stability, where two agents agree to exchange their partners, has been investigated in both roommate markets [8, 12] and marriage markets [13]. We consider both types of swaps, i.e., blocking pair swaps and exchange rational swaps, but focus on the study of dynamics that reach Pareto-optimal matchings.
Perhaps closest to our work is a result by Damamme et al. [15] who proved that swap dynamics always converge to a Pareto-optimal matching in housing markets under single-peaked preferences. However, they left open the computational problem of deciding whether a Pareto-optimal stable matching can be reached for unrestricted preferences and conjectured this problem to be intractable. We solve this problem and extend it to marriage and roommate markets. Moreover, we prove that their convergence result for housing markets under single-peaked preferences does not extend to marriage and roommate markets, but can be restored when restricting preferences even further.

3 The Model

Let N be a set of agents $\{1, \dots, n\}$ and O a set of objects $\{o_1, \dots, o_n\}$ such that $|N| = |O| = n$. Each agent $i \in N$ has strict ordinal preferences, given by linear order $\succ_i$, over a set A_i of alternatives to be matched with. In the matching markets we consider, A_i is either a subset of the set of agents N or the set of objects O. A tuple of preference relations $\succ = (\succ_1, \dots, \succ_n)$ is a *preference profile*.

3.1 Matching Markets

In this article, we are considering three different settings where the goal is to match the agents either with objects—like in housing markets—or with other agents—like in marriage or roommate markets. In all cases, we assume that there is an initial matching. More formally,

- a *housing market* consists of a preference profile where $A_i = O$ for all $i \in N$, and an initial endowment given as a bijection $\mu : N \to O$,
- a *marriage market* consists of a preference profile where $N = W \cup M$ with $W \cap M = \emptyset$, $A_i = M$ for all $i \in W$ and $A_i = W$ for all $i \in M$, and an initial matching given as a bijection $\mu : W \to M$, and
- a *roommate market* consists of a preference profile with even n and $A_i = N \setminus \{i\}$ for all $i \in N$, and an initial matching given as an involution $\mu : N \to N$ such that $\mu(i) \neq i$ for all $i \in N$.

When allowing for indifferences as well as unacceptabilities in the preferences, the three settings form a hierarchy: housing markets are marriage markets where the "objects" are indifferent between all agents, and marriage markets are roommate markets where all agents of the same type are considered unacceptable. In this paper, however, we do not make either assumption and therefore these inclusion relationships do not hold.
The key question studied in this paper is whether Pareto-optimal matchings can be reached from the initial matching via local modifications. A matching is *Pareto-optimal* if there is no other matching μ' such that for every agent i, $\mu'(i) \succeq_i \mu(i)$ and for at least one agent j, $\mu'(j) \succ_j \mu(j)$.

3.2 Preference Restrictions

We consider three restricted preference domains: single-peaked preferences [11], globally-ranked preferences [4, 6] and their common subdomain of one-dimensional Euclidean preferences [14]. A preference profile $\succ$ is *single-peaked* if there exists a linear order $>$ over the alternatives in $A := \bigcup_{i \in N} A_i$ such that for each agent i and each triple of alternatives $x, y, z \in A_i$ with $x > y > z$ or $z > y > x$, $x \succ_i y$ implies $y \succ_i z$. A preference profile $\succ$ is *globally-ranked* (we also speak about *correlated markets* [6]) if there exists a global order $>$ over all possible pairs in the matching market such that for every agent i and any two alternatives $x, y \in A_i$, $x \succ_i y$ iff $\{i, x\} > \{i, y\}$. Globally-ranked preferences impose no restriction in a housing market (the agents are matched with objects which do not express preference), but may capture in other markets the idea that each pair of agents generates an absolute profit and thus each agent prefers the agents with who she can get a better profit. A preference profile $\succ$ is *one-dimensional Euclidean (1-Euclidean)* if there exists an embedding $E : N \cup O \to \mathbb{R}$ on the real line such that for every agent i and any two alternatives $x, y \in A_i$, $x \succ_i y$ iff $|E(i) - E(x)| < |E(i) - E(y)|$.
One-dimensional Euclidean preferences form a subdomain of single-peaked preferences because every 1-Euclidean preference profile is singled-peaked for the linear order $>$ given by $x > y$ iff $E(x) > E(y)$. However, a single-peaked preference profile may not be 1-Euclidean, therefore the inclusion is strict. Moreover, one-dimensional Euclidean preferences form a subdomain of globally-ranked preferences: from a 1-Euclidean preference profile, a global ranking over all possible pairs can be extracted by sorting all pairs according to the Euclidean distance on the embedding E between the two partners. Reversely, a globally-ranked preference profile may not be 1-Euclidean, therefore the inclusion is strict. We know that 1-Euclidean preferences are both globally-ranked and single-peaked. However, the reverse is not true: a globally-ranked and single-peaked preference profile may not be 1-Euclidean, even in markets matching agents with each other. We omit the examples due to space restrictions.
While assuming that all agents have 1-Euclidean preferences certainly represents a strong restriction, there are nevertheless some applications where this assumption is not unreasonable. For example, in job markets, preferences could be 1-Euclidean because employees prefer one workplace to another if it is closer to their home, or when forming pairs of students for the realization of a project, a stu-

dent could prefer to be matched with a student who is the most productive as the same hours as her.
All considered preference restrictions are efficiently recognizable: there exist polynomial time algorithms for checking single-peakedness [10, 18] or the satisfaction of the 1-Euclidean property [17, 24]. Checking whether a preference profile is globally-ranked boils down to checking the acyclicity of the directed graph defined on all possible pairs where there is an arc from a pair $\{i, j\}$ to a pair $\{i, k\}$ iff $k \succ_i j$ [4]; this can be done in polynomial time.

3.3 Rational Swaps

We study sequences of matchings in which two pairs of the current matching are permuted. More formally, we assume that a swap w.r.t. two agents (i, j) transforms a matching μ into a matching μ' where agents i and j have exchanged their matches, i.e., $\mu'(i) = \mu(j)$ and $\mu'(j) = \mu(i)$, while the rest of the matching remains unchanged, i.e., $\mu'(k) = \mu(k)$ for every $k \notin \{i, j, \mu(i), \mu(j)\}$.
We furthermore require these swaps to be *rational* in the sense that they result from an agreement among agents, and thus make the agents involved in the agreement better off.
The most natural notion of rationality is exchange-rationality, which requires that the two agents who exchange their matches are better off [8]. A swap w.r.t. agents (i, j) from matching μ is *exchange rational (ER)* if the agents who exchange their matches are better off, i.e.,

$$\mu(j) \succ_i \mu(i) \text{ and } \mu(i) \succ_j \mu(j). \qquad (ER\text{-swap})$$

Exchange-rationality is the only meaningful notion of swap rationality in housing markets because only one side of the market has preferences. However, several notions of rationality emerge in marriage and roommate markets, where agents are matched with each other. One could demand that only two of the agents who agree to form a new pair need to be better off. This notion of rational swaps is based on the classic idea of *blocking pairs*, which forms the basis of the standard notion of stability [19]. A swap w.r.t. agents (i, j) from matching μ between agents is *blocking pair (BP) rational* if one of the new pairs in μ' forms a blocking pair, where both agents are better off, i.e.,

$$\left[\mu(j) \succ_i \mu(i) \text{ and } i \succ_{\mu(j)} j\right] \text{ or } \left[\mu(i) \succ_j \mu(j) \text{ and } j \succ_{\mu(i)} i\right]. \qquad (BP\text{-swap})$$

We refer to a BP-swap by mentioning the associated blocking pair ($(i, \mu(j))$ or $(j, \mu(i))$). The old partners of the blocking pair are also assumed to be matched together.[1]
Finally, in marriage and roommate markets, a stronger notion of rationality is that of a *fully rational swap*, which makes all four involved agents better off. A swap w.r.t. agents (i, j) from matching μ is *fully rational (FR)* if all four agents involved in the swap are better off, i.e.,

$$\mu(j) \succ_i \mu(i), \quad \mu(i) \succ_j \mu(j), \quad j \succ_{\mu(i)} i, \text{ and } \quad i \succ_{\mu(j)} j. \qquad (FR\text{-swap})$$

[1] Once the old partners are alone, they have an incentive to form a new pair. Roth and Vande Vate [28] therefore decompose BP-swaps into two steps. We do not explicitly consider these steps in order to always maintain a perfect matching like, e.g., Knuth [25].

Note that for marriage and roommate markets, an FR-swap w.r.t. pair of agents (i, j) from a matching μ is an ER-swap w.r.t. pair (i, j) or $(\mu(i), \mu(j))$ and also a BP-swap w.r.t blocking pair $(i, \mu(j))$ or $(j, \mu(i))$. We thus obtain the following implications:

$$BP\text{-swap} \quad \Leftarrow \quad FR\text{-swap} \quad \Rightarrow \quad ER\text{-swap}$$

The different types of swap rationality are illustrated in the following example.

Example 1. *Consider a roommate market with six agents. The preferences of the agents are given below, where the initial assignment is marked with frames.*

1 :	4	$\succ$	$\boxed{3}$	$\succ$	6	$\succ$	5	$\succ$	2
2 :	3	$\succ$	1	$\succ$	$\boxed{4}$	$\succ$	6	$\succ$	5
3 :	6	$\succ$	2	$\succ$	$\boxed{1}$	$\succ$	5	$\succ$	4
4 :	5	$\succ$	1	$\succ$	3	$\succ$	$\boxed{2}$	$\succ$	6
5 :	2	$\succ$	$\boxed{6}$	$\succ$	4	$\succ$	1	$\succ$	3
6 :	4	$\succ$	3	$\succ$	1	$\succ$	2	$\succ$	$\boxed{5}$

The swap w.r.t. pair $(1, 2)$, which matches Agent 1 with Agent 4 and Agent 2 with Agent 3, is an FR-swap because every involved agent is better off. Hence, this is also an ER-swap for pair $(1, 2)$ or $(3, 4)$ because they both prefer to exchange their partner. It is also a BP-swap for blocking pair $(2, 3)$ or $(1, 4)$ because they both prefer to be together than with their current partner.

The swap w.r.t. pair $(1, 6)$ is a BP-swap for blocking pair $(3, 6)$ because Agent 3, the old partner of Agent 1, prefers to be with Agent 6, as well as Agent 6 who prefers 3 to her old partner 5. This is not an ER-swap (and hence not an FR-swap) because neither the agents in pair $(1, 6)$ nor in pair $(3, 5)$ want to exchange their partners.

The swap w.r.t. pair $(4, 6)$ is an ER-swap for $(4, 6)$ because Agent 4 prefers the current partner of 6, i.e., Agent 5, to her current partner and 6 prefers the current partner of 4, i.e., Agent 2, to her current partner. This is not a BP-swap (and hence not an FR-swap) because it matches Agent 4 with Agent 5, who prefers to stay with Agent 6, and Agent 6 with Agent 2, who prefers to stay with Agent 4.

Stability can be defined according to the different notions of rational swaps. A matching μ is *σ-stable*, for $\sigma \in \{FR, ER, BP\}$, if no σ-swap can be performed from matching μ. A sequence of σ-swaps, for $\sigma \in \{FR, ER, BP\}$, corresponds to a sequence of matchings $(\mu^0, \mu^1, \ldots, \mu^r)$ such that a σ-swap transforms each matching μ^t into matching μ^{t+1} for every $0 \leq t < r$. Then, matching μ is *σ-reachable* from initial matching μ^0 if there exists a sequence of σ-swaps $(\mu^0, \mu^1, \ldots, \mu^r)$ such that $\mu^r = \mu$. When the context is clear, we omit σ and μ^0.

A *σ-dynamics* is defined w.r.t. initial matching μ^0 and type σ of rational swaps. The σ-dynamics is *finite* if all associated sequences of σ-swaps terminate in a σ-stable matching, and it *converges* if it is finite for every matching μ^0.

We consider the following decision problems related to the convergence of dynamics to a Pareto-optimal matching.

©AfIA 2020

$\exists$-σ-PARETOSEQUENCE / $\forall$-σ-PARETOSEQUENCE	
Input:	Matching market, type σ of rational swaps
Question:	Does there exist a sequence of σ-swaps terminating in a Pareto-optimal σ-stable matching? / Do all sequences of σ-swaps terminate in a Pareto-optimal σ-stable matching?

In order to tackle these two questions, we also study the stability and convergence properties of the considered dynamics in the three types of matching markets.

4 Exchange Rational Swaps

In housing markets, every ER-swap represents a Pareto improvement. Since the number of agents and objects is finite, ER-dynamics always converges and the existence of ER-stable matchings is guaranteed (simply because every Pareto-optimal matching happens to be ER-stable). However, it may be impossible to reach a Pareto-optimal matching from a given matching by only applying ER-swaps.

Proposition 1. *ER-dynamics may not converge to a Pareto-optimal matching in housing markets.*

Proof. Consider a housing market with n agents. The preferences of the agents are given below, where the initial assignment is marked with frames and $[\dots]$ denotes an arbitrary order over the rest of objects.

$$\begin{array}{lccccc} 1: & (o_1) & \succ & \boxed{o_2} & \succ & [\dots] \\ 2: & (o_2) & \succ & \boxed{o_3} & \succ & [\dots] \\ & & & \dots & & \\ n: & (o_n) & \succ & \boxed{o_1} & \succ & [\dots] \end{array}$$

Observe that no ER-swap is possible in this instance, therefore the initial matching (framed objects) is the unique ER-reachable matching. However, there exists a unique Pareto-optimal matching (circled objects), and this matching is different from the initial one. Note that, in such an instance, even if exchanges involving up to $n-1$ agents are allowed, the Pareto-optimal matching will not be reached: the only ER-exchange would involve all the n agents. □

Nevertheless, it is known that ER-dynamics always converges to a Pareto-optimal matching in housing markets when the agents' preferences are single-peaked [15].
In marriage and roommate markets, an ER-stable matching may not exist, even for single-peaked preferences [8, 12]. However, it turns out that, for globally-ranked preferences, an ER-stable matching always exists, and, moreover, the convergence to such a matching is guaranteed.

Proposition 2. *ER-dynamics always converges in marriage / roommate markets for globally-ranked preferences.*

Proof. Denote by $>$ the global order over all possible pairs such that the preferences of the agents are globally-ranked w.r.t. this global order. Define as $f : \mu \to \mathbb{R}$ the potential function which assigns to each matching the sum of ranks in order $>$ of all the assigned pairs in the matching, i.e., $f(\mu) = \sum_{\{i,j\} s.t. \mu(i)=j} rank_>(\{i,j\}))$ with $rank_>$ the function which gives the rank of the pairs in order $>$. Now consider a sequence of ER-swaps given by the sequence of matchings $(\mu^0, \mu^1, \dots, \mu^r)$. Between each matchings μ^t and μ^{t+1}, with $0 \leq t < r$, an ER-swap is performed, say w.r.t. pair (i, j) of agents. That means, by definition of an ER-swap, that agents i and j prefer to exchange their partners in μ^t, and thus, $\mu^t(j) \succ_i \mu^t(i)$ and $\mu^t(i) \succ_j \mu^t(j)$. This implies, by correlation of the preferences, that $\{i, \mu^t(j)\} > \{i, \mu^t(i))\}$ and $\{j, \mu^t(i)\} > \{j, \mu^t(j)\}$. But agents i and $\mu^t(j)$ are matched in μ^{t+1}, as well as agents j and $\mu^t(i)$. Since the rest of the pairs remains unchanged between μ^t and μ^{t+1}, we get that $f(\mu^{t+1}) < f(\mu^t)$. Because the number of different matchings is finite, we conclude that ER-dynamics always converges. □

In general, an ER-stable matching may not be Pareto-optimal, thus convergence to a Pareto-optimal matching is not guaranteed even when an ER-stable matching exists (note that deciding the existence of an ER-stable matching is NP-hard in marriage and roommate markets [12, 13]).

Proposition 3. *ER-dynamics may not converge to a Pareto-optimal matching, in marriage and roommate markets, even when an ER-stable matching exists and for globally-ranked preferences.*

Proof. Consider a marriage market with three women and three men. The preferences are given below and the initial assignment is marked with frames.

$$\begin{array}{lccccc|lccccc} w_1: & (m_1) & \succ & \boxed{m_2} & \succ & m_3 & m_1: & (w_1) & \succ & \boxed{w_3} & \succ & w_2 \\ w_2: & (m_2) & \succ & \boxed{m_3} & \succ & m_1 & m_2: & (w_2) & \succ & \boxed{w_1} & \succ & w_3 \\ w_3: & (m_3) & \succ & \boxed{m_1} & \succ & m_2 & m_3: & (w_3) & \succ & \boxed{w_2} & \succ & w_1 \end{array}$$

No ER-swap is possible from initial matching μ^0 (framed agents), thus μ^0 is the unique ER-reachable matching. Yet, there is another matching (circled agents) which is the unique Pareto-optimal matching. This preference profile is globally-ranked w.r.t., e.g., the global order $\{w_1, m_1\} > \{w_2, m_2\} > \{w_3, m_3\} > \{w_1, m_2\} > \{w_2, m_3\} > \{w_3, m_1\} > \{w_1, m_3\} > \{w_2, m_1\} > \{w_3, m_2\}$.
Now, consider a roommate market with six agents. Preferences of the agents are given below, where the initial partner of each agent is marked with frames and $[\dots]$ denotes an arbitrary order over the rest of the agents.

$$\begin{array}{lccccc|lccccc} 1: & (3) & \succ & \boxed{2} & \succ & [\dots] & 4: & (6) & \succ & \boxed{3} & \succ & [\dots] \\ 2: & (5) & \succ & \boxed{1} & \succ & [\dots] & 5: & (2) & \succ & \boxed{6} & \succ & [\dots] \\ 3: & (1) & \succ & \boxed{4} & \succ & [\dots] & 6: & (4) & \succ & \boxed{5} & \succ & [\dots] \end{array}$$

No ER-swap is possible from initial matching μ^0 (framed agents), thus μ^0 is the unique ER-reachable matching. Yet, there is another matching (circled agents) which is the unique Pareto-optimal matching. This preference profile is globally-ranked w.r.t., e.g., the global order $\{4, 6\} > \{1, 3\} > \{3, 4\} > \{2, 5\} > \{1, 2\} > \{5, 6\} > [\dots]$. □

Note that the above preference profiles are not 1-Euclidean. In fact, they are not even single-peaked. Again, more positive results can be obtained by restricting the domain of admissible preferences.

Proposition 4. *Every ER-stable matching is Pareto-optimal when preferences are single-peaked in marriage and roommate markets.*

Proof. Let μ be an ER-stable matching. For any two agents i and j (in N for roommate markets, or both in either W or M for marriage markets) it holds that $\mu(i) \succ_i \mu(j)$ or $\mu(j) \succ_j \mu(i)$. Suppose there is another matching μ' such that $\mu'(i) \succeq_i \mu(i)$ for every $i \in N$ and such that $\mu'(j) \succ_j \mu(j)$ for some $j \in N$. Then, there exists a Pareto improving cycle from μ to μ' along agents $(n_1, \ldots, n_k)$ such that each agent n_i, $1 \leq i \leq k$, is matched in μ' with agent $\mu(n_{(i \bmod k)+1})$. For marriage markets, the agents in $(n_1, \ldots, n_k)$ are restricted by definition to only one side of the market, but it impacts both sides since the agents exchange agents of the other side. But there is no problem of preferences of the matched agents because no agent is worse off in μ' compared to μ. The same holds for roommate markets. Since μ is ER-stable, it holds that $k > 2$. However, for single-peaked preferences, one can prove, by following the same proof by induction as Damamme et al. [15], that a Pareto improving cycle of any length cannot occur, contradicting the Pareto-dominance of μ. □

Propositions 2 and 4 allow us to conclude that sequences of ER-swaps will always terminate in Pareto-optimal matchings when preferences are both single-peaked and globally-ranked, like in 1-Euclidean preferences.

Corollary 1. *ER-dynamics always converges to a Pareto-optimal matching in marriage and roommate markets for 1-Euclidean preferences.*

For more general preferences, an interesting computational question is whether, given a preference profile and an initial assignment, a Pareto-optimal matching can be reached via ER-swaps. In the context of housing markets, the complexity of this question was mentioned as an open problem by Damamme et al. [15]. It turns out that this problem is computationally intractable for all kinds of matching markets, even for globally-ranked preferences.

Theorem 1. $\exists$-ER-PARETOSEQUENCE *is* NP*-hard in housing, marriage, and roommate markets even for globally-ranked preferences.*

Proof. For the case of housing markets, we perform a reduction from 2P1N-SAT, a variant of SAT known to be NP-complete [31], where the goal is to decide the satisfiability of a CNF propositional formula where each variable appears exactly twice as a positive literal and once as a negative literal. The idea of the proof is close to the one given by Gourvès et al. [20] for proving NP-hardness of determining whether a given object is reachable by a given agent. From an instance of 2P1N-SAT with formula φ on m clauses $C_1, \ldots, C_m$ and p variables $x_1, \ldots, x_p$, we build a housing market $(N, O, \succ, \mu^0)$ as follows.

For each clause C_j, with $1 \leq j \leq m$, we construct two clause-agents in N denoted by A_j and A'_j and two clause-objects in O denoted by a_j and a'_j such that $\mu^0(A_j) = a_j$ and $\mu^0(A'_j) = a'_j$. For each variable x_i, with $1 \leq i \leq p$, we construct six literal-agents in N corresponding to two copies of each literal, namely agents Y_i^ℓ and Z_i^ℓ who correspond to the ℓ^{th} ($\ell \in \{1, 2\}$) positive occurrence of variable x_i in formula φ, denoted by x_i^ℓ, and $\overline{Y_i}$ and $\overline{Z_i}$ who correspond to the negative occurrence of variable x_i in formula φ, denoted by $\overline{x_i}$; we also create their associated literal-objects y_i^ℓ, z_i^ℓ, $\overline{y_i}$ and $\overline{z_i}$ such that $\mu^0(Y_i^\ell) = y_i^\ell$, $\mu^0(Z_i^\ell) = z_i^\ell$, $\mu^0(\overline{Y_i}) = \overline{y_i}$ and $\mu^0(\overline{Z_i}) = \overline{z_i}$. The literal-agents are divided in two sets, denoted by Y and Z, which correspond to the original agents and their copy, respectively, i.e., $Y := \bigcup_{1 \leq i \leq p} \{Y_i^1, Y_i^2, \overline{Y}_i\}$ and $Z := \bigcup_{1 \leq i \leq p} \{Z_i^1, Z_i^2, \overline{Z}_i\}$. Three additional agents B, T and T' are created in N, with their initial assigned objects denoted by b, t and t', respectively.

The preferences are given below for each $1 \leq i \leq p$ and $1 \leq j < m$ ([...] is an arbitrary order over the rest of objects, $\{\mathfrak{y}_j\}$ is an arbitrary order over the literal-objects in $\bigcup_{1 \leq i \leq p} \{y_i^1, y_i^2, \overline{y_i}\}$ associated with literals of clause C_j and $cl(\ell_i)$ is the clause index in which literal ℓ_i appears).

T : $t' \succ \{\mathfrak{y}_1\} \succ \boxed{t} \succ [\ldots]$

A_j : $a'_j \succ \{\mathfrak{y}_{j+1}\} \succ t \succ \{\mathfrak{y}_j\} \succ \boxed{a_j} \succ [\ldots]$

A_m : $b \succ t \succ \{\mathfrak{y}_m\} \succ \boxed{a_m} \succ [\ldots]$

Y_i^1 : $z_i^1 \succ a_{cl(\overline{x_i})} \succ a_{cl(x_i^1)} \succ \overline{y_i} \succ \boxed{y_i^1} \succ [\ldots]$

Y_i^2 : $z_i^2 \succ y_i^1 \succ a_{cl(x_i^2)} \succ \overline{y_i} \succ \boxed{y_i^2} \succ [\ldots]$

$\overline{Y_i}$: $\overline{z_i} \succ y_i^2 \succ \boxed{\overline{y_i}} \succ [\ldots]$

B : $t \succ \boxed{b} \succ [\ldots]$

T' : $a'_m \succ \{\mathfrak{y}_1\} \succ \boxed{t'} \succ [\ldots]$

A'_j : $a_j \succ \{\mathfrak{y}_j\} \succ a'_m \succ \{\mathfrak{y}_{j+1}\} \succ \boxed{a'_j} \succ [\ldots]$

A'_m : $a_m \succ \{\mathfrak{y}_m\} \succ \boxed{a'_m} \succ [\ldots]$

Z_i^1 : $y_i^1 \succ \overline{y_i} \succ a_{cl(x_i^1)} \succ a_{cl(\overline{x_i})} \succ \boxed{z_i^1} \succ [\ldots]$

Z_i^2 : $y_i^2 \succ \overline{y_i} \succ y_i^1 \succ a_{cl(x_i^2)} \succ \boxed{z_i^2} \succ [\ldots]$

$\overline{Z_i}$: $\overline{y_i} \succ y_i^2 \succ \boxed{\overline{z_i}} \succ [\ldots]$

We claim that formula φ is satisfiable if and only if the matching assigning to each agent her best object is reachable (this is the only Pareto-optimal matching). The global idea is that the only way to reach this Pareto-optimal matching is to make object t reach agent A_m by first giving to each clause-agent A_j, via ER-swaps, a literal-object in $\{\mathfrak{y}_j\}$, objects associated with the literals of clause C_j. Once object t reaches clause-agent A_m, each agent except A'_m exchanges with her prime version agent (agents Z_i^1, Z_i^2 and $\overline{Z_i}$ are the prime versions of agents Y_i^1, Y_i^2 and $\overline{Y_i}$, respectively, and B is the prime version of A_m), and then the prime agents make among them the reverse sequence of swaps of the initial one where the goal was to make object t reach A_m, leading to the Pareto-optimal matching. By construction of the preferences among the literal-agents, once a literal-object associated with a positive (resp., negative) literal of a variable has been chosen to go with a clause-agent A_j, no literal-object associated with a negative (resp., positive) literal of this variable can reach a clause-agent. The details of the equivalence are omitted.

One can adapt the proof to marriage markets by considering the agents in the constructed housing market as women and the objects in O as men. The preferences of men are designed in such a way that a swap is rational for one side of the market iff it is rational for the other side, i.e., the set of ER-swaps is identical to the set of FR-swaps. Hence, the sequences of swaps that may occur are the same as in the proof for housing markets. The proof for roommate markets trivially follows by imposing that each agent ranks the agents who were of the same type as her at the end of her preference ranking. One can exhibit a global order over pairs such that the preferences are globally ranked. □

©AfIA 2020

Not surprisingly, for preferences more general than those restricted to the 1-Euclidean domain, recognizing the instances where ER-dynamics converges to a Pareto-optimal matching is intractable. The proof is omitted due to space restrictions but the idea is close to the proof of Theorem 1.

Theorem 2. $\forall$-ER-PARETOSEQUENCE *is* co-NP*-hard in housing, marriage and roommate markets even for globally-ranked preferences.*

In housing markets, the size of a sequence of ER-swaps is bounded by $\mathcal{O}(n^2)$ because every agent involved in a swap is strictly better off. Thus, since checking the Pareto-optimality of a matching in housing markets can be done in polynomial time [3], we get the following corollary.

Corollary 2. $\exists$-ER-PARETOSEQUENCE *is* NP*-complete and* $\forall$-ER-PARETOSEQUENCE *is* co-NP*-complete in housing markets even for globally-ranked preferences.*

5 Blocking Pair Swaps

BP-swaps cannot occur in housing markets because objects can never be better off. We thus focus in this section on matching markets that match agents with each other.
First, by definition of a blocking pair, any BP-stable matching is Pareto-optimal. Moreover, a BP-stable matching always exists in marriage markets by the Deferred Acceptance algorithm [19]. However, the convergence to such a state is not guaranteed, even for single-peaked preferences [25]. Nevertheless, there always exists a sequence of BP-swaps leading to a stable matching [28].[2]
In roommate markets, even the existence of a BP-stable matching is not guaranteed [19], and actually this is the case even for single-peaked preferences. Nevertheless, checking the existence of a stable matching in a roommate market can be done in polynomial time [22], and there always exists a sequence of BP-swaps leading to a stable matching when there exists one [16]. By combining these facts with the observation that every BP-stable matching is Pareto-optimal, we get the following corollary.

Corollary 3. $\exists$-BP-PARETOSEQUENCE *is solvable in polynomial time in marriage and roommate markets.*

However, determining whether all sequences of BP-swaps terminate in a Pareto-optimal matching, i.e., checking convergence of BP-dynamics to a Pareto-optimal matching, is hard. This is due to the hardness of checking the existence of a cycle in BP-dynamics (the proof is omitted).

Theorem 3. $\forall$-BP-PARETOSEQUENCE *is* co-NP*-hard in marriage and roommate markets.*

Nevertheless, when the preferences are globally-ranked, we can always reach a stable matching thanks to BP-dynamics in both settings. Indeed, it has been proved that BP-dynamics always converges in marriage markets with globally-ranked preferences [7]. In roommate markets, there always exists a unique BP-stable matching under 1-Euclidean preferences [9]. We prove that convergence to this matching is guaranteed using a potential function argument, and further, this holds for more general preferences, namely globally-ranked preferences.

Proposition 5. *BP-dynamics always converges in roommate markets for globally-ranked preferences.*

Proof. Denote by $>$ the global order over all possible pairs such that the preferences of the agents are globally-ranked with respect to $>$. Let $d(\mu)$ be the $n/2$-vector of the ranks in $>$ of all the different pairs of μ, i.e., $d(\mu) = (rank_>(\{i,j\}))_{i,j \ s.t. \ \mu(i)=j}$ with $rank_>$ the function which gives the rank of the pairs in order $>$. Consider a sequence of BP-swaps given by the following sequence of matchings $(\mu^0, \mu^1, \dots, \mu^r)$. Between each pair of matchings μ^t and μ^{t+1} with $0 \leq t < r$, a BP-swap is performed, say w.r.t. blocking pair (i,j). By definition of a BP-swap, agents i and j prefer to be together than being with their partner in μ^t, so $j = \mu^{t+1}(i) \succ_i \mu^t(i)$ and $i = \mu^{t+1}(j) \succ_j \mu^t(j)$, which implies, by correlation of the preferences, that $\{i,j\} > \{i, \mu^t(i)\}$ and $\{i,j\} > \{j, \mu^t(j)\}$. Therefore, $(rank_>(\{i,j\}), rank_>(\{\mu^t(i), \mu^t(j)\}))$ is lexicographically strictly smaller than $(rank_>(\{i, \mu^t(i)\}), rank_>(\{j, \mu^t(j)\}))$. Since the rest of the pairs remains unchanged between μ^t and μ^{t+1}, it follows that $d(\mu^{t+1})$ is lexicographically strictly smaller than $d(\mu^t)$. The number of different matchings is finite, therefore BP-dynamics always converges. □

Since every BP-stable matching is Pareto-optimal, we obtain the following corollary.

Corollary 4. *BP-dynamics always converges to a Pareto-optimal matching in marriage and roommate markets when the preferences are globally-ranked.*

6 Fully Rational Swaps

An FR-swap makes the four involved agents strictly better off and no agent worse off, thus FR-dynamics always converges to an FR-stable matching in $\mathcal{O}(n^2)$ steps.
In Section 4, we have shown that ER-dynamics always converges to a Pareto-optimal matching under 1-Euclidean preferences. It turns out that this does not hold for FR-dynamics, even under this strong preference restriction.

Proposition 6. *A sequence of FR-swaps may not converge to a Pareto-optimal matching in marriage and roommate markets, even for 1-Euclidean preferences.*

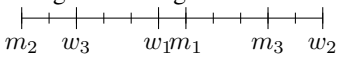
Proof. Consider a marriage market with three women and three men. The preferences are given below, where the initial assignment is marked with frames.

w_1 :	$\textcircled{m_1}$	$\succ$	$\boxed{m_3}$	$\succ$	m_2	m_1 :	$\textcircled{w_1}$	$\succ$	$\boxed{w_3}$	$\succ$	w_2
w_2 :	$\textcircled{m_3}$	$\succ$	m_1	$\succ$	$\boxed{m_2}$	m_2 :	$\textcircled{w_3}$	$\succ$	w_1	$\succ$	$\boxed{w_2}$
w_3 :	$\textcircled{m_2}$	$\succ$	$\boxed{m_1}$	$\succ$	m_3	m_3 :	$\textcircled{w_2}$	$\succ$	$\boxed{w_1}$	$\succ$	w_3

Initial matching μ^0 is the only reachable matching, because there is no FR-swap from μ^0. However, there is another

[2] Assuming that the old partners also form a new pair does not alter this result.

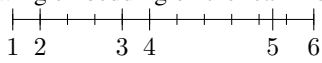
matching (circled agents) which is not reachable but Pareto dominates matching μ^0. The preferences are 1-Euclidean w.r.t. the following embedding on the real line.



Now, consider a roommate market with six agents. The preferences of the agents are given below, where the initial assignment is marked with frames.

$1: \textcircled{2} \succ 3 \succ 4 \succ 5 \succ \boxed{6}$ | $4: \textcircled{3} \succ 2 \succ \boxed{5} \succ 1 \succ 6$
$2: \textcircled{1} \succ \boxed{3} \succ 4 \succ 5 \succ 6$ | $5: \textcircled{6} \succ \boxed{4} \succ 3 \succ 2 \succ 1$
$3: \textcircled{4} \succ \boxed{2} \succ 1 \succ 5 \succ 6$ | $6: \textcircled{5} \succ 4 \succ 3 \succ 2 \succ \boxed{1}$

Initial matching μ^0 is the only reachable matching, because there is no FR-swap from μ^0. However, there is another matching (circled agents) which is not reachable but Pareto dominates matching μ^0. The preferences are 1-Euclidean w.r.t. the following embedding on the real line.



□

The proofs of Theorems 1 and 2 only dealt with instances in which FR-swaps are identical to ER-swaps. We thus immediately obtain hardness of ∃-FR-PARETOSEQUENCE and ∀-FR-PARETOSEQUENCE. Moreover, the Pareto-optimality of a matching can be checked in polynomial time [5], therefore we get the membership of the problems to NP and co-NP, respectively.

Theorem 4. *{*∃-FR-PARETOSEQUENCE*,* ∀-FR-PARETO SEQUENCE *} are {*NP*,* co-NP *}-complete in marriage and roommate markets even for globally-ranked preferences.*

7 Conclusion

We studied the properties of different dynamics of rational swaps in matching markets with initial assignment and, in particular, the question of convergence to a Pareto-optimal matching. For all considered settings, the dynamics may not terminate in a Pareto-optimal matching because *(i)* there is no stable matching, *(ii)* the dynamics does not converge, or *(iii)* the stable matching that is eventually reached is not Pareto-optimal. An overview is given in Table 1.

Computationally, determining whether there *exists* a sequence of rational swaps terminating in a Pareto-optimal matching is NP-hard for fully rational swaps and exchange rational swaps in all matching markets even for globally-ranked preferences (Theorems 1 and 4). For swaps based on blocking pairs, this problem can be solved efficiently (Corollary 3). However, the convergence to a Pareto-optimal matching, that is whether *all* sequences of swaps terminate in a Pareto-optimal matching, is co-NP-hard to decide (Theorem 3). Not surprisingly, the same hardness result holds for fully rational and exchange rational swaps, even for globally-ranked preferences (Theorems 2 and 4). Our computational results are summarized in Table 2. Even if the existence of a sequence of swaps terminating in a Pareto-optimal matching is not guaranteed for single-peaked preferences in marriage and roommate markets, it would be interesting to know whether this preference restriction is nevertheless sufficient for efficiently solving our computational problems in these markets.

Market	Preferences	ER-Swaps	BP-Swaps	FR-Swaps
Housing	General / GR	Conv		
	SP	Pareto [15]		
	1-D	Pareto		
Marriage	General	–	Stable [19]	Conv
	GR	Conv (Prop. 2)	Pareto (Cor. 4)	Conv
	SP	– [12]	Stable	Conv
	1-D	Pareto (Cor. 1)	Pareto	Conv
Roommate	General	–	– [19]	Conv
	GR	Conv (Prop. 2)	Pareto (Cor. 4)	Conv
	SP	– [8]	–	Conv
	1-D	Pareto (Cor. 1)	Pareto	Conv

Pareto ⇒ Conv ⇒ Stable

Table 1: Summary of the results on the existence of a stable matching (Stable), the guarantee of convergence (Conv) and the guarantee of convergence to a Pareto-optimal matching (Pareto) for the three different matching markets under study, according to different types of rational swaps and under different preference domains (General, globally-ranked (GR), single-peaked (SP), and 1-Euclidean (1-D)). Since Pareto ⇒ Convergence ⇒ Stable, we only mention the strongest result which is satisfied. The only meaningful type of rational swaps in housing markets are exchange-rational swaps; hence, the empty spaces.

Market	Prefs	ER-Swaps		BP-Swaps		FR-Swaps	
		∃-ParSeq	∀-ParSeq	∃-ParSeq	∀-ParSeq	∃-ParSeq	∀-ParSeq
Housing	General / GR	NP-c. (Cor. 2)	co-NP-c. (Cor. 2)				
	SP	P [15]	P [15]				
Marriage / Roommate	General	NP-h. (Th. 1)	co-NP-h. (Th. 2)	P (Cor. 3)	co-NP-h. (Th. 3)	NP-c. (Th. 4)	co-NP-c. (Th. 4)
	GR	NP-h. (Th. 1)	co-NP-h. (Th. 2)	P (Cor. 3)	P (Cor. 4)	NP-c. (Th. 4)	co-NP-c. (Th. 4)

Table 2: Summary of the computational results on the existence (∃-ParSeq) or the guarantee (∀-ParSeq) of sequences of rational swaps terminating in a Pareto-optimal matching for the three matching markets under study, according to different types of rational swaps and under different preference domains (General, globally-ranked (GR) and single-peaked (SP)). The only meaningful rational swaps in housing markets are ER-swaps; hence, the empty spaces.

The convergence to a Pareto-optimal matching in housing markets for exchange rational dynamics and single-peaked preferences [15] does not hold for more general settings where the "objects" are agents with preferences. However, this convergence is guaranteed under 1-Euclidean preferences in marriage and roommate markets. Hence, the generalization of this convergence result to more general settings requires more structure in the preferences.

A natural extension of this work would be to study meaningful dynamics for hedonic games, where agents form groups consisting of more than two agents.

References

[1] A. Abdulkadiroğlu and T. Sönmez. House allocation with existing tenants. *Journal of Economic Theory*, 88(2):233–260, 1999.

©AfIA 2020

[2] H. Abeledo and U. G. Rothblum. Paths to marriage stability. *Discrete Applied Mathematics*, 63(1):1–12, 1995.

[3] D. J. Abraham, K. Cechlárová, D. F. Manlove, and K. Mehlhorn. Pareto optimality in house allocation problems. In *Proc. of 16th ISAAC*, volume 3341 of *LNCS*, pages 1163–1175, 2005.

[4] D. J. Abraham, A. Leravi, D. F. Manlove, and G. O'Malley. The stable roommates problem with globally-ranked pairs. In *Proc. of 3rd WINE*, volume 4858 of *LNCS*, pages 431–444. Springer, 2007.

[5] D. J. Abraham and D. F. Manlove. Pareto optimality in the roommates problem. Technical Report TR-2004-182, University of Glasgow, Department of Computing Science, 2004.

[6] H. Ackermann, P. W. Goldberg, V. S. Mirrokni, H. Röglin, and B. Vöcking. A unified approach to congestion games and two-sided markets. In *Proc. of 3rd WINE*, pages 30–41. Springer Berlin Heidelberg, 2007.

[7] H. Ackermann, P. W. Goldberg, V. S. Mirrokni, H. Röglin, and B. Vöcking. Uncoordinated two-sided matching markets. *SIAM Journal on Computing*, 40(1):92–106, 2011.

[8] J. Alcalde. Exchange-proofness or divorce-proofness? Stability in one-sided matching markets. *Review of Economic Design*, 1(1):275–287, 1994.

[9] E. M. Arkin, S. W. Bae, A. Efrat, K. Okamoto, J. S. B. Mitchell, and V. Polishchuk. Geometric stable roommates. *Information Processing Letters*, 109(4):219–224, 2009.

[10] J. Bartholdi, III and M. Trick. Stable matching with preferences derived from a psychological model. *Operations Research Letters*, 5(4):165–169, 1986.

[11] D. Black. On the rationale of group decision-making. *Journal of Political Economy*, 56(1):23–34, 1948.

[12] K. Cechlárová. On the complexity of exchange-stable roommates. *Discrete Applied Mathematics*, 116(3):279–287, 2002.

[13] K. Cechlárová and D. F. Manlove. The exchange-stable marriage problem. *Discrete Applied Mathematics*, 152(1–3):109–122, 2005.

[14] C. H. Coombs. Psychological scaling without a unit of measurement. *Psychological Review*, 57(3):145–158, 1950.

[15] A. Damamme, A. Beynier, Y. Chevaleyre, and N. Maudet. The power of swap deals in distributed resource allocation. In *Proc. of 14th AAMAS Conference*, pages 625–633. IFAAMAS, 2015.

[16] E. Diamantoudi, E. Miyagawa, and L. Xue. Random paths to stability in the roommate problem. *Games and Economic Behavior*, 48(1):18–28, 2004.

[17] J.-P. Doignon and J.-C. Falmagne. A polynomial time algorithm for unidimensional unfolding representations. *Journal of Algorithms*, 16(2):218–233, 1994.

[18] B. Escoffier, J. Lang, and M. Öztürk. Single-peaked consistency and its complexity. In *Proc. of 18th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, pages 366–370. IOS Press, 2008.

[19] D. Gale and L. S. Shapley. College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1):9–15, 1962.

[20] L. Gourvès, J. Lesca, and A. Wilczynski. Object allocation via swaps along a social network. In *Proc. of 26th IJCAI*, pages 213–219. IJCAI, 2017.

[21] S. Huang and M. Xiao. Object reachability via swaps along a line. In *Proc. of 33rd AAAI Conference*, pages 2037–2044. AAAI Press, 2019.

[22] R. W. Irving. An efficient algorithm for the "stable roommates" problem. *Journal of Algorithms*, 6(4):577–595, 1985.

[23] B. Klaus, D. F. Manlove, and F. Rossi. Matching under preferences. In F. Brandt, V. Conitzer, U. Endriss, J. Lang, and A. D. Procaccia, editors, *Handbook of Computational Social Choice*, chapter 14. Cambridge University Press, 2016.

[24] V. Knoblauch. Recognizing one-dimensional Euclidean preference profiles. *Journal of Mathematical Economics*, 46(1):1–5, 2010.

[25] D. E. Knuth. *Mariages stables*. Les Presses de l'Université de Montréal, 1976.

[26] D. F. Manlove. *Algorithmics of Matching Under Preferences*. World Scientific Publishing Company, 2013.

[27] T. Morrill. The roommates problem revisited. *Journal of Economic Theory*, 145(5):1739–1756, 2010.

[28] A. E. Roth and J. H. Vande Vate. Random paths to stability in two-sided matching. *Econometrica*, 58(6):1475–1480, 1990.

[29] A. Saffidine and A. Wilczynski. Constrained swap dynamics over a social network in distributed resource reallocation. In *Proc. of 11th SAGT*, volume 11059 of *LNCS*, pages 213–225. Springer, 2018.

[30] L. S. Shapley and H. Scarf. On cores and indivisibility. *Journal of Mathematical Economics*, 1(1):23–37, 1974.

[31] R. Yoshinaka. Higher-order matching in the linear lambda calculus. In *Proc. of 16th RTA*, pages 235–249, 2005.

MDP augmentés pour la résolution de jeux de sécurité stochastiques

Romain Châtel[1], Abdel-Illah Mouaddib[1]

[1]Université de Caen Normandy, GREYC

[1]{romain.chatel, mouaddib.abdel-illah}@unicaen.fr

Résumé

Nous proposons une nouvelle approche théorique utilisant les MDP augmentés pour la résolution d'un Jeu de Sécurité Stochastique suivie de son évaluation expérimentale. La plupart des travaux mentionnés dans la littérature utilisent des techniques de Programmation Linéaire recherchant des équilibres de Stackelberg forts au sein de l'espace des stratégies de l'attaque et de la défense. Bien qu'efficaces, ces techniques sont coûteuses en temps de calcul et ont tendance à s'adapter difficilement à de très grosses instances. En fixant l'ensemble des stratégies possibles pour la défense, notre approche est en mesure d'utiliser le formalisme bien connu des MDP augmentés pour calculer une politique optimale d'un attaquant faisant face à un défenseur en patrouille. Deux modèles sont proposés pour adresser l'observabilité totale puis partielle sur le comportement et l'état de la défense. Les résultats expérimentaux obtenus lors de la simulation des modèles à observabilité totale valident notre approche mais soulignent également la nécessité de la raffiner pour prendre en charge de plus grosses instances ainsi que l'observabilité partielle.

Mots-clés

Théorie des jeux, Jeu à somme générale, MDP augmentés, Jeu de sécurité sur graphe, Jeux de stackelberg.

Abstract

We propose a novel theoretical approach for solving a Stochastic Security Game using augmented MDPs and an experimental evaluation. Most of the previous works mentioned in the literature focus on Linear Programming techniques seeking Strong Stackelberg Equilibria through the defender and attacker's strategy spaces. Although effective, these techniques are computationally expensive and tend to not scale well to very large problems. By fixing the set of the possible defense strategies, our approach is able to use the well-known augmented MDP formalism to compute an optimal policy for an attacker facing a defender patrolling. Two models are proposed to deal with total and partial observability of the defender behaviour and state. Experimental results on fully observable cases validate our approach and show good performances in comparison with optimistic and pessimistic approaches. However, these results also highlight the need of refinements to improve scalability and handle the partial observability cases.

Keywords

Game theory, Nonzero sum games, Augmented MDPs, Network Security Games, Stackelberg Games.

1 Introduction

Les jeux de sécurité fournissent un cadre formel ayant récemment émergé dans le domaine des systèmes multi-agents. Ils permettent de modéliser les interactions entre deux types de joueurs : défenseurs et attaquants lorsque la défense tente d'empêcher ses opposants d'attaquer une ou plusieurs cibles. Ils sont principalement appliqués dans l'organisation du déploiement de forces de sécurité (défenseurs) aussi bien civiles que militaires [8, 5, 14, 6]. Considérant que les attaquants ont habituellement tout le loisir de préparer leurs attaques, et donc de connaître la stratégie adoptée par la défense, la plus grande partie des travaux s'est concentrée sur le développement de Programmes Linéaires recherchant un équilibre de Stackelberg fort [11, 4] dans l'espace joint des stratégies de l'attaquant et du défenseur. Parmi les jeux de sécurité, les plus difficiles sont ceux sur graphe car les deux équipes (défense et attaque) sont mobiles sur un graphe rendant la recherche d'une stratégie pour chacune des deux parties fortement combinatoire [3]. Ils décrivent des situations où la défense tente d'empêcher la partie adverse d'atteindre une ou plusieurs cibles.

En fixant l'ensemble des stratégies possibles pour la défense, et en permettant des transitions entre ces stratégies au cours du temps, nous utilisons le formalisme des MDP augmentés pour résoudre un problème de patrouille sur graphe du point de vue d'un attaquant faisant face à une stratégie de défense néanmoins complexe.

Cet article est organisé comme suit : la section 2 définit les jeux et équilibres de Stackelberg, la section 3 décrit le formalisme des (PO)MDP, puis la section 4 définit le problème, la section 5 présente les formalisations du problème restreint à l'observabilité totale, la section 6 étend les formalisations de la section 5 à l'observabilité partielle sur la stratégie de la défense, la section 7 étend les formalisations de la section 6 à l'observabilité partielle sur l'état de la défense, la section 8 présente le dispositif expérimental et la section 9 expose les résultats obtenus. Finalement, la section 10 conclut cet article et évoque les travaux futurs.

©AfIA 2020

2 Jeux et équilibres de Stackelberg

Les jeux de Stackelberg forment une classe de jeux à deux joueurs dans laquelle un joueur est désigné comme étant le meneur et le second le suiveur. Le meneur choisit une stratégie, celle ci est communiquée au suiveur qui à son tour choisit sa stratégie en intégrant cette information lors de sa décision (stratégie best-response). Cette situation donne lieu à une notion d'équilibre analogue de l'équilibre de Nash appelée équilibre de Stackelberg. Elle peut être subdivisée en deux sous-équilibres : l'équilibre de Stackelberg fort lorsqu'un équilibre est choisi parmi plusieurs en tranchant en faveur du meneur et l'équilibre de Stackelberg faible lorsque l'on tranche en faveur du suiveur. L'existence de l'équilibre de Stackelberg fort est garantie dans tous les jeux de Stackelberg tandis que celle du faible ne l'est pas [1]. Plus formellement, un équilibre de Stackelberg fort est définit comme suit :

Définition 1. *Soit deux joueurs, M le meneur et S le suiveur, jouant respectivement les statégies m et $g_s(m)$ et recevant une utilité $U_M(m, g_s(m))$ et $U_S(m, g_s(m))lp$. Le couple $\langle m, g_s(m)\rangle$ forme un équilibre de Stackelberg fort si et seulement si :*

1. *Le meneur joue une stratégie best-response :*

$$U_M(m, g_s(m)) \geq U_M(m', g_s(m')),\ \forall m'.$$

2. *Le suiveur joue une stratégie best-response :*

$$U_S(m, g_s(m)) \geq U_S(m, g'_s(m)),\ \forall m, g'_s.$$

3. *En cas d'indifférence, le suiveur tranche en faveur du meneur :*

$$U_M(m, g_s(m)) \geq U_M(m, s),\ \forall m, s,$$

où s appartient à l'ensemble des stratégies best-responses du suiveur.

3 Le formalisme des (PO)MDP

Les (PO)MDP sont des modèles permettant à un agent de « décider comment agir dans un environnement accessible stochastique et faisant appel à un modèle de transition connu » (Russel and Norvig [7], p .500). Un MDP est composé des éléments suivants :

- Un ensemble fini d'états, $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots s_{|\mathcal{S}|}\}$, représentant l'ensemble des états atteignables par l'agent ;
- Un ensemble fini d'actions, $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots a_{|\mathcal{A}|}\}$, représentant toutes les actions réalisables à chaque instant par l'agent ;
- Une fonction de transition $\mathcal{T} : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \times \mathcal{S} \mapsto [0, 1]$ exprimant la probabilité, pour l'agent, de transiter de l'état s_i à l'état s_k lorsqu'il réalise l'action a_j : $\mathcal{T}_{ijk} = P(s_k|s_i, a_j)$ et donnant ainsi la dynamique du système ;
- Une fonction de récompense immédiate $\mathcal{R} : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \mapsto \mathbb{R}$ motivant l'agent à atteindre son but.

La résolution des MDP consiste à chercher des politiques $\pi : \mathcal{S} \mapsto \mathcal{A}$ permettant à l'agent de savoir quelle action accomplir pour chacun des état du système. Elles doivent, pour être optimales, satisfaire l'opérateur d'optimalité de Bellman, ie maximiser la récompense cumulée espérée par l'agent pour chaque état :

$$V_i^{\pi *} = V^{\pi *}(s_i) = \max_{a_j \in \mathcal{A}} [\mathcal{R}_{ij} + \gamma \sum_{s_k \in \mathcal{S}} \mathcal{T}_{ijk} V_k^{\pi *}]$$

Le facteur d'atténuation $\gamma \in [0, 1]$ permet ici un compromis entre la récompense obtenue immédiatement par l'agent et celle qu'il espère obtenir dans le futur. Lorsque $\gamma < 1$ et que la fonction de récompense est bornée, l'existence d'une politique optimale est garantie [2].
Cette première définition est dite à observabilité totale : l'état du système est, à chaque instant, directement observable par l'agent. Les POMDP permettent d'ajouter l'observabilité partielle sur l'état courant en complétant le formalisme précédent avec :

- Un ensemble fini d'observations, $\mathcal{Z} = \{z_1, z_2, \dots z_{|\mathcal{Z}|}\}$, donnant ce que peut observer l'agent à chaque instant sur son état caché ;
- Une fonction d'observation $\mathcal{TO} : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \times \mathcal{Z} \mapsto [0, 1]$, donnant $\mathcal{TO}_{ijk} = P(z_k|s_i, a_j)$ et reliant les observations de l'agent à ses états sous-jacents.

Dans ce formalisme, l'agent reçoit après chaque action une observation sur le nouvel état dans lequel il se trouve. La succession des paires $(a, z) \in \mathcal{A} \times \mathcal{Z}$ forme l'historique du système, $h^t = \langle z^0, a^0, \dots, a^{t-2}, z^{t-1}, a^{t-1}, z^t\rangle$ représente l'historique à l'instant t vu par l'agent. Il est commode de compresser l'espace des historiques $\mathcal{H}$ en un espace de croyances sur l'état de l'agent $\mathcal{B} : [0, 1]^{|\mathcal{S}|}$ tel que $b^t = (b_1, b_2, \dots, b_k, \dots, b_{|\mathcal{S}|}) \in \mathcal{B}$ représente l'état de croyance de l'agent à l'instant t sur son état caché avec $b_k = P(s_k^t|h^t)$. Les politiques $\pi : \mathcal{B} \mapsto \mathcal{A}$ permettent alors à l'agent de prendre à chaque instant une décision.
Cette transformation conduit à la définition d'un nouveau formalisme, les *Belief MDP* construits à partir des éléments suivants :

- $\mathcal{B}$, l'ensemble des états de croyance de l'agent ;
- $\mathcal{A}$, l'ensemble fini des actions possibles ;
- $\mathcal{T}^b : \mathcal{B} \times \mathcal{A} \times \mathcal{B} \mapsto [0, 1]$, la fonction de transition des états de croyance ;
- $\mathcal{R}^b : \mathcal{B} \times \mathcal{A} \mapsto \mathbb{R}$, la fonction de récompense immédiate associée aux états de croyance ;
- $\zeta^b : \mathcal{B} \times \mathcal{A} \times \mathcal{Z} \mapsto \mathcal{B}$, la fonction mettant à jour l'état de croyance à chaque observation reçue.

3.1 Les (PO)MDP augmentés

Les (PO)MDP peuvent s'interpréter comme des jeux stochastiques à un joueur, où l'évolution et éventuellement la perception de l'environnement sont incertaines. Les (PO)MDP augmentés permettent d'étendre ce cadre à des situations plus riches en complétant les espaces d'états, d'actions, d'observations et les modèles de transitions et de récompenses avec des informations ne décrivant pas directement le joueur et son environnement. Il est ainsi possible, par exemple, de décrire des jeux stochastiques à plu-

sieurs joueurs en considérant les espaces d'états, d'actions et d'observations joints de tous les agents.

4 Définition du problème

Notre travail consiste à résoudre le jeu de sécurité stochastique $\langle \{I, P\}, \mathcal{S} = \mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P \times \Pi^P, \mathcal{A} = \mathcal{A}^I \times \mathcal{A}^P, \mathcal{R}, \mathcal{T} \rangle$. Par exemple, sur une grille de taille $N \times N$, un drone patrouilleur P surveille. Un second drone intrus I tente de rejoindre une case sur la grille (la cible τ) sans se faire repérer par le premier (voir Figure 1). L'attaquant dispose des informations suivantes sur le défenseur :

1. Le défenseur est doté d'un champ de perception $\mathcal{F}^P : \mathcal{S}^P \times \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \mapsto \mathbb{R}$. Il donne l'intensité avec laquelle le patrouilleur perçoit chaque case (x, y) de la grille en fonction de son état interne $p \in \mathcal{S}^P$.
2. Le défenseur dispose d'un ensemble $\mathcal{A}^P$ d'actions possibles.
3. Le défenseur utilise à chaque instant une politique de patrouille k choisie parmi un ensemble Π^P de politiques possibles.
4. Le défenseur utilise un modèle de transition $\mathcal{T}^P$.
5. Le défenseur est susceptible de transiter à tout instant d'une politique de patrouille à une autre selon un modèle de transition inter-politique θ^P.

$\mathcal{T}^P$ et θ^P sont deux composantes du modèle de transition du jeu $\mathcal{T} = \{P(s'|s, a^I, a^P) \,|\, \forall (s', s, a^I, a^P) \in [\mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P \times \Pi^P]^2 \times \mathcal{A}^I \times \mathcal{A}^P\}$ où $\mathcal{A}^I$ est l'ensemble fini des actions possibles pour l'intrus et $\mathcal{S}^I$ l'ensemble fini de ses états internes.

Le but du jeu est de trouver une stratégie pour l'attaquant permettant d'atteindre rapidement la cible tout en minimisant le risque de se faire repérer par le patrouilleur. Ce but détermine le modèle de récompense du jeu $\mathcal{R} = \mathcal{R}^I \times \mathcal{R}^P$.

En supposant pour le défenseur des politiques markoviennes stationnaires et en utilisant le lemme 1 nous pouvons limiter notre étude à l'utilisation de MDP augmentés tout en garantissant l'optimalité des solutions trouvées.

Lemme 1 (Vorobeychik and Singh [12], 2012)**.** *Pour tout jeu de Stackelberg stochastique à somme générale et à facteur d'atténuation, si le meneur suit une politique markovienne stationnaire alors il existe une politique déterministe markovienne et stationnaire qui est une politique best-response pour le suiveur.*

Dans le but d'aborder ce problème pas à pas, celui-ci a été subdivisé en sous-problèmes de difficulté croissante. Dans un premier temps, nous supposons l'observabilité totale sur l'état et la politique de patrouille courante de la défense. Puis nous étendons ce modèle à l'observabilité partielle sur cette politique. Enfin, nous introduisons un second niveau d'incertitude : l'observabilité partielle sur l'état du patrouilleur.

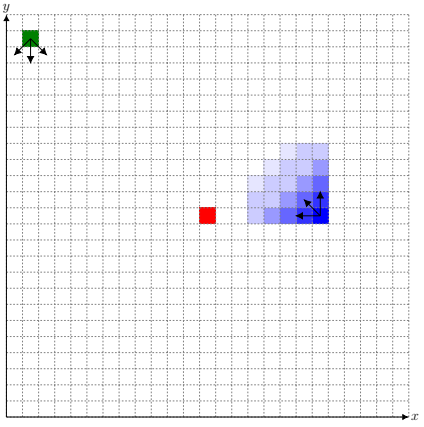


FIGURE 1 – Le jeu : l'intrus (vert) est situé dans le coin supérieur gauche, le patrouilleur (bleu) est situé à droite accompagné de son champ de perception (dégradé de bleu) et la cible (rouge) est située au centre de la grille.

5 Modèles pour l'observabilité totale

5.1 Formalisation du risque

Nous commençons par formaliser le risque pris par l'intrus vis à vis de la présence du patrouilleur comme une fonction $D^P : \mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P \mapsto [0, 1]$. Elle représente alors la probabilité que l'intrus soit détecté par le patrouilleur connaissant l'état $(i, p) \in \mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P$, des deux drones :

$$D^P_{ip} = P(\text{DETECTED} = T|i, p) = \frac{\mathcal{F}^P_{pi_\mathcal{X} i_\mathcal{Y}}}{\sum_{i' \in \mathcal{S}^I} \mathcal{F}^P_{pi'_\mathcal{X} i'_\mathcal{Y}}},$$

où $i_\mathcal{X}$ et $i_\mathcal{Y}$ désignent respectivement les valeurs sur $\mathcal{X}$ et $\mathcal{Y}$ des états i de l'intrus.

5.2 Formalisation de la récompense

Afin d'inciter l'agent attaquant à atteindre la cible τ, la fonction de récompense $\mathcal{R}^I$ lui délivre la récompense suivante :

$$\mathcal{R}^I_i = \begin{cases} 1 \text{ si } (i_\mathcal{X}, i_\mathcal{Y}) == \tau, \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

5.3 Modèle de transition agrégé du patrouilleur

Les politiques du patrouilleur ainsi que son modèle de transitions sont agrégés afin de construire un modèle de transition agrégé T^P pour le patrouilleur, tel que :

$$T^P_{p'kp} = \mathcal{T}^P_{p'\pi^P_k(p)p} = P(p'|\pi^P_k(p),\, p).$$

5.4 Modèle de transition inter-politique du patrouilleur

Le modèle de transition inter-politique du patrouilleur capture la dynamique de transition entre les différents comportements possibles du patrouilleur. Afin de prendre en compte des évènements mettant en jeu l'état de l'intrus par rapport à celui du patrouilleur, il est défini comme une

©AfIA 2020

fonction $\Pi^P \times \Pi^P \times S^P \times S^I \mapsto [0,1]$ et représente la probabilité $P(k'|k,i,p)$, pour le patrouilleur, de transiter d'une politique k à une politique k' lorsque les drones sont dans les états respectifs i et p.

5.5 Fonction d'utilité de l'intrus

La fonction d'utilité de l'intrus permet d'exprimer le compromis entre les objectifs parfois contradictoires d'atteindre la cible rapidement et celui de ne pas être repéré par le drone de défense. Elle est donnée par :

$$U^I_{ip} = \beta \mathcal{R}^I_i + (1-\beta)(1 - D^P_{ip}),$$

le paramètre β permettant de moduler la prise de risque de l'intrus.

5.6 MDP résultant

Le problème peut alors être résolu en définissant le MDP $\langle \mathcal{S}, \mathcal{A}^I, \mathcal{T}^I, T^P, \theta^P, U^I \rangle$ où $\mathcal{S} : \mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P \times \Pi^P$, et $\mathcal{T}^I$ est le modèle de transition de l'intrus. En utilisant le critère γ-pondéré, requis par le lemme 1 et permettant à l'intrus de privilégier les plus courts chemins vers la cible, l'opérateur d'optimalité de Bellman s'écrit alors :

$$V^*_{ipk} = U^I_{ip} + \gamma \max_{a \in \mathcal{A}^I} \sum_{i'p'k'} \mathcal{T}^I_{i'ai} T^P_{p'kp} \theta^P_{k'kip} V^*_{i'p'k'}. \quad (1)$$

5.7 Formulation pseudo maximin

Traditionnellement, dans les jeux à deux joueurs et à somme nulle, les notions d'équilibre de Nash et d'équilibre de Stackelberg fort se confondent, et de tels jeux peuvent être résolus en appliquant le théorème du *minimax* / *maximin* de Von Neuman. Parce que la stratégie du défenseur est une variable d'entrée du problème, ce jeu n'est pas, dans le cas général, à somme nulle, nous ne pouvons donc pas utiliser cette équivalence. Nous proposons cependant une seconde version de ce modèle à observabilité totale sous une forme pouvant rappeler le principe du *maximin*. Cette formulation consiste pour l'attaquant à considérer que le but de la défense est de le mettre en danger. Pour cela nous attribuons à la défense une fonction de valeur traduisant cette mise en danger minimisée par l'attaquant :

$$V^{P*}_{pik} = D^P_{ip} + \gamma \min_{a \in \mathcal{A}^I} \sum_{i'p'k'} \mathcal{T}^I_{i'ai} T^P_{p'kp} \theta^P_{k'kip} V^{P*}_{p'i'k'}. \quad (2)$$

Cette fonction de valeur est ensuite soustraite de l'opérateur de Bellman de l'attaquant :

$$V^*_{ipk} = \beta \Big[\mathcal{R}^I_i + \gamma \max_{a \in \mathcal{A}^I} \sum_{i'p'k'} \mathcal{T}^I_{i'ai} T^P_{p'kp} \theta^P_{k'kip} V^*_{i'p'k'} \Big] - (1-\beta) \frac{V^{P*}_{pik}}{\max_{s \in \mathcal{S}} V^{P*}_s} \quad (3)$$

Chacun des protagonistes pénalisant ainsi fortement son adversaire, nous espérons obtenir des politiques plus prudentes qu'avec la formulation précédente.

6 Extension à l'observabilité partielle sur la politique du patrouilleur

La succession au cours du temps des couples (i,p) d'états de la défense et de l'attaquant permettant d'inférer la succession des politiques k utilisées par la défense, ces couples d'états sont assimilables à des observations sur la politique qu'elle utilise. Nous intégrons alors l'incertitude sur la politique utilisée à chaque instant par le drone de surveillance en transformant le MDP précédent directement en *Belief MDP* à observabilité mixte $\langle \mathcal{S}, \mathcal{A}^{\mathcal{I}}, \mathcal{T}^I, T^P, U^I, \theta^P, \zeta_\pi \rangle$ avec :

- $\mathcal{S} : \mathcal{S}^I \times \mathcal{S}^P \times \mathcal{B}^P_\pi$ où $\mathcal{B}^P_\pi$ est l'ensemble des états de croyance de l'attaquant sur la politique utilisée par la défense ;
- $\zeta_\pi : \mathcal{S} \mapsto \mathcal{B}^P_\pi$, est la fonction mettant à jour l'état de croyance à chaque observation reçue telle que $b'_\pi = \zeta_\pi(i,p,b_\pi) = (b'_{k_1}, b'_{k_2}, \ldots, b'_{k|\Pi^P|})$, et

$$b'_k = P(k'|i,p,b_\pi) = \sum_k b_\pi(k) \theta_{k'kip}.$$

L'opérateur d'optimalité de Bellman s'écrit alors :

$$V^*_{ipb_\pi} = U^I_{ip} + \gamma \max_{a \in \mathcal{A}^I} \sum_{i'p'} \mathcal{T}^I_{iai'} \Big[\sum_k T^P_{pkp'} b_\pi(k) \Big] V^*_{i'p'b'_\pi}. \quad (4)$$

La formulation pseudo maximin s'étend sur le même principe à l'observabilité partielle sur la politique du patrouilleur.

7 Extension à l'observabilité partielle sur l'état du patrouilleur

Nous intégrons à présent l'observabilité partielle sur l'état de la défense en utilisant un oracle (un satellite par exemple) fournissant des observations sur cet état. Cela donne le *Belief MOMDP* $\langle S, \mathcal{A}^I, \mathcal{Z}, \mathcal{T}^I, U^I, TO, \theta^P, \zeta_s, \zeta_\pi \rangle$ suivant :

- $\mathcal{S} : \mathcal{S}^I \times \mathcal{B}^P_s \times \mathcal{B}^P_\pi$, avec $\mathcal{B}^P_s$ l'ensemble des états de croyance b_s sur l'état du patrouilleur ;
- $U^I_{ib_s} = \beta \mathcal{R}^I_i + (1-\beta)\Big[1 - \sum_p b_s(p) D^P_{ip}\Big]$;
- $TO : \mathcal{Z} \times \mathcal{S}^P \times \Pi^P \mapsto [0,1]$, est la fonction d'observation de l'oracle ;
- $\zeta_s(b_s, b_\pi, z) = b'_s = (b'_{p_1}, b'_{p_2}, \ldots, b'_{p|\mathcal{S}^P|})$, avec

$$b'_p = P(p'|b_s, b_\pi, z) = \frac{\sum_{k,p} TO_{zp'k} b_\pi(k) T^P_{pkp'} b_s(p)}{\sum_{p,p''k} \Big[TO_{zp''k} T^P_{pkp''} b_\pi(k) \Big] b_s(p)}$$

  la fonction de mise à jour de $b_s \in \mathcal{B}^P_s$;
- $\zeta_\pi(i, b_s, b_\pi) = b'_\pi = (b'_{k_1}, b'_{k_2}, \ldots, b'_{k|\Pi^P|})$, et

$$b'_k = P(k'|i, b_s, b_\pi) = \sum_k b_\pi(k) \sum_p b_s(p) \theta_{k'kip}$$

  est la fonction de mise à jour de $b_\pi \in \mathcal{B}^P_\pi$.

L'opérateur de Bellman s'écrit finalement :

$$V^*_{ib_s b_\pi} = U^I_{ib_s} + \gamma \max_{a \in \mathcal{A}^I} \sum_{i'} \mathcal{T}^I_{iai'} \sum_{zp'k} TO_{zp'k} \sum_{p} T^P_{pkp'} b_\pi(k) b_s(p) V^*_{i'b'_s b'_\pi}. \quad (5)$$

Là encore cette extension peut être dérivée selon le même principe à partir de la formulation pseudo maximin.

Afin d'évaluer nos formulations à observabilité totale, nous prenons le parti d'utiliser un des algorithmes de résolution exacte les plus décrits dans la littérature : *Value Iteration*. Nous devons toutefois faire remarquer que la non-convexité des fonctions de valeur décrites précédemment influencera à la baisse la qualité des solutions trouvées.

8 Expérimentations

8.1 Dispositif

Seules les formulations à observabilité totale ayant été évaluées, nous nous contenterons d'expliciter ici les éléments composant une simulation simple à observabilité totale du problème initial. Les formalismes exposés en section 5 sont suffisamment abstraits pour autoriser une modélisation plus complexe du monde et du comportement de la défense dans le cadre d'une implémentation du problème plus fidèle à la réalité. En effet, seul l'espace d'états de l'intrus est contraint à contenir sa position sur la grille. La définition de l'espace d'états du défenseur, de ses stratégies de défense et des différents modèles de transitions du jeu peuvent donc être librement ajustés sous réserve de satisfaire le lemme 1.

Pour les besoins de la simulation, nous dotons l'intrus d'un espace d'états $\mathcal{S}^I : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{O}$ où $\mathcal{O} = \{1, \ldots, 8\}$ dénote l'ensemble fini des 8 orientations cardinales. Les politiques du patrouilleur sont calculées sur l'espace d'états $\mathcal{S}^P : \mathcal{X} \times \mathcal{Y} \times \mathcal{O} \times \mathcal{L} \times \mathcal{M}$, avec $\mathcal{L} = \mathcal{Y}$ et $\mathcal{M} = \{0, 1\}$. Deux politiques sont attribuées à la défense. La première consiste à patrouiller sur la grille en suivant un parcours en $Boustrophedon$ comme le montre la Figure 2. La variable d'état $l \in \mathcal{L}$ désigne le numéro de la ligne que doit compléter le défenseur tandis que la variable $m \in \mathcal{M}$ renseigne sur le caractère ascendant ou descendant du parcours. Le second comportement $Cover$ consiste à protéger la cible. Sa politique est calculée en utilisant une fonction de récompense $\mathcal{R}^P$ similaire à $\mathcal{R}^I$. Le patrouilleur est également doté d'un champ de perception construit à partir de la fonction F_{xy}, résultat d'un mélange de fonctions logistiques :

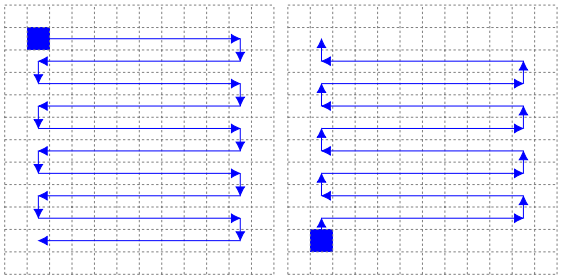
$$\begin{aligned}
f(t, a, r) &= \frac{1}{1 + ae^{-rt}}, \\
g(t, a, r, L) &= \max(f(t, a, r) - f(L, a, r), 0), \\
h(t, a, r, L) &= \frac{g(t, a, r, L)}{g(0, a, r, L)}, \\
F_x(x, a, r, L) &= h(|x|, a, r, L), \\
F_y(y, a, r, L) &= \begin{cases} 0 & \text{if } y \leq 0, \\ h(y, a, r, L) & \text{otherwise} \end{cases},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{xy}(x, a_x, r_x, L_x, \\
y, a_y, r_y, L_y) = \max(&F_x(x, a_x, r_x, L_x) + \\
&F_y(y, a_y, r_y, L_y) - 1, 0).
\end{aligned}$$

Cette fonction de perception permet d'engendrer différents champs de perception en faisant varier ses paramètres $a_x, r_x, L_x, a_y, r_y, L_y$. L_x et L_y contrôlent la profondeur de perception vers l'avant pour L_y et sur les flancs pour L_x. Les paramètres a et r ont quant à eux une action conjointe sur la rapidité de décroissance de la perception en fonction de l'éloignement au point $(0, 0)$. Comme le montre la Figure 3, F_{xy} représente l'intensité avec laquelle le patrouilleur perçoit chaque case de la gille lorsqu'il se situe en $(0, 0)$ et est orienté au nord. Le champ de perception $\mathcal{F}^P_{\mathcal{XY}}$ est donc obtenu de F_{xy} à partir d'une translation de vecteur $(p_\mathcal{X}, p_\mathcal{Y})$ puis d'une rotation d'angle $\omega = p_\mathcal{O} - \frac{\pi}{2}$. Enfin, nous fixons le modèle inter-politique du patrouilleur de manière à ce qu'il dépende de la probabilité de percevoir l'intrus : lorsque celle-ci est supérieure à 0.3 le patrouilleur défend la cible ($Cover$), sinon la transition vers $Cover$ (resp. $Boustrophedon$) suit une loi de Bernoulli de paramètre D^P_{ip}.

	$k' = Cover$	$k' = Boustrophedon$
$D^P_{ip} > 0.3$	1	0
$D^P_{ip} \leq 0.3$	D^P_{ip}	$1 - D^P_{ip}$

TABLE 1 – Modèle de transition inter-politique du patrouilleur $P(k'|k, i, p)$



(a) Parcours descendant (b) Parcours ascendant

FIGURE 2 – Parcours en boustrophedon du patrouilleur

Par simplicité, les deux drones partagent le même espace d'action : $\mathcal{A}^I = \mathcal{A}^P = \mathcal{A}$. Pour chaque position et orientation sur la grille, ils peuvent avancer vers les trois cases leur faisant face (voir Figure 4) :

$$\mathcal{A} = \{\text{GO-LEFT, GO-STRAIGHT, GO-RIGHT}\}.$$

Pour finir, la stochasticité de l'environnement représente, par exemple, l'action du vent sur les drones : nous fixons donc pour chaque action une probabilité de succès égale à 0.9 ainsi qu'une probabilité de dévier le drone à gauche ou à droite de 0.05.

©AfIA 2020

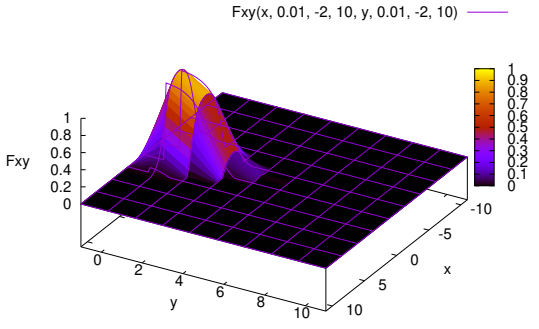


FIGURE 3 – La fonction de perception utilisée : mélange de fonctions logistiques

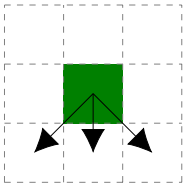
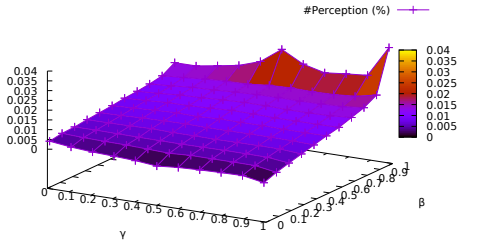
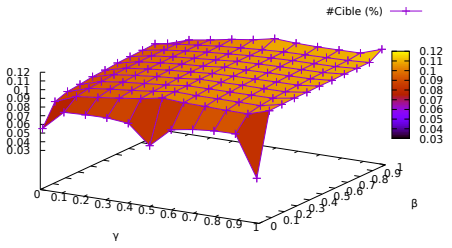


FIGURE 4 – Les trois actions possibles (orientation au sud).



(a) #Perception (%)



(b) #Cible (%)

FIGURE 5 – Nombre de perceptions (a) et d'arrivées à la cible (b) en fonctions des hyper-paramètres γ et β.

Nous basons notre évaluation sur le scénario suivant : la cible est située au centre de la grille $(\frac{N}{2}, \frac{N}{2})$, l'intrus est initialement en position $(1, N)$ orienté à l'est et le patrouilleur en (N, N) orienté à l'ouest. Il démarre sa patrouille par le comportement $Boustrophedon$ avec un parcours descendant en réalisant la ligne numéro N. Nous ne définissons pas d'état but : la simulation se déroule jusqu'à atteindre 30000 pas de temps.
Notre implémentation utilise la bibliothèque C++ MADP Toobox [9]. Nous évaluons notre preuve de concept avec un des algorithmes de résolution exacte les plus connus : *Value Iteration*. Les calculs sont effectués sur un serveur équipé de 4 processeurs AMD Opteron 6282SE (2.6 GHz) totalisant 64 coeurs et 512 GB de RAM. Il faut cependant noter que MADP n'utilise qu'un seul coeur lors de l'exécution de *Value Iteration*.

8.2 Protocole d'évaluation

Nous commençons dans un premier temps par rechercher des valeurs optimales pour les hyper-paramètres γ et β représentant respectivement le facteur d'atténuation du MDP de l'intrus et son coefficient de prise de risque. Pour cela, nous étudions les courbes montrant l'évolution du nombre moyen de perceptions et d'atteintes de la cible par pas de temps en fonction de γ et β (Figure 5). Elles sont calculées après 50 simulations du scénario pendant 30000 pas de temps sur une grille de taille $N = 8$.
Ces courbes mettent en lumière deux zones d'intérêt, centrées autour des points $(\gamma = 0.5, \beta = 0)$ et $(\gamma = 1, \beta = 0)$, au regard du critère de sélection suivant :

$$\pi' \geq \pi \Rightarrow \begin{cases} C(\pi') \geq C(\pi), \text{ si } P(\pi') = P(\pi), \\ P(\pi') < P(\pi), \text{ sinon,} \end{cases}$$

avec $C = \#Cible$ et $P = \#Perception$. Ce critère de sélection reflète l'objectif énoncé en section 4 : tandis que γ et le modèle de récompense favorisent la recherche de plus courts chemins vers la cible, il s'attache à minimiser en premier lieu le risque pris par l'intrus. Après recherche par Gridsearch dans ces zones d'intérêt, nous retenons les valeurs $\gamma = 0.99$ et $\beta = 1e^{-4}$.
Finalement, nous étudions l'évolution du temps de calcul, du nombre moyen de passages sur la cible, du nombre moyen de perceptions et de l'intensité moyenne de perception en fonction de la taille de la grille. Nous comparons notamment la formulation (1) « Normal » et la formulation (2) (3) « Maximin » avec deux formulations (1) « Beta = 0 » (resp. « Beta = 1 ») où $\beta = 0$ (resp. $\beta = 1$) ainsi qu'à une politique où l'intrus choisit une action selon une loi uniforme « Random ».

9 Résultats

Sans surprise, le temps de calcul par *Value Iteration* croit à un rythme exponentiel avec la taille de la grille (Figure 6). En effet, la taille de l'espace d'états est polynomiale en la taille de la grille :

$$|\mathcal{S}| = |\mathcal{S}^I| \times |\mathcal{S}^P| \times |\Pi^P| = 256N^5.$$

L'explosion combinatoire est cependant limitée par le nombre réduit de transitions possibles sur la grille ($\mathbb{O}(|\mathcal{S}| \times |\mathcal{A}|)$). Cela rend possible la résolution de grilles de taille modeste ($\approx 1.2e^4$ s pour $N = 10$) avec $|\mathcal{S}| = 2.56e^7$ états). Ce résultat est identique pour les formulations « Normal » et « Maximin ». Il s'explique par l'usage du para-

mètre $\beta = 1e^{-4}$ qui accélère grandement la convergence de (3) ajoutant seulement 3 itérations au calcul de « Maximin ». Il est à noter que l'échelle de la figure ne permet pas de visualiser les écart-types négligeables (de l'ordre de 0.1 s) devant les valeurs moyennes mesurées.

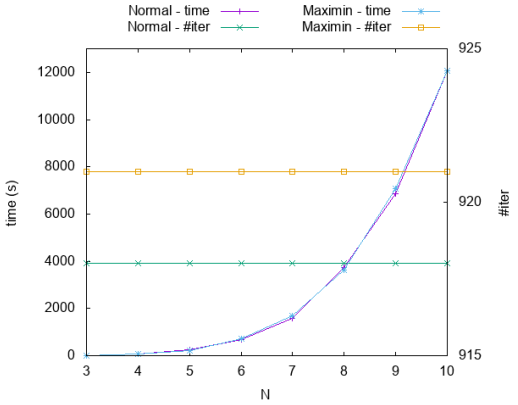


FIGURE 6 – Temps de calcul et nombre d'itérations

La Figure 7 montre quant à elle des taux de passage sur la cible intéressants. Le scénario « Normal » approche le plus favorable (« Beta = 1 ») lorsque la taille de grille augmente (8.31% vs 10.5% pour $N = 10$. Le scénario « Maximin » est conforme à nos attentes : il est plus performant que « Beta = 0 » (prise de risque minimale) et « Random » mais moins que « Normal », sa formulation le rendant plus paranoïaque. Ici encore, les écart-types de l'ordre de 0.1% pour les plus élevés sont difficilement perceptibles sur les différentes courbes.

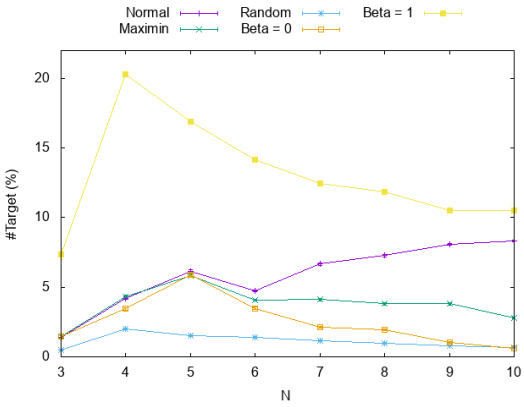


FIGURE 7 – Nombre de passages sur la cible (%)

Enfin, les Figures 8 et 9 montrent des taux de perceptions inférieurs à 0.1% dès que la grille est suffisamment grande ($N = 8$). Cela traduit le fait que l'intrus obtient suffisamment de place pour évoluer autour du patrouilleur. Ici encore le scénario « Normal » s'approche du plus favorable (« Beta = 0 ») avec un taux de perception inférieur à 0.001% pour $N = 10$. Bien que le scénario « Maximin » suit globalement la même tendance que « Normal », nous notons que l'intrus s'y fait plus souvent percevoir contrairement à notre hypothèse. Nous interprétons ce résultat par l'importance prise par le risque à long terme dans la formulation (2) (3). En favorisant les déplacements minimisant le risque à long terme moyen, le risque à court terme se trouve négligé et conduit à une dégradation des performances par rapport à la formulation (1). Une analyse plus fine reste cependant nécessaire afin d'infirmer ou de confirmer cette interprétation.

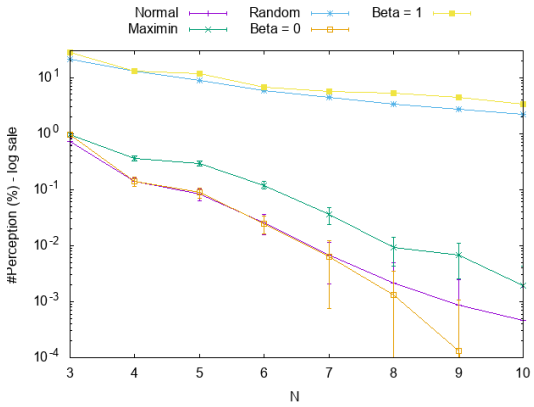


FIGURE 8 – Nombre de perceptions (%)

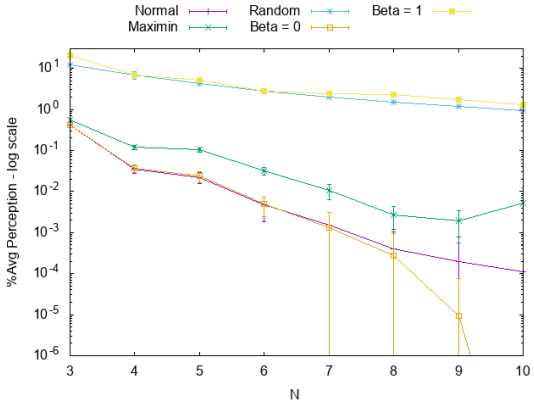


FIGURE 9 – Intensité moyenne de perception

10 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle approche pour la résolution d'un jeu de patrouille par des MDP augmentés à partir de trois modélisations intégrant au fur et à mesure différents niveaux d'observabilité partielle. Les résultats des expérimentations à observabilité totale valident notre approche. Bien que les formulations actuelles ne permettent pas de résoudre le problème sur de larges grilles ($N > 10$) comme nous l'ambitionnions en Figure 1, elles permettent de traiter des tailles de grille inaccessibles par les techniques classiques de résolution de jeux stochastiques. Les nombreux travaux de la littérature sur les MDP nous conduisent à envisager d'utiliser des techniques de compression de l'espace d'états [10] ainsi que de décomposition hiérarchique [13] afin de profiter des différentes sy-

©AfIA 2020

métries présentes et ainsi résoudre notre problème sur des grilles de tailles plus conséquentes ($N \geq 50$). Nous prévoyons également d'expérimenter des méthodes de résolution autres que *Value Iteration*, notamment des algorithmes de résolution approchée. Bien que certains d'entre eux ne nécessitent pas d'hypothèses sur la convexité des fonctions de valeur utilisées, une adaptation de nos fonctions d'utilité semble nécessaire afin d'obtenir des politiques représentant des optima globaux. Enfin, une comparaison de nos formulations avec leurs homologues dans le formalisme des jeux stochastiques permettra de positionner nos travaux par rapport à ces approches.

Références

[1] Tamer Basar and Geert Jan Olsder. *Dynamic noncooperative game theory*, volume 23. Siam, 1999.

[2] Ronald A Howard. *Dynamic programming and markov processes.* John Wiley, 1960.

[3] Sara Marie MC Carthy. *Hierarchical planning in security games ; A game theoretic approach to strategic, tactical and operational decision making.* PhD thesis, University of Southern California, 2018.

[4] Praveen Paruchuri, Jonathan P Pearce, Janusz Marecki, Milind Tambe, Fernando Ordonez, and Sarit Kraus. Efficient algorithms to solve bayesian stackelberg games for security applications. In *AAAI*, pages 1559–1562, 2008.

[5] James Pita, Manish Jain, Janusz Marecki, Fernando Ordóñez, Christopher Portway, Milind Tambe, Craig Western, Praveen Paruchuri, and Sarit Kraus. Deployed armor protection : the application of a game theoretic model for security at the los angeles international airport. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems : industrial track*, pages 125–132. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008.

[6] Yundi Qian, William B Haskell, Albert Xin Jiang, and Milind Tambe. Online planning for optimal protector strategies in resource conservation games. In *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, pages 733–740. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2014.

[7] Stuart J Russell and Peter Norvig. *Artificial intelligence : a modern approach*. Prentice-Hall, 1995.

[8] Eric Shieh, Bo An, Rong Yang, Milind Tambe, Craig Baldwin, Joseph DiRenzo, Ben Maule, and Garrett Meyer. Protect : A deployed game theoretic system to protect the ports of the united states. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*, pages 13–20. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012.

[9] Matthijs TJ Spaan, Frans A Oliehoek, et al. The multiagent decision process toolbox : software for decision-theoretic planning in multiagent systems. In *Proc. of the AAMAS Workshop on Multi-Agent Sequential Decision Making in Uncertain Domains (MSDM)*, pages 107–121, 2008.

[10] Jonathan Taylor, Doina Precup, and Prakash Panagaden. Bounding performance loss in approximate mdp homomorphisms. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, pages 1649–1656, 2009.

[11] Heinrich Von Stackelberg. *Marktform und gleichgewicht*. J. springer, 1934.

[12] Yevgeniy Vorobeychik and Satinder Singh. Computing stackelberg equilibria in discounted stochastic games. In *Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2012.

[13] Sha Yi, Changjoo Nam, and Katia Sycara. Indoor pursuit-evasion with hybrid hierarchical partially observable markov decision processes for multi-robot systems. In *Distributed Autonomous Robotic Systems*, pages 251–264. Springer, 2019.

[14] Zhengyu Yin, Albert Xin Jiang, Matthew P Johnson, Christopher Kiekintveld, Kevin Leyton-Brown, Tuomas Sandholm, Milind Tambe, and John P Sullivan. Trusts : Scheduling randomized patrols for fare inspection in transit systems. In *Twenty-Fourth IAAI Conference*, 2012.

Méthode d'analyse sémantique d'images combinant apprentissage profond et relations structurelles par appariement de graphes

J. Chopin[1,2], J.-B. Fasquel[1], H. Mouchère[2], I. Bloch[3], R. Dahyot [4]

[1] LARIS, Université d'Angers, Angers, France
[2] LS2N, Université de Nantes, France
[3] LTCI, Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, France
[4] School of Computer Science & Statistics, Trinity College Dublin, Ireland

Résumé

Nous proposons une méthode de segmentation sémantique d'images, combinant apprentissage profond et relations spatiales entre régions. Cette méthode repose sur l'appariement inexact de graphes, appliqué en sortie d'un réseau de neurones profond. Notre proposition est évaluée sur une base publique dédiée à la segmentation de visages, en mesurant l'IoU ("Intersection over Union") des boîtes englobantes des régions obtenues avec et sans utilisation des relations spatiales. Celles-ci permettent une amélioration de 2% en moyenne, et jusqu'à 24% dans certains cas.

Mots-clés

Vision par ordinateur, Apprentissage profond, Appariement inexact de graphes, Problème d'affectation quadratique.

Abstract

We propose a method for semantic image segmentation, combining a deep neural network and spatial relationships between image regions, encoded in a graph representation of the scene. Our proposal is based on inexact graph matching, applied to the output of a deep neural network. The proposed method is evaluated on a public dataset used for segmentation of images of faces. Preliminary results show that, in terms of IoU of region bounding boxes, the use of spatial relationships lead to an improvement of 2.4% *in average, and up to* 24.4% *for some regions.*

Keywords

Computer vision, Deep learning, Inexact graph matching, Quadratic assignment problem.

1 Introduction

L'apprentissage profond a montré son efficacité dans de nombreux domaines [8], en particulier pour la segmentation sémantique d'images en vision par ordinateur [7]. L'une des limites des approches par réseaux de neurones profonds est la nécessité de disposer d'un ensemble de données d'apprentissage vaste, représentatif et annoté [16]. De plus, la plupart de ces approches n'utilisent que les images elles-mêmes (les données), sans connaissance a priori sur les structures qu'elles contiennent et leur agencement spatial. De plus, ces méthodes nécessitent d'optimiser un grand nombre de paramètres.

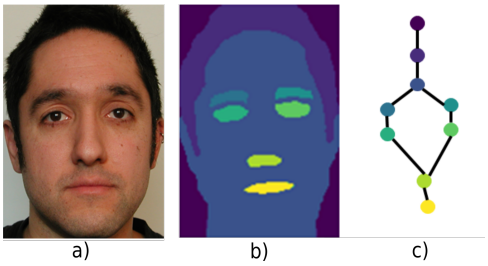


FIGURE 1 – Segmentation sémantique et relations spatiales. Les images sont extraites de la base de données publique FASSEG [10, 11]. a) Image initiale. b) Segmentation sémantique où chaque région appartient à une classe spécifique (par exemple l'oeil gauche, l'oeil droit). c) Relations spatiales modélisées par un graphe où chaque sommet correspond à une région spécifique de b : fond, cheveux, sourcil gauche/droit, oeil gauche/droit, nez, bouche. Les arêtes portent des relations correspondant aux distances entre les régions dans notre cas. Par souci de clarté, seules certaines arêtes du graphe complet sont affichées.

Ce type d'approche ignore les informations structurelles observables à haut-niveau. Cela peut concerner les relations spatiales entre différentes entités, comme l'illustre la figure 1 avec les positions relatives entre les principales régions du visage observées dans l'image annotée. Bien que souvent ignorées, ces informations structurelles ont montré leur potentiel dans de multiples travaux connexes, considérant des relations spatiales, d'inclusion ou de photométrie [1, 4, 5, 15], souvent appliquées à l'imagerie médicale [2, 3, 14]. Ces informations sont généralement représentées à l'aide de graphes, où les sommets correspondent à des régions et les arêtes portent les informations structurelles. L'identification des régions peut alors être réalisée par appariement de graphes [4, 5, 12], par raisonnement séquentiel dans les graphes, ou global par satisfaction de contraintes.

Dans ce contexte, nous proposons de combiner deux approches : les réseaux de neurones profonds qui s'avèrent

©AfIA 2020

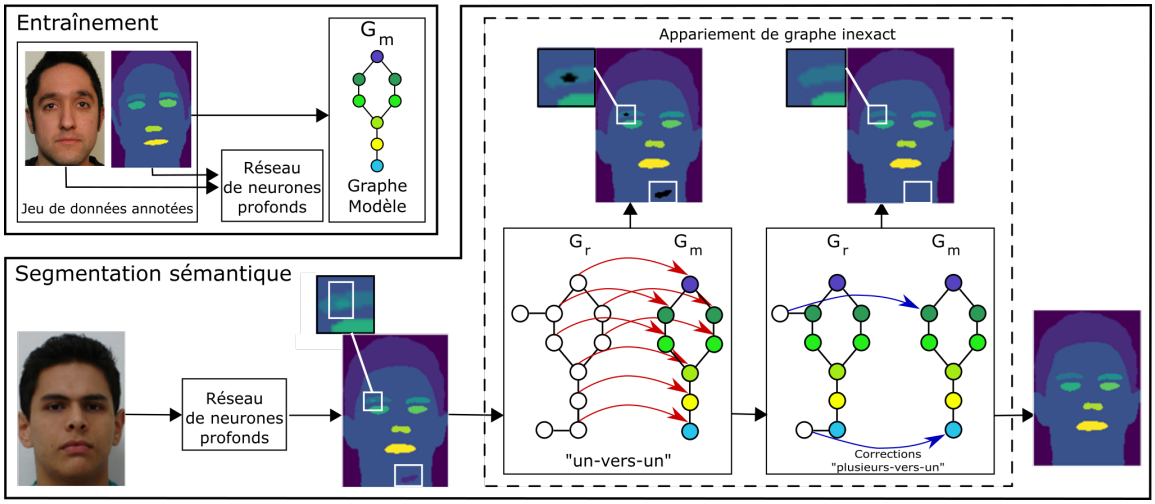


FIGURE 2 – Aperçu de la méthode. **Entraînement** : l'ensemble des données annotées est utilisé pour entraîner le réseau de neurones et construire un graphe modèle (similaire à celui de la figure 1-c). Par souci de clarté, bien que les graphes soient complets, seules quelques arêtes sont indiquées. La couleur des sommets correspond à la couleur des régions associées. **Segmentation sémantique** : le réseau de neurones produit une segmentation sémantique, éventuellement avec des artefacts (par exemple la région claire à l'intérieur du sourcil et la région sombre sur le cou). Un graphe G_r est ensuite construit à partir de cette segmentation et mis en correspondance avec le graphe modèle G_m. Cet appariement inexact entre graphes est réalisé en deux étapes : 1. les régions correctement segmentées sont récupérées (appariement un-vers-un), les artefacts étant ignorés (deux sommets restants dans cet exemple) ; 2. les artefacts restants sont mis en correspondance (appariement plusieurs-vers-un). Dans cet exemple, on peut voit que les deux artefacts sont correctement ré-étiquetés (voir les zones entourées).

efficaces mais nécessitent souvent de grands ensembles de données d'entraînement, et les graphes pour encoder des relations structurelles de haut niveau au sein d'images. Il est à noter que l'utilisation des réseaux de neurones profonds pour l'appariement de graphes est un sujet qui suscite actuellement beaucoup d'intérêt dans la communauté scientifique, pour des problèmes autres que la vision par ordinateur, par exemple en biologie, en sciences sociales, en linguistique [6, 9, 13]. A noter que ces travaux intègrent l'appariement de graphes dans le réseau de neurones profond, tandis que, dans notre cas, l'appariement est appliqué sur la sortie du réseau de neurones.

L'originalité de notre proposition concerne la formulation de la combinaison entre un réseau de neurones profond et l'appariement de graphes exploitant les relations spatiales, appliqué en sortie du réseau. Elle permet de corriger la segmentation sémantique, obtenue par l'utilisation de la carte de probabilité en sortie du réseau de neurones, en prenant en compte les relations spatiales observées dans la base de données annotées. L'utilisation de la structure spatiale globale de la scène permet également d'être moins sensible à la diversité (et donc à la taille) du jeu de données d'entraînement utilisé par le réseau de neurones.

La méthode proposée est détaillée dans la section 2. Des expériences préliminaires illustrant le potentiel de cette proposition sont présentées dans la section 3. La section 4 conclut le document par une discussion.

2 Apprentissage profond et connaissances structurelles

La figure 2 donne une vue d'ensemble de la méthode proposée avec les images considérées dans les expériences. À l'aide d'un ensemble de données d'apprentissage annoté, le réseau de neurones profond est entraîné à effectuer une segmentation sémantique. De plus, en utilisant uniquement les images annotées, les relations spatiales entre les différentes régions sont mesurées (telles que la moyenne des distances), ce qui conduit à un graphe modèle G_m où les sommets et les arêtes correspondent respectivement aux régions annotées et aux relations spatiales.

Lors du traitement d'une image inconnue, le réseau de neurones fournit une segmentation, à partir de laquelle un graphe d'hypothèse G_r est construit. Ce graphe est ensuite mis en correspondance avec le graphe modèle. L'objectif est de faire correspondre les sommets (et donc les régions sous-jacentes) produits par le réseau de neurones avec ceux du modèle, ce qui implique le ré-étiquetage de certaines régions (cf. appariement plusieurs-vers-un dans la figure 2). Cela produit une segmentation sémantique finale correspondant aux relations de haut niveau observées dans l'ensemble des données d'entraînement.

Nous détaillons ci-après l'étape de construction du graphe hypothèse à partir du réseau de neurones profond (Section 2.1) puis son appariement avec le graphe modèle (Section 2.2).

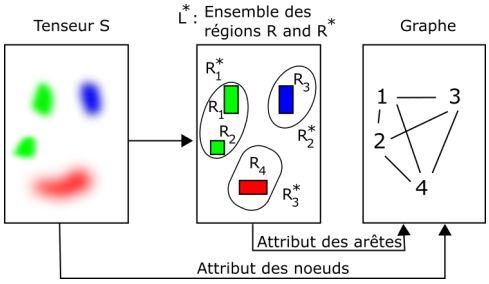


FIGURE 3 – Construction d'un graphe à partir du tenseur S et de la segmentation $\mathcal{L}^*$ qui en résulte. Chaque point de l'image de gauche est associé à un vecteur de probabilité représenté par des dégradés de couleurs. R_1^* est l'ensemble des régions (R_1 et R_2) qui appartiennent à la classe 1. Les attributs des arêtes sont calculés à partir des relations spatiales entre les régions R_i. Les attributs des sommets sont des vecteurs de probabilité moyens, calculés sur des régions R_i associées.

2.1 Construction des graphes

L'image d'entrée est traitée par le réseau de neurones qui produit, en sortie, un tenseur $S \in \mathbb{R}^{I \times J \times C}$ avec I la largeur (en pixels) de l'image, J la hauteur (en pixels) de l'image et C le nombre total de classes.
À l'emplacement du pixel (i, j), la valeur $S(i, j, c) \in [0, 1]$ est la probabilité d'appartenir à la classe c considérée dans la segmentation, avec les contraintes :

$$(\forall c = 1, \ldots, C,\ 0 \leq S(i,j,c) \leq 1) \wedge \left(\sum_{c=1}^{C} S(i,j,c) = 1 \right)$$

La carte de segmentation $\mathcal{L}^*$ sélectionne l'étiquette c de la classe ayant la plus forte probabilité :

$$\forall (i,j) \in \{1,.,I\} \times \{1,.,J\}, \quad \mathcal{L}^*(i,j) = \underset{c \in \{1,\ldots,C\}}{\arg\max}\, S(i,j,c)$$

À partir de cette carte de segmentation, nous définissons l'ensemble R de toutes les composantes connexes résultantes (voir figure 3, où $R = \{R_1, \cdots, R_4\}$). Nous définissons également un ensemble $R^* = \{R_1^*, \ldots, R_C^*\}$, où, pour chaque classe $c \in \{1, \cdots, C\}$, R_c^* est l'ensemble de régions correspondant aux composantes connexes appartenant à la classe c selon le réseau de neurones (voir figure 3, où $R^* = \{R_1^*, \ldots, R_3^*\}$). Cet ensemble R^* est utilisé pour contraindre l'appariement des graphes comme décrit dans la section 2.2.1.
À partir de l'ensemble R, une représentation structurelle est construite et modélisée par le graphe $G_r = (V_r, E_r, A, D)$, où V_r est l'ensemble des sommets, E_r l'ensemble des arêtes, A un interpréteur de sommets et D un interpréteur d'arêtes. Chaque sommet $v \in V_r$ est associé à une région $R_v \in R$ avec un attribut, fourni par la fonction A, qui est le vecteur de probabilité d'appartenance moyen sur l'ensemble des pixels $p = (i, j)$ composant R_v, donc calculé sur le tenseur S initial (voir figure 3) :

$$\forall v \in V_r, c \in \{1, \ldots, C\}, A(v)[c] = \frac{1}{|R_v|} \sum_{(i,j) \in R_v} S(i,j,c) \quad (1)$$

Nous considérons un graphe complet où chaque arête $e = (a, b) \in E_r$ a un attribut défini par la fonction D, associé à une relation entre les régions R_a et R_b (cf. figure 3). Dans notre cas, nous choisissons la distance minimale entre les deux régions :

$$\forall e = (a,b) \in E_r, D(e) = \min_{p \in R_a, q \in R_b} (\|p - q\|) \quad (2)$$

Le graphe modèle $G_m = (V_m, E_m, A, D)$, composé de C sommets (un sommet par classe), est construit à partir de l'ensemble d'entraînement. L'attribut d'un sommet sera un vecteur de dimension N avec une seule composante non nulle (de valeur égale à 1), associée à l'indice de la classe correspondante. Les arêtes E_m sont calculées en agrégeant les occurrences de relations entre les régions annotées des images d'entraînement. Dans cet article, la relation considérée est la distance minimale entre régions et l'agrégation est faite par leur moyenne.

2.2 Appariement avec le graphe modèle

Afin d'identifier les régions, l'objectif est d'associer chacun des sommets de G_r à un sommet du graphe modèle G_m. Selon l'hypothèse réaliste d'avoir plus de régions dans l'image associée à G_r que dans le modèle (c'est-à-dire $|V_r| \geq |V_m|$), nous sommes confrontés à un problème d'appariement inexact de graphes de type plusieurs-vers-un [12]. Nous proposons de formuler cet appariement comme un problème d'affectation quadratique (QAP, pour *Quadratic Assignement Problem*), comme cela a été récemment considéré [17].
Dans notre cas, la mise en correspondance est représentée par une matrice $X \in \{0,1\}^{|V_r| \times |V_m|}$, où $X_{ij} = 1$ signifie que le sommet $i \in V_r$ est mis en correspondance avec le sommet $j \in V_m$. Cela est illustré dans la figure 4 dans deux cas (correspondances "un-vers-un" et "plusieurs-vers-un"). L'objectif est de déterminer la meilleure correspondance (X^*), solution de :

$$X^* = \arg\min_X \left\{ \mathrm{vec}(X)^T K\, \mathrm{vec}(X) \right\} \quad (3)$$

où $\mathrm{vec}(X)$ est la représentation sous forme de vecteur colonne de la matrice X et T est l'opérateur de transposition. La matrice K, non détaillée ici par souci de concision (voir [17] pour plus de détails), intègre les mesures de dissimilarité entre les deux graphes G_r et G_m, au niveau des sommets (éléments diagonaux) et des arêtes (éléments non diagonaux) :

$$K = \alpha\, K_v + (1 - \alpha)\, \frac{K_e}{\max K_e} \quad (4)$$

où K_v intègre les dissimilarités entre les sommets (distance euclidienne entre les vecteurs de probabilité d'appartenance à une classe), et $\alpha \in [0, 1]$ un paramètre. Dans

©AfIA 2020

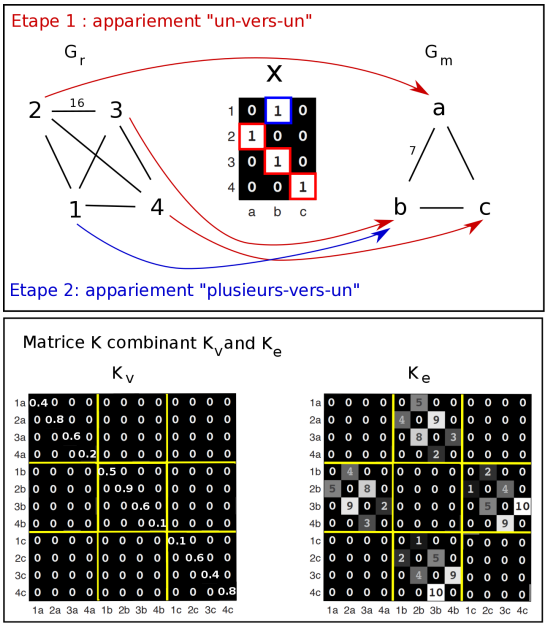


FIGURE 4 – Appariement de graphes formulé comme un QAP (illustration inspirée de [17]), où la matrice X matérialise un appariement entre les graphes G_r et G_m. La première étape (en rouge) vise à chercher une correspondance de type "un-vers-un" (chaque sommet de V_m est associé à un seul sommet de V_r). La deuxième étape (en bleu) vise à faire correspondre les sommets restants de G_r, ce qui conduit à un appariement final de type "plusieurs-vers-un". Pour trouver l'appariement optimal, la matrice K est utilisée, combinant les matrices K_v et K_e, qui mesurent respectivement les dissimilarités entre les sommets et les arêtes. Par souci de clarté, seuls les attributs scalaires de deux arêtes sont indiqués.

l'exemple considéré dans la figure 4, $K_v[1,1] = 0,4$ (ligne et colonne nommées `2a`) représente la dissimilarité, en termes de vecteurs de probabilité, entre les sommets 2 de G_r et a de G_m, si l'on faisait correspondre ces deux sommets.

La matrice K_e est liée aux dissimilarités entre les arêtes. Par exemple, dans la figure 4, $K_e[6,1] = 9$ (ligne et colonne respectivement nommées `3b` et `2a`) correspond à la dissimilarité entre les arêtes $(2,3) \in E_r$ (attribut scalaire valant 16) et $(a,b) \in E_m$ (attribut scalaire valant 7), si nous faisions correspondre simultanément le sommet 2 avec le sommet a et le sommet 3 avec le sommet b. Dans un tel cas, $K_e[6,1]$ est calculé en utilisant ces deux attributs : $K_e[6,1] = 16 - 7 = 9$. Les termes K_e sont liés aux distances entre les régions (normalisées dans la matrice finale K).

Le paramètre α ($\alpha \in [0,1]$) permet de pondérer la contribution relative des dissimilarités entre les sommets et les arêtes (les termes K_v varient entre 0 et 1, et K_e est normalisé selon l'équation 4).

En raison de la nature combinatoire de ce problème d'optimisation [17], nous proposons une procédure en deux étapes, s'appuyant sur la segmentation sémantique initiale fournie par le réseau de neurones, et consistant à :

1. rechercher une première correspondance "un-vers-un" (cf. figure 4- étape 1) ;
2. affiner l'appariement par la mise correspondance des sommets restants, conduisant finalement à une correspondance "plusieurs-vers-un" (cf. figure 4- étape 2).

2.2.1 Appariement initial : "un-vers-un"

On cherche la solution optimale à l'équation 3 en imposant les trois contraintes suivantes à X, réduisant ainsi l'espace de recherche pour les candidats éligibles :

1. $\sum_{j=1}^{|V_m|} X_{ij} \leq 1$: certains sommets i de G_r peuvent n'être associés à aucun sommet de G_m.
2. $\sum_{i=1}^{|V_r|} X_{ij} = 1$: chaque sommet j de G_m doit être associé à un seul sommet de G_r (cas des 1 entourés en rouge dans la figure 4).
3. $X_{ij} = 1 \Rightarrow R_i \in R_j^*$: le sommet $i \in V_r$ peut être mis en correspondance avec le sommet $j \in V_m$ si la région R_i associée a été initialement considérée par le réseau de neurones comme appartenant très probablement à la classe j ($R_i \in R_j^*$). Par exemple, dans le cas de la figure 3, seuls les sommets liés aux régions R_1 et R_2 seraient considérés comme candidats pour la classe 1 (R_1^*).

Les deux premières contraintes 1 et 2 assurent la recherche d'un appariement de type "un-vers-un". Grâce à la troisième contrainte, on réduit l'espace de recherche en s'appuyant sur le réseau de neurones : on suppose qu'il a correctement, au moins dans une certaine mesure, identifié les régions cibles, même si des artefacts peuvent encore avoir été produits (à gérer en affinant ultérieurement l'appariement). Cette étape nous permet de retrouver la structure générale des régions (modélisée par G_m).

2.2.2 Appariement final : "plusieurs-vers-un"

Nous associons chaque sommet k restant ($k \in V_r \mid \sum_{j=1}^{|V_m|} X_{kj} = 0$) au sommet $i^* \in V_r$ en considérant la fonction de coût suivante entre deux sommets i et k de G_r :

$$\text{cost}(i,k) = \alpha |A(k) - A(i)| + (1-\alpha) \frac{D(k) - D(i)}{\max_{u \in E_r} D(u)}. \quad (5)$$

$$i^* = \underset{i \in V_r \mid \sum_{k=1}^{|V_m|} X_{ik} = 1}{\text{argmin}} \text{cost}(i,k). \quad (6)$$

Selon cette formulation, il apparaît que les sommets restants sont appariés aux sommets de G_m en recherchant indirectement des correspondances avec les sommets déjà appariés de G_r. Par conséquent, on se concentre sur les similarités au sein de l'image actuelle et non avec le modèle. Dans la figure 4, cela correspond à trouver la correspondance entre les sommets 1 et b en étudiant indirectement la pertinence de la correspondance des sommets 1 et 3 (le sommet 3 étant déjà apparié avec le sommet b).

La formulation de l'équation 6 et concernant un seul sommet est similaire à la formulation matricielle des équations 3 et 4 (et concernant simultanément plusieurs sommets). La seule différence est que nous considérons les dissimilarités des sommets et des arêtes dans le graphe G_r au lieu de considérer les dissimilarités entre G_r et G_m.

3 Expérimentations

Nous présentons, ci-après, l'ensemble de données considéré, puis le protocole d'évaluation, et enfin les résultats.

3.1 Données

Nous considérons le jeu de données public FASSEG [1]. Celui-ci porte sur la segmentation sémantique multi-classes du visage [10] (cf. figure 1) ainsi que l'estimation de sa pose [11]. Pour cette étude préliminaire, nous considérons un sous-ensemble de ce jeu de données qui correspond à une pose spécifique (la vue de face) et contient 70 images.

FASSEG ne permet cependant pas de distinguer certaines régions du visage (c'est-à-dire l'œil gauche et l'œil droit, le sourcil gauche et le sourcil droit). Nous avons donc affiné les annotations afin de donner un label unique à ces régions (voir figure 5).

Image Initial labels Modified labels

FIGURE 5 – Étiquettes FASSEG modifiées.

3.2 Protocole d'évaluation

Pour les expériences, nous considérons le réseau neuronal U-Net [16] qui s'adapte bien à un ensemble d'entraînement avec un petit nombre d'échantillons. Nous avons aussi divisé notre ensemble de données comme suit : 20 images sont utilisées pour l'ensemble d'entraînement de référence, 10 pour l'ensemble de validation de référence et 40 pour l'ensemble de test de référence. De plus, 100 époques sont utilisées pour la formation du réseau.

Le graphe modèle est construit en calculant les distances moyennes (équation 2) entre les différentes régions annotées de l'ensemble d'entraînement. Le paramètre α est choisi empiriquement, sur la base d'observations sur certaines images, et est fixé à $0,4$ pour les expériences, mais sans aucune optimisation.

Comme cela a été étudié expérimentalement, une simple mesure de la distance entre les barycentres (centres de gravité) des régions est apparue inappropriée, en raison de la variabilité de la forme de certaines régions (par exemple les cheveux).

Nous évaluons la différence entre la qualité de la segmentation sémantique à la sortie des réseaux de neurones et celle après la mise en correspondance, c'est-à-dire avec l'intégration de l'information structurelle. Nous considérons l'*Intersection over Union* (IoU ou indice de Jaccard) pour évaluer la qualité de nos résultats par rapport à notre annotation manuelle utilisée comme vérité terrain. Cette mesure d'évaluation est utilisée pour comparer les régions au niveau des pixels et également au niveau des boîtes englobantes. Cette comparaison des boîtes englobantes nous permet de quantifier les erreurs de segmentation correspondant à une région principale correcte mais avec des erreurs liées à une ou plusieurs sous-régions éloignées de la région principale, et comprenant peu de pixels. Ces mesures sont effectuées pour chaque classe, la valeur moyenne globale étant également calculée.

Nous étudions également l'impact de la taille de la base d'apprentissage sur la qualité de notre segmentation sémantique. Des expériences sont réalisées pour différentes tailles, exprimées en pourcentage de la base de référence, à savoir 100 % (totalité des 20 images de l'ensemble d'entraînement et totalité des 10 images pour la validation), 75 % (15 images de l'ensemble d'entraînement et 7 images de l'ensemble de validation), 50 % et 25 % (5 images de l'ensemble d'entraînement et 2 pour la validation). Pour les tailles allant de 75 % à 25 %, les expériences sont effectuées 20 fois avec un tirage aléatoire des images utilisées pour l'entraînement et la validation, et les performances moyennes sont retenues.

3.3 Résultats quantitatifs

Les tables 1 et 2 fournissent des résultats respectivement en termes d'indice IoU pixel par pixel et d'indice IoU en termes de boîtes englobantes. Dans l'ensemble, la segmentation sémantique a été améliorée grâce à l'appariement de graphes, comme on peut le constater en moyenne sur l'ensemble des classes.

L'amélioration apparaît plus significative lorsque l'on utilise l'IoU sur les boîtes englobantes des régions (table 2) par rapport à l'IoU sur les régions elles-mêmes (table 1). Cela est dû au fait que, pour une classe donnée, l'IoU sur les boîtes englobantes est très sensible à la répartition spatiale des zones mal classées, même si ces zones sont de petite taille par rapport à l'ensemble de la région. La mesure d'IoU sur les régions est beaucoup moins sensible à ces erreurs, en particulier pour ces zones d'erreur de petite taille (d'autant plus pour des classes de grande taille telles que les cheveux ou le visage, contrairement aux sourcils et aux yeux par exemple). Ainsi, on peut noter, en considérant les boîtes englobantes, une amélioration très significative de $24,4$ % pour la classe *sourcil droit* (R-Br) avec une taille de jeu d'apprentissage de 50 % (table 2). L'utilisation de relations spatiales permet d'éviter les régions mal classées et spatialement incohérentes (telles que des cheveux trouvés entre le nez et l'oeil droit).

Les deux tables 1 et 2 illustrent également l'influence de la

1. L'ensemble de données publiques annotées FASSEG peut être téléchargé à l'adresse suivante : https ://github.com/massimomauro/FASSEG-dataset.

©AfIA 2020

TABLE 1 – Comparaison, mesurée à l'aide de l'IoU sur les régions, entre notre segmentation manuelle (de référence) et celle fournie par le U-Net uniquement (notée `U-Net`) ainsi que celle résultant de notre approche (notée `U-Net+GM`, où GM signifie *graph matching*). Les résultats sont fournis sous forme de moyenne et pour chaque classe : Bg (fond), Hr (cheveux), Fc (visage), L-br (sourcil gauche), R-br (sourcil droit), L-eye (oeil gauche), R-eye (oeil droit), Nose (nez) et Mouth (bouche). Les résultats sont également fournis pour les différentes tailles de base d'apprentissage.

		Classes									
Ensemble d'apprentissage (%)	Approche	Moyenne	Bg	Hr	Fc	L-br	R-br	L-eye	R-eye	Nose	Mouth
	U-Net	75,3	88,0	88,2	**91,9**	61,8	60,5	76,9	72,8	67,3	77,2
100	U-Net + GM	**75,4**	88,0	**88,9**	91,8	**62,1**	**60,7**	**77,0**	72,8	67,3	77,2
	U-Net	74,0	**88,5**	85,9	91,0	60,8	56,8	75,5	72,8	64,7	77,9
75	U-Net + GM	**74,3**	88,3	**86,8**	**91,1**	**61,7**	**57,5**	**75,6**	72,8	64,7	**78,0**
	U-Net	72,0	86,0	84,9	90,9	54,6	54,2	73,5	72,4	65,9	75,4
50	U-Net + GM	**73,7**	**86,7**	**86,9**	**91,0**	**59,9**	**57,9**	**74,5**	**72,5**	**66,1**	**75,6**
	U-Net	38,2	**84,5**	83,6	56,8	2,4	28,1	61,7	25,6	**57,7**	70,0
25	U-Net + GM	**39,8**	83,8	**86,4**	**61,0**	**2,7**	**30,6**	**65,7**	**26,5**	55,1	**71,4**

TABLE 2 – Comparaison, mesurée à l'aide de l'indice IoU sur les boîtes englobantes des régions, entre la segmentation manuelle et celle fournie par le U-Net (`U-Net`) ainsi que celle résultant de notre approche (`U-Net+GM`, où GM signifie *graph matching*). Les résultats sont fournis sous forme de moyenne et pour chaque classe : Bg (fond), Hr (cheveux), Fc (visage), L-br (sourcil gauche), R-br (sourcil droit), L-eye (oeil gauche), R-eye (oeil droit), Nose (nez) et Mouth (bouche). Les résultats sont également fournis pour les différentes tailles de base d'apprentissage.

		Classes									
Ensemble d'apprentissage (%)	Approche	Moyenne	Bg	Hr	Fc	L-br	R-br	L-eye	R-eye	Nose	Mouth
	U-Net	76,0	84,0	82,5	96,1	66,3	63,6	74,0	75,1	69,0	78,2
100	U-Net + GM	**78,4**	84,0	**92,4**	96,1	**66,5**	**68,3**	**79,4**	**75,2**	**70,4**	**78,9**
	U-Net	74,7	84,0	74,5	95,8	66,7	59,5	78,0	**75,1**	64,9	79,8
75	U-Net + GM	**77,5**	84,0	**84,9**	**96,1**	**66,8**	**69,2**	**78,8**	75,0	**67,5**	**79,9**
	U-Net	68,0	85,4	75,7	**94,5**	52,4	41,8	77,7	66,6	63,8	70,6
50	U-Net + GM	**76,5**	85,4	**86,0**	94,4	**65,3**	**66,2**	**78,5**	**74,9**	**68,5**	**74,7**
	U-Net	36,3	**81,2**	80,1	**90,5**	1,7	33,7	**68,4**	12,8	55,1	66,9
25	U-Net + GM	**42,3**	78,0	**90,1**	82,8	**2,9**	**34,8**	65,9	**27,4**	**59,3**	**70,1**

réduction de la base d'apprentissage. Il apparaît que plus la base est réduite, plus l'apport des relations spatiales de haut niveau est important (cela étant très significatif dans la table 2).
Il est à noter que, pour une base d'apprentissage de seulement 25 %, en fonction d'un tirage aléatoire réalisé, certains réseaux semblaient incapables de proposer des régions candidates pour certaines classes sur certaines images de test. Cela est dû à la faible représentativité de la base d'apprentissage. Dans ces cas, la mise en correspondance des graphes échoue en raison de l'absence de candidats pour certaines classes, ce qui n'est pas encore géré par notre approche. C'est pourquoi, pour un taux de 25 %, les résultats présentés dans les tables 1 et 2 ignorent ces cas, et les performances rapportées ne sont moyennées que sur des images de test segmentées fournissant au moins une région par classe (48,9 % des images ne sont pas prises en compte).

3.4 Résultats qualitatifs de la segmentation

Les figures 6 et 7 donnent quelques exemples de segmentations sémantiques avec le U-Net et notre approche.
La figure 6 donne quelques exemples représentatifs. Comme on peut l'observer visuellement, les améliorations sont significatives dans de nombreux cas (cf. figure 6 - image 75 % : cheveux en bas du visage). Même pour un petit ensemble de données d'entraînement, les informations structurelles peuvent améliorer la segmentation, parfois seulement partiellement dans le cas de sorties U-Net vraiment dégradées (cf. figure 6 - image 25 %).

La figure 7 se concentre sur la réduction de la base de données d'apprentissage pour illustrer la robustesse de notre approche. Ces exemples représentatifs illustrent comment la réduction de la base de données détériore la segmentation en utilisant uniquement des réseaux neuronaux profonds. Cela montre comment notre approche, intégrant des contraintes spatiales globales, peut compenser de manière significative la perte de diversité de l'ensemble des données d'apprentissage.

3.5 Complexité algorithmique

La table 3 indique les durées d'exécution mesurées (moyenne sur les 40 images utilisées pour les tests), pour différentes tailles de la base de données d'apprentissage. Il s'agit d'une estimation brute, pour ce domaine d'application, des durées d'exécution sans détailler le coût de chaque étape, et sans aucune tentative d'optimisation du code, écrit en Python (utilisation de `numpy` pour l'algèbre linéaire). A noter que les programmes ont été exécutés sur un noyau Intel I7, sans GPU. Les durées d'exécution sont plus faibles pour une grande taille de base de données d'apprentissage, car le réseau U-Net produit moins d'artefacts, ce qui réduit le nombre de sommets dans G_r et donc le temps d'appariement.

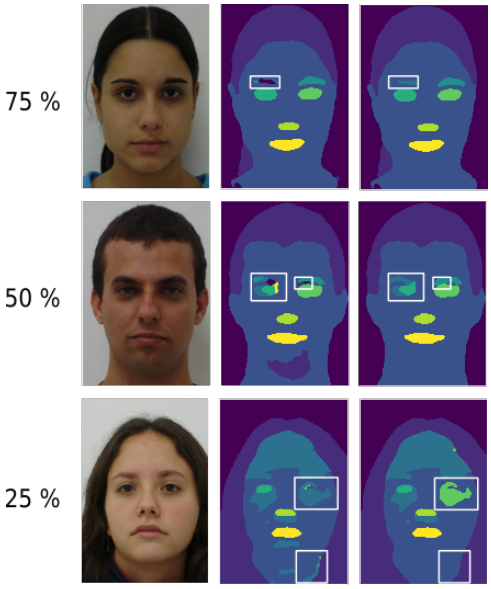


FIGURE 6 – Exemples de résultats de segmentation (image initiale, résultat avec U-Net, résultat avec l'approche proposée), pour différentes tailles de la base d'apprentissage (75%, 50% et 25%).

TABLE 3 – Durée d'exécution de l'ensemble des données de test, en secondes. Moins nous utilisons de données pendant la phase d'apprentissage, plus il faudra de temps pour traiter une image de test, comme le montre l'augmentation du temps moyen.

Apprentissage (%)	Moyenne	Ecart-type	Médiane	Min	Max
100	28,5	2,3	27,8	25,4	34,1
75	39,4	29,8	27,4	25,1	372,6
50	81,0	791,0	31,0	24,7	20165,9
25	171,5	599,2	49,1	25,3	7363,8

4 Discussion et perspectives

L'approche proposée semble efficace pour améliorer la segmentation sémantique réalisée par le réseau neuronal profond U-Net. L'amélioration semble particulièrement significative pour certaines classes (jusqu'à $24,4$ % pour la classe *sourcil droit*, comparé à l'amélioration moyenne de 8,5 % en considérant l'IoU sur les boîtes englobantes avec un pourcentage de la base d'apprentissage de 50 %). Cela est dû à la nature des informations considérées, qui semblent très complémentaires aux informations de bas niveau (au niveau des pixels) considérées par le U-Net, qui ignore intrinsèquement les relations spatiales observées à haut niveau. Un autre point fort de notre approche est sa capacité à compenser les erreurs de segmentation résultant de la réduction de la base de données d'apprentissage. C'est un aspect important car sa taille est une limitation forte de l'apprentissage profond, comme cela a été souligné dans l'introduction.

Bien que prometteuse, notre approche présente quelques limites. Premièrement, notre approche est invariante en translation et en rotation, mais pas encore en échelle. On pourrait y remédier en introduisant un facteur d'échelle (à estimer automatiquement) dans le processus d'appariement (notamment en ce qui concerne le calcul de la matrice K figurant dans l'équation 3).

Deuxièmement, les occultations partielles dans les images qui pourraient affecter le calcul du graphe G_r sont des cas qui ne sont pas encore pris en compte dans notre formulation actuelle. En effet, on suppose que chaque sommet (région) correspond nécessairement à une région du modèle. Le traitement des occultations pourrait être géré en assouplissant les hypothèses relatives à l'appariement aux sommets du modèle.

Troisièmement, nous n'avons pas étudié, dans cet exemple applicatif, la robustesse de notre approche vis-à-vis du changement de pose qui pourrait modifier les relations spatiales. Il est à noter que d'autres domaines d'application de notre technique, comme la segmentation d'images médicales en 3D, peuvent ne pas présenter les mêmes défis en pratique que la segmentation de visage présentée ici. Pour supporter une forte variation dans les relations spatiales, une solution pourrait être de considérer un ensemble de graphes modèles représentatifs au lieu d'un seul, avec la difficulté sous-jacente de choisir le modèle approprié lors de la segmentation d'une image.

Enfin, la réduction du temps de calcul peut être cruciale dans certains scénarios d'application. En particulier, la grande complexité de la première étape (formulée comme un QAP) peut impliquer une augmentation considérable du temps de calcul, si le nombre de classes et de régions augmente. Néanmoins, les estimations brutes fournies dans le document sont encourageantes et des améliorations supplémentaires pourraient être recherchées en utilisant du matériel spécialisé (par exemple, GPU).

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une méthode originale combinant les relations spatiales avec un apprentissage profond pour la segmentation sémantique. Les résultats préliminaires montrent le potentiel de cette approche, avec des améliorations significatives dans certains cas tout en nous permettant de réduire la taille de la base d'apprentissage requise.

L'amélioration obtenue est de 8,5% en moyenne, par rapport à la segmentation sémantique résultant du réseau neuronal U-Net, entraîné avec seulement 50% de l'ensemble de données d'apprentissage disponible.

Les travaux futurs se concentreront sur l'invariance par changement d'échelle, une évaluation plus fine de la complexité et sur des expériences dans d'autres domaines d'application.

Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du programme région Atlanstic2020 (Recherche, Formation et Innovation en Pays de la Loire), soutenu par la région des Pays de la Loire et le fonds européen de développement.

©AfIA 2020

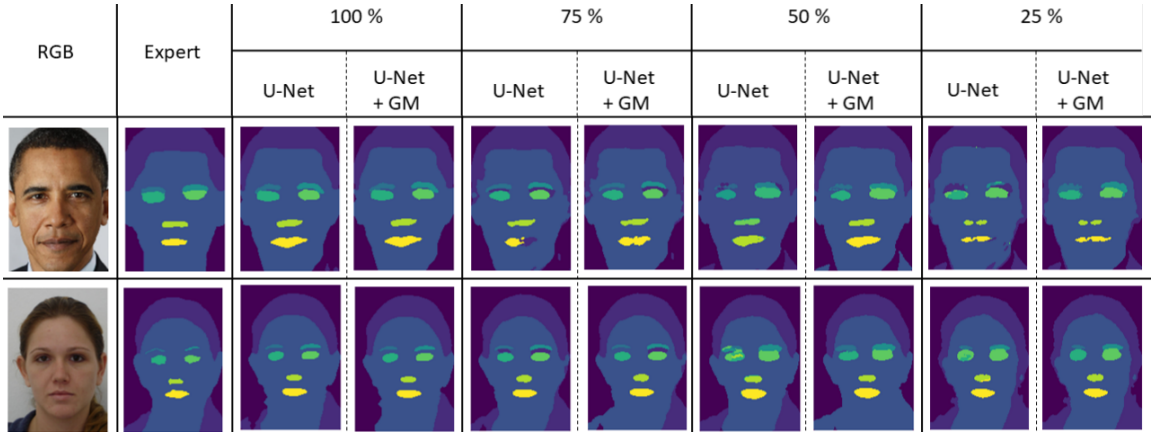


FIGURE 7 – Influence de la taille de la base de données d'apprentissage (de 100 % à 25 %) avec comme exemples des résultats obtenus sur 2 images représentatives.

Références

[1] I. Bloch. Fuzzy sets for image processing and understanding. *Fuzzy Sets and Systems*, 281 :280–291, 2015.

[2] O. Colliot, O. Camara, and I. Bloch. Integration of fuzzy spatial relations in deformable models - application to brain MRI segmentation. *Pattern Recognition*, 39 :1401–1414, 2006.

[3] J.-B. Fasquel, V. Agnus, J. Moreau, L. Soler, and J. Marescaux. An interactive medical image segmentation system based on the optimal management of regions of interest using topological medical knowledge. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 82 :216–230, 2006.

[4] J.-B. Fasquel and N. Delanoue. An approach for sequential image interpretation using a priori binary perceptual topological and photometric knowledge and k-means based segmentation. *Journal of the Optical Society of America A*, 35(6) :936–945, 2018.

[5] J.-B. Fasquel and N. Delanoue. A graph based image interpretation method using a priori qualitative inclusion and photometric relationships. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(5) :1043–1055, 2019.

[6] H. Gao and S. Ji. Graph U-Nets. In K. Chaudhuri and R. Salakhutdinov, editors, *36th International Conference on Machine Learning*, volume 97, pages 2083–2092, 2019.

[7] A. Garcia-Garcia, S. Orts-Escolano, S. Oprea, V. Villena-Martinez, P. Martinez-Gonzalez, and J. Garcia-Rodriguez. A survey on deep learning techniques for image and video semantic segmentation. *Applied Soft Computing*, 70 :41 – 65, 2018.

[8] I. J. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville. *Deep Learning*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 2016.

[9] P. Goyal and E. Ferrara. Graph embedding techniques, applications, and performance : A survey. *Knowledge-Based Systems*, 151 :78 – 94, 2018.

[10] K. Khan, M. Mauro, and R. Leonardi. Multi-class semantic segmentation of faces. In *IEEE International Conference on Image Processing*, pages 827–831, 2015.

[11] K. Khan, M. Mauro, P. Migliorati, and R. Leonardi. Head pose estimation through multi-class face segmentation. In *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pages 175–180, 2017.

[12] O. Lezoray and L. Grady. *Image Processing and Analysis with Graphs : Theory and Practice*. Digital Imaging and Computer Vision. CRC Press, 2012.

[13] Z. Li, L. Zhang, and G. Song. GCN-LASE : Towards adequately incorporating link attributes in graph convolutional networks. In *Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 2959–2965, 2019.

[14] A. Moreno, C.M. Takemura, O. Colliot, O. Camara, and I. Bloch. Using anatomical knowledge expressed as fuzzy constraints to segment the heart in CT images. *Pattern Recognition*, 41(8) :2525 – 2540, 2008.

[15] O. Nempont, J. Atif, and I. Bloch. A constraint propagation approach to structural model based image segmentation and recognition. *Information Sciences*, 246 :1–27, 2013.

[16] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox. U-Net : Convolutional networks for biomedical image segmentation. In N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, and A. F. Frangi, editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 234–241. Springer, 2015.

[17] F. Zhou and F. De la Torre. Factorized graph matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(9) :1774–1789, 2016.

Vers une démarche ontologique pour la capitalisation des données de l'agroforesterie

Raphaël Conde Salazar[1,3], Fabien Liagre[2], Isabelle Mougenot[3] , Jérôme Perez[1], Alexia Stokes[1]

[1] AMAP , Université de Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, France
[2] AGROOF, Anduze, France
[3] Université de Montpellier, UMR 228 ESPACE-DEV, Espace pour le Développement, Montpellier, France

raphael.conde_salazar@cirad.fr, liagre@agroof.net, isabelle.mougenot@umontpellier.fr, jerome.perez@ird.fr, alexia.stokes@cirad.fr

Résumé

Dans un contexte de développement durable, les recherches menées en agroforesterie prennent tout leur sens en rendant intelligibles les interactions plante-plante dans un environnement pouvant être dégradé. L'agroforesterie est interdisciplinaire par nature, et mobilise, les sciences du vivant et de l'environnement au sein d'approches systémiques. Ainsi, les données d'observation sur le terrain sont acquises par plusieurs catégories d'acteurs. Difficilement exploitables, de par la multiplicité des supports, des formats et des langages de spécialité utilisés. De plus, elle fait appel à d'autres domaines de connaissances, comme la climatologie ou la pédologie. En conséquence, nous proposons un modèle de gestion des connaissances volontairement générique qui devrait permettre aux acteurs de l'agroforesterie de gérer, analyser, intégrer et partager des données hétérogènes et de provenances diverses. Ce modèle, qui se veut une base à la capitalisation et au partage des connaissances en agroforesterie, se compose d'une ontologie de domaine nommée "Agroforestry" dont les éléments sont enrichis sémantiquement par des termes issus d'ontologies terminologiques, à l'exemple d'Agrovoc ou encore de Plant Ontology. L'ontologie Agroforestry s'adosse à trois ontologies de plus haut niveau, qui sont : SOSA pour les évènements liés à de l'observation, GeoSPARQL et OWL-Time pour les dimensions spatiale et temporelle. Une telle réutilisation de l'existant nous permet de proposer un système de gestion des connaissances ouvert et flexible à même de refléter la complexité des données collectées jusqu'alors en agroforesterie. Le modèle de connaissances est construit de sorte à pouvoir s'interfacer avec d'autres modèles de connaissances déjà rendus disponibles sur le Web. L'expertise en agroforesterie, en lien avec d'autres domaines d'expertise sur le Web, facilitera la création de services sémantiques et d'outils d'aide à la décision, et fournira ainsi des solutions adaptées aux pratiques actuelles de l'agroforesterie.

Mots-clés

Agroforesterie, Système de gestion des connaissances, Ontologie, OWL, Logiques de Description.

1 Introduction

Le développement de l'agriculture intensive en Europe conduit, depuis une cinquantaine d'années, à un épuisement graduel des sols [7]. Les effets du réchauffement climatique commencent également, à peser sur l'agriculture Européenne [30]. En parallèle, l'augmentation de la population humaine et l'appauvrissement des ressources nécessaires (eau et énergies fossiles en particulier) au fonctionnement de l'agriculture se poursuivent de façon continue. Ces constats nous conduisent à repenser l'agriculture, à la fois pour préserver les ressources et renforcer l'usage de pratiques respectueuses de l'environnement, dans le but de la rendre à la fois compétitive et durable. Parmi les alternatives proposées, l'agroforesterie semble offrir des solutions efficaces pour relever les défis d'une agriculture raisonnée. L'agroforesterie consiste en la réintroduction des arbres dans les métiers de l'agriculture. Ses formes les plus habituelles sont l'agrisylviculture (arbres destinés à la production de bois avec cultures intercalaires (céréales, maïs, orge...)) et le sylvopastoralisme (association sur un même espace d'activités sylvicoles et pastorales), même si d'autres pratiques agricoles peuvent également s'y associer comme l'apiculture ou l'aquaculture. Il ne s'agit pas d'une simple plantation d'arbres, mais d'une association étroite entre les arbres et l'agriculture afin d'obtenir une réelle synergie, bénéfique pour les deux parties [14]. Cette synergie permet, entre autres choses, la limitation des intrants (eau, engrais et pesticides) dans les pratiques agricoles dans une perspective de développement durable. Si certaines pratiques agroforestières ont pu résister en Europe, au cours des cent dernières années, à l'exemple des prés-vergers de Normandie [11], face aux politiques de mécanisation (l'arbre y est considéré comme un obstacle) et de remembrement, le savoir-faire en agroforesterie a peu à peu disparu au fil des générations. Nous avons donc besoin aujourd'hui d'indicateurs pour gérer au mieux les ressources dans le cadre d'une pratique moderne et intégrée de l'agroforesterie. Les données issues des observations de terrain, acquises en partenariat avec plusieurs catégories d'acteurs (en particulier naturalistes, forestiers, agri-

©AfIA 2020

culteurs, éleveurs), dans le cadre d'expériences agroforestières s'accumulent depuis plusieurs années déjà [25]. La gestion et la réutilisation de ces données sont rendues difficiles par la multiplicité des supports et des formats utilisés, et par la diversité des acteurs et de leurs vocabulaires métiers. En outre, les études agroforestières nécessitent des approches systémiques pour comprendre, par exemple, comment mieux gérer un site, en réponse au changement climatique, aux ravageurs, ou à la pollution du sol. Ces réponses se doivent de considérer les liens étroits tissés avec d'autres domaines de connaissance tels que la climatologie, la zoologie ou encore la pédologie. Actuellement, à notre connaissance, il n'existe pas de système de capitalisation des données pour décrire les aménagements agroforestiers. Des classifications [29] ;[37] pour les systèmes agroforestiers existent bien, et fournissent un cadre pour l'évaluation des aménagements en vue de leur comparaison et amélioration, mais l'agroforesterie ne dispose pas d'une ontologie terminologique stricto sensu [35] spécifique à son domaine, même si un premier travail de construction d'un thésaurus est en cours de réalisation [5]. Pour aider la communauté agroforestière dans l'exploitation et le partage de ses données, et afin de rendre compte de l'évolution et de l'efficacité des aménagements déjà en place, nous proposons de construire un système de gestion des connaissances [1] dédié à l'agroforesterie qui réutilise des ontologies standards empruntées au Web sémantique [10]. Nous proposons ainsi un modèle de connaissances, ou ontologie cadre, nommé "Agroforestry", présenté en section 2, destiné à l'organisation des différents éléments constitutifs des aménagements agroforestiers les plus habituels. L'originalité de notre travail réside dans le fait que la structure du modèle "Agroforestry" s'appuie en grande partie sur l'interconnexion de différentes ontologies et onto-terminologies existantes. L'objectif est de mobiliser l'existant notamment dans le contexte de l'agriculture et des sciences environnementales, et de pouvoir à terme ré-exploiter des jeux de données ouverts et liés issus de ces domaines. Dans la sous-section 2.5, nous illustrons la mise en œuvre du système de connaissances construit, au travers d'un cas d'usage portant sur une parcelle agroforestière du domaine de Restinclières dans le sud de la France.

2 Une ontologie cadre pour l'agroforesterie

2.1 État de l'art

L'ontologie est à l'origine une notion philosophique dérivée de la pensée aristotélicienne, qui signifie "théorie de l'être". En informatique, nous reprendrons la définition donnée par Uschold et Gruninger [40], qui fait de l'ontologie une compréhension partagée d'un domaine d'intérêt. Une ontologie définit donc de manière explicite, consensuelle et formelle, les termes utilisés pour décrire et représenter un champ de connaissances. Si l'ontologie, le thésaurus et la taxonomie ont en commun de fournir un vocabulaire contrôlé où les termes et concepts sont organisés hiérarchiquement, leur utilisation et leur vocation divergent dans le monde de la représentation du savoir. En effet, les taxonomies sont utilisées pour classer des objets, les thésaurus pour indexer et rechercher des informations au sein de documents, et les ontologies apportent une rupture dans la description des connaissances, en permettant de raisonner sur les différentes connaissances d'un domaine, et d'en dégager collectivement de nouveaux savoirs. En droite ligne avec nos besoins, nous distinguerons les ontologies terminologiques, des ontologies cadres. Les ontologies terminologiques, ou ontoterminologies se concentrent plutôt sur la dénomination des concepts d'un domaine, en en fournissant les définitions et les termes linguistiques associés. De fait, les relations entre les termes désignant les concepts sont principalement des relations de généralisation/spécialisation ou encore de proximité sémantique. Les ontologies cadres sont, de leurs côtés, orientées vers la modélisation des notions mentales associées aux concepts et servent donc à restituer la connaissance du domaine. L'accent est alors mis sur l'expression des relations entre les concepts de haut niveau à des fins d'analyse et de manipulation. L'agroforesterie est définie par [27], comme désignant un ensemble de pratiques pour lesquelles les arbres sont intégrés aux cultures agricoles et/ou à l'élevage, sur une parcelle présentant une certaine forme d'arrangement spatial (et séquentialité temporelle). Le temps se révèle aussi une dimension importante, puisque des rotations de plantation sont également réalisées au travers du temps sur la parcelle considérée. Il est acté [26] qu'il existe un manque de compréhension quantitative et prévisionnelle au sujet des pratiques agroforestières et de leur importance afin d'en faciliter l'adoption. Nous pensons qu'un système qualitatif de gestion de connaissances associées aux aménagements agroforestiers et à leur temporalité fait également défaut. Ce système peut ensuite servir de socle à de la prévision et de la prise de décision concernant les parcelles agroforestières. Une des premières difficultés est d'arriver à prendre en charge les spécificités de l'agroforesterie [44], notamment face aux pratiques agricoles plus usuelles dans les pays occidentaux. En effet, il existe différentes initiatives en agriculture qui proposent des modèles conceptuels et des systèmes d'information ou à base de connaissances, avec des objectifs similaires aux nôtres. Ainsi, le consortium ICASA (International Consortium for Agricultural Systems Applications) [43] fournit modèles et standards de données pour l'intégration de données provenant d'expérimentations conduites dans des parcelles agricoles. Le sol, le climat et la réponse des céréales cultivées aux conditions expérimentales sont au cœur de ces modèles. L'objectif est de faciliter les usages autour de la collecte et de l'échange de données, et in fine d'en faciliter l'analyse au travers de systèmes centrés sur de la simulation ou de l'aide à la décision. Le projet GIEA (Gestion des Informations de l'Exploitation Agricole) [13] s'adosse à l'expertise humaine pour identifier les concepts clés relatifs à la communauté de pratique en agriculture et dégager un langage métier commun à l'ensemble des acteurs qui va permettre la compréhension des données échangées. Trois

sous-thèmes ont été investis à cet effet, à savoir le sol, l'élevage et l'exploitation. Le projet FOODIE (Farm-Oriented Open Data in Europe) [31] s'appuie sur les directives INSPIRE (Infrastructure pour l'Information Spatiale au niveau Européen) qui portent à la fois sur les standards ISO/OGC visant à cadrer la représentation de l'information géographique, et des spécifications qui viennent s'y ajouter pour l'agriculture et l'aquaculture [1], pour en décliner une version en langage OWL à partir des diagrammes de classes UML. L'ontologie nommée FOODIE ainsi construite, a été produite par application des règles de conversion définies dans ISO 19150-2 [19]. Si FOODIE a été exploitée pour des besoins en agriculture de précision, il n'en va pas de même pour l'agroforesterie, et certains des concepts définis dans FOODIE ne sont pas pensés pour la structuration d'aménagements mettant en jeu plusieurs cultures. L'exemple du concept "Plot" qui est défini comme étant une "zone agricole continue plantée d'une espèce végétale cultivée" est un exemple de cette difficulté à prendre en charge toute la complexité de l'agroforesterie, et en particulier des interactions pouvant être bénéfiques entre espèces cultivées. D'autres travaux [2] ;[3] ;[39] menés dans les sciences environnementales ont également retenu notre attention. Il s'agit de travaux qui s'articulent autour de la notion clé d'observation et qui, pour ce faire, font appel à l'ontologie SOSA [21]. En agroforesterie, tout comme en agriculture, la notion d'observation est fondamentale, et va sous-tendre les analyses conduites à partir de mesures collectées à partir de tout élément d'intérêt : plante cultivée en réponse à son environnement, composition du sol, pluviométrie, aménagement agroforestier à l'exemple d'une culture en allée, ou encore interaction entre deux espèces différentes (plante et/ou animal).

2.2 Positionnement

Pour qu'un tel système sémantique, dédié aux aménagements agroforestiers, soit partagé par l'ensemble des acteurs de l'agroforesterie, voire par les acteurs d'autres domaines si l'on considère la nature systémique de l'agroforesterie, il semble essentiel de maintenir un haut niveau de généricité dans la définition de l'ontologie. La vision retenue est la suivante : une parcelle agroforestière évolue dans le temps et dans l'espace, et a pour sous-parties, des éléments biotiques et abiotiques, qui sont envisagés comme des éléments simples ou décomposables, qui possèdent des propriétés intrinsèques (caractéristiques propres), et qui nouent des interrelations de différentes natures. Nous nous intéressons, en particulier, aux relations spatiales qui sous-tendent les différents aménagements propres à chaque parcelle. Tout élément, propriété ou relation de l'ontologie est potentiellement enrichi par un ou plusieurs termes issus d'ontologies terminologiques. Ces termes utilisés pour qualifier chaque élément d'un aménagement agroforestier, ainsi que leurs propriétés et leurs inter-relations, impliquent la réutilisation d'ontologies terminologiques existantes (AGROVOC [8], PO (Plant Ontology) [20], ou encore ENVO (the Environment Ontology) [6] et vont dans le sens d'une ouverture vers le LOD (Linked Open Data [22]). En effet, pour faciliter partage et analyse des données, il est impératif de réutiliser autant que possible, les concepts déjà définis par des communautés d'expertise. L'avantage pour nous est double, d'une part la définition de nouveaux concepts, possiblement redondants avec l'existant, est rendue inutile, et d'autre part la mobilisation de concepts définis de manière consensuelle offre une meilleure visibilité sur les données.

2.3 Une démarche mobilisant l'existant

Pour fournir à notre système les capacités de capitalisation et de partage des connaissances requises, nous avons opté pour une démarche privilégiant l'adossement à différentes ontologies cadres. D'après Thomas Gruber [16], l'extensibilité est une qualité importante des ontologies, qui doivent pouvoir se voir ajouter de nouveaux concepts sans que cela ne vienne remettre en question les modélisations antérieures. Dans cette optique, nous définissons différents concepts clés qui sont subsumés par des concepts provenant d'ontologies cadres. Ce mécanisme d'extension nous permet de tirer parti de l'expertise d'autres domaines pour la résolution des problématiques liés à notre modèle de gestion des connaissances en aménagement agroforestier. Nous avons donc mobilisé des ontologies cadres pour résoudre des problématiques déjà résolues dans d'autres domaines de spécialisation. Nous avons fait le choix de présenter les efforts de conceptualisation associés à la construction de l'ontologie Agroforestry, au travers de différents diagrammes UML [36]. Un premier diagramme de classes (Fig.1) décrit les entités clés du modèle Agroforestry, et leurs inter-relations. Les diagrammes suivants restituent graduellement les notions d'importance empruntées aux ontologies cadre GeoSPARQL et SOSA [2]. Un dernier diagramme (Fig.4) explicite l'adossement d'Agroforestry, aux ontologies de plus haut niveau. L'ontologie Agroforestry est ensuite définie dans le formalisme des logiques de description. Agroforestry est dédiée à une meilleure compréhension des aménagements agroforestiers et à ce titre, se concentre principalement à la description structurelle des entités présentes au sein d'une parcelle. La classe «StructuralElement» occupe en conséquence, une position privilégiée dans cette modélisation. Nous distinguerons les classes filles disjointes «SimpleElement» et «CompositeElement» qui permettent d'énoncer qu'un élément va admettre d'autres éléments structuraux en son sein, ou au contraire être un élément "feuille" du modèle. La classe «CompositeElement» est ainsi enrichie d'une association «hasElement» qui pointe vers la classe «StructuralElement». L'association «hasElement» pourra être affinée dans l'ontologie (en premier lieu via des relations méréotopologiques). La relation «hasElement» est inspirée des travaux autour de GeoSPARQL et de BOT (Building Ontology Topology) [34], et respectivement des différents relations réflexives de geo :SpatialObject vers geo :Spatia-

1. https ://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/af

2. Nous exploitons aussi OWL Time, mais nous n'en donnons pas le diagramme UML qui peut être retrouvé à l'adresse https ://www.w3.org/TR/owl-time/

©AfIA 2020

lObject et de la relation bot :hasElement. Ces éléments de modélisation sont déconnectés de toute considération temporelle. Prenons l'exemple d'un noyer hybride planté dans une parcelle agroforestière donnée. Ce noyer a pour propriété intrinsèque d'être un élément de la parcelle tout au long de son existence. Nous sommes conscients que cette vision simplificatrice peut être sujette à caution dans certains cas de figures. La classe «StructuralElement» se voit associée via l'association «hasProperty» à la classe «PropertyOfElement» qui va permettre d'enrichir les éléments structuraux de diverses caractéristiques amenées à évoluer dans le temps. La propriété «PropertyOfElement» est cette fois-ci réifiée et va être spécialisée en exploitant différents référentiels terminologiques à l'exemple de la taille totale de la plante dans Trait Ontology (TO :1000012 de nom "whole plant size"). À ce titre, la modélisation s'inspire de SOSA. Nous avons également défini une super-classe nommée «Resource» venant non seulement généraliser «StructuralElement» mais aussi «PropertyOfElement». L'intérêt de cette super-classe est de pouvoir enrichir sémantiquement toute ressource du modèle avec des termes empruntés aux ressources onto-terminologiques rendues disponibles sur le Web. À cet effet, nous introduisons la classe «Term» qui vient également spécialiser la classe «Resource» et dont les instances sont attendues de venir compléter de manière normalisée la description des autres ressources du modèle. Ainsi, les notes, présentes au sein du diagramme de classes UML de la figure 1, font état de termes tirés d'ontologies terminologiques qui peuvent être utilisés pour qualifier les éléments d'un aménagement ainsi que leurs propriétés et inter-relations. Le parti-pris dans la définition du modèle de connaissances d'Agroforestry est la réutilisation des ontologies et terminologies existantes. Seul un socle minimum d'organisation de la connaissance vient organiser l'existant afin de rendre cet existant exploitable dans le domaine de l'agroforesterie. Nous détaillons ci-dessous les éléments de modélisation des ontologies cadre mobilisées.

2.3.1 Intégration de l'ontologie SOSA (Sensor, Observation, Sample, and Actuator)

La première nécessité était pour nous de permettre aux agroforestiers de capitaliser les différentes observations faites sur le terrain. Si certaines propriétés de nos éléments agroforestiers possèdent des valeurs immuables (comme par exemple la localisation d'un site), d'autres propriétés (comme l'acidité d'un sol au travers de la mesure de son PH), sont quantifiées ou qualifiées à l'aide d'une procédure d'observation spécifique. Les valeurs collectées au travers de ces observations peuvent varier au cours du temps et sont dépendantes de la méthode de mesure. Cette variabilité doit absolument être prise en compte pour obtenir un résultat rigoureux en cas de comparaison et d'analyse de données issues de multiples observations. À cet effet, nous avons choisi l'ontologie cadre SOSA [21], qui a pour élément central l'observation (Fig.2). SOSA est le module central (mais néanmoins autonome) de l'ontologie SSN (Semantic Sensor Network) [17] qui permet de décrire les capteurs (y compris humains) et les observations acquises par ces capteurs. SOSA place l'observation («sosa :Observation») au centre de son modèle : Une observation permet ainsi de renseigner la valeur d'une propriété descriptive pour un élément d'intérêt, à un instant ou intervalle de temps donné. L'observation est liée à un individu de la classe «sosa :FeatureOfInterest» par la relation «sosa :hasFeatureOfInterest». La propriété observée de l'élément (classe «sosa :ObservableProperty») est liée à l'observation par la relation «sosa :observedProperty» et la valeur de cette propriété est liée à l'observation par la relation «sosa :hasResult». Dans le modèle Agroforestry, la classe «StructuralElement» vient spécialiser «sosa :FeatureOfInterest», et va naturellement pouvoir bénéficier de toute la modélisation autour de la notion d'observation. Nous pouvons ainsi, par exemple organiser l'information autour de la croissance d'un arbre, en le considérant comme une instance de la classe «sosa :FeatureOfInterest» et renseigner sa taille à intervalles réguliers au travers de plusieurs observations. La classe «ssn :Property» (super-classe de «sosa :ObservableProperty») a également retenu notre attention et nous avons fait le choix d'étendre cette classe par la classe «PropertyOfElement» de manière à pouvoir décrire de manière complémentaire les propriétés engagées dans la description des éléments clés de l'agroforesterie. L'idée est de pouvoir disposer à plus long terme de couples éléments/collection de propriétés pertinents pour l'agroforesterie et ainsi en faciliter la réutilisation par la communauté. Nous avons aussi été motivés par la volonté d'étendre à nouveau «PropertyOfElement» par «RelationshipBetweenElements» pour prendre en charge des relations autres que des relations structurelles entre éléments d'un aménagement agroforestier. Ces relations peuvent être valuées et datées dans le temps, et vont, en particulier, nous permettre de capturer les interactions entre éléments biotiques retrouvés sur les mêmes parcelles. Les sites pilotes en agroforesterie permettrent de mettre en exergue les effets de pratiques agroforestières, au moyen d'expérimentations menées sur des parcelles de test. Les classes «sosa :Sample» et «sosa :Sampling» vont dès lors, nous être également utiles ; une parcelle expérimentale pouvant être vue comme un individu «sosa :Sample». Nous reprenons dans la figure 2, le diagramme de classes UML des principales classes de SOSA dont certaines font l'objet d'extensions dans le modèle Agroforestry.

2.3.2 Extension de l'ontologie GeoSPARQL et de l'ontologie OWL-Time

Une double dimension spatiale et temporelle est nécessaire à toute entité de notre modèle si l'on veut rendre compte de l'évolution d'un système où les relations de proximité dans le temps sont des plus importantes. En effet les aménagements agroforestiers et en particulier ceux de l'agrosylviculture sont de par leur nature des aménagements spatiaux, où la place de chaque élément (arbre, plante céréalière, ligne d'arbres dans son ensemble, . . .) a une importance primordiale dans le cadre des interactions plantes-plantes. La localisation géographique des données d'inté-

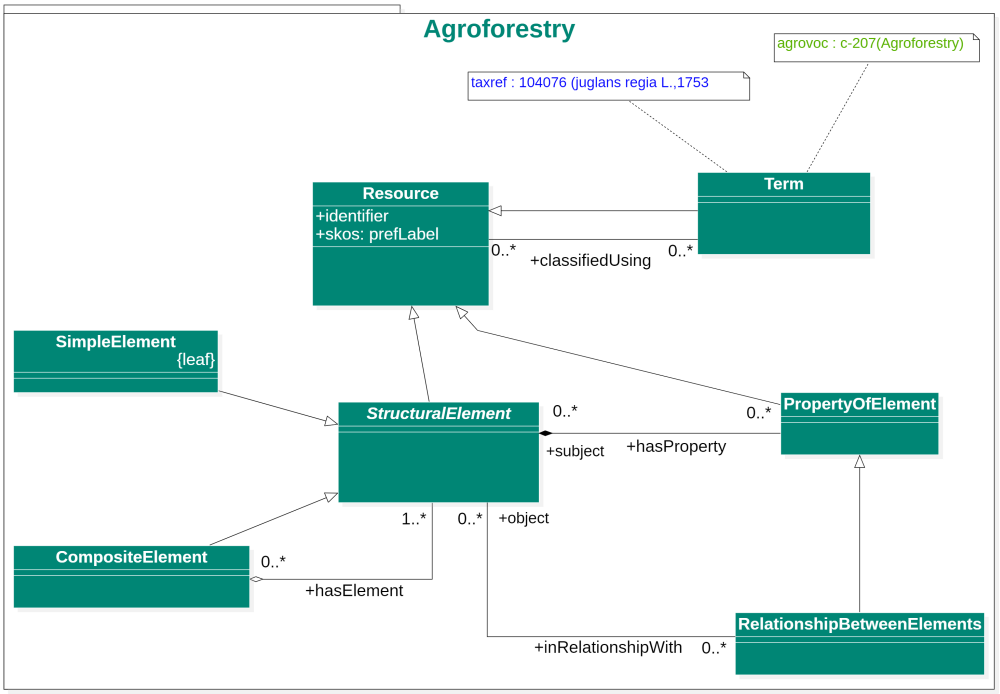


FIGURE 1 – Conceptualisation de l'ontologie "Agroforestry".

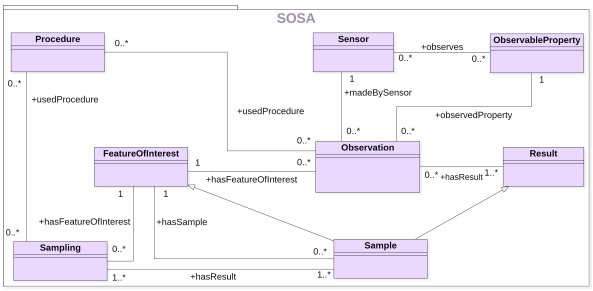


FIGURE 2 – Diagramme de classes autour du module ontologique SOSA.

rêt est à même de rapprocher et de lier des données issues de domaines différents à l'exemple de l'hydrologie ou de la pédologie. Nous prenons l'exemple d'une rivière qui pourrait jouxter une parcelle agroforestière et ainsi limiter grandement la compétition en eau entre arbres et plantes céréalières. GeoSPARQL [4] (Fig.3) est proposé par le consortium international de l'OGC (Open Geospatial Consortium), pour fournir les éléments nécessaires à la représentation et à l'interrogation de données spatialisées dans le contexte du Web sémantique. GeoSPARQL est ainsi organisé de façon modulaire, et peut offrir des services aussi bien aux systèmes basés sur un raisonnement spatial qualitatif, qu'à ceux basés sur des calculs spatiaux quantitatifs. Les calculs spatiaux quantitatifs, à l'exemple d'un calcul de distance, nécessitent de connaître précisément la géométrie des éléments étudiés (géométrie Euclidienne), alors que les systèmes basés sur un raisonnement spatial qualitatif s'appuient sur des relations le plus souvent topologiques entre éléments. Ces dernières relations (à l'exemple de l'adjacence, de l'intersection ou de l'inclusion) sont, par exemple, décrites au travers du formalisme "region connection calculus" (RCC8) [33]. GeoSPARQL offre également la possibilité d'associer une à plusieurs géométries, à l'exemple de point ou de polygone, à toute entité géographique au travers de la classe «geo :Geometry» qui représente la super classe de toutes les géométries possibles. Dans le modèle Agroforestry, la classe «StructuralElement» est subsumée par «geo :Feature» et nous allons tirer parti de toute la modélisation proposée par GeoSPARQL autour des géométries. La classe «geo :Geometry» du module cœur de GeoSPARQL est par suite étendue par différentes préconisations dont le standard OGC, nommé Simple Features Access (sfa), dont certaines géométries sont illustrées dans le diagramme de classes en figure 3. Le temps est une notion tout aussi importante dans le contexte des aménagements agroforestiers dans lequel, par exemple, la saisonnalité annuelle des cultures est confrontée à la vie pluriannuelle des arbres. Afin de mieux appréhender les interactions entre arbres et cultures dans le temps, nous devons définir de façon précise les dates de plantation et les périodes de présence spécifique de chaque élément agroforestier. Ainsi la classe «StructuralElement» subsumée par «sosa :FeatureOfInterest» va pouvoir mobiliser la modélisation retenue dans SOSA, à savoir entretenir une relation de type «sosa :phenomenonTime» avec une entité temporelle «time :TemporalEntity» de l'ontologie OWL-Time [18]. La classe «time :TemporalEntity» est

©AfIA 2020

ensuite spécialisée en «time :Instant» et «time :Interval», et il est ainsi aisé d'inscrire un élément d'aménagement agroforestier dans une durée basée sur un intervalle de temps précis ; ou bien de définir une estampille temporelle pour une observation spécifique définie pour ce même aménagement agroforestier (Fig.4). Nous avons présenté à la fois le modèle conceptuel correspondant au socle minimal de structuration des connaissances propres aux aménagements forestiers, et des portions de modèles conceptuels des ontologies cadres véhiculant trois notions qui nous intéressent en tout premier lieu, à savoir l'observation, l'espace et le temps. Nous proposons maintenant d'illustrer les articulations définies entre ces différents modèles au travers de deux nouvelles figures. La figure 4 est un nouveau diagramme de classes intégrant SOSA, GeoSPARQL, OWL-Time et Agroforestry pour les besoins propres des aménagements agroforestiers. Le code couleur permet de repérer visuellement la provenance de chaque élément modélisé. La figure **??** est un diagramme de paquetages qui exprime les liens de dépendance du paquetage «Agroforestry» vis à vis des paquetages «SOSA», «OWL-Time» ou encore «GeoSPARQL». Ce diagramme facilitera la définition des "imports" de composants ontologiques dans Agroforestry.

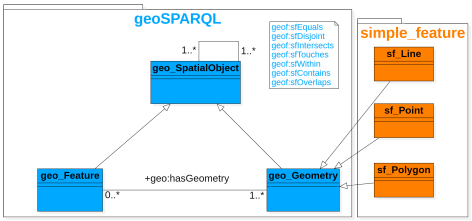


FIGURE 3 – Diagramme de classes autour du module ontologique cœur de GeoSPARQL.

2.4 Fondements logiques d'Agroforestry

Nous reprenons le socle de connaissances défini spécifiquement pour l'agroforesterie dans le formalisme habituellement
dévolu aux logiques de description [24]. Le préfixe afy (ontology For AgroForestrY) est le préfixe retenu pour l'ontologie Agroforestry. Les principaux axiomes d'inclusion et d'équivalence dela TBox (boîte terminologique qui contient l'arborescence de concepts de l'ontologie) sont listés en figure Fig.5. Agroforestry se compose essentiellement d'une arborescence de concepts clés, avec «afy :Resource» comme concept le plus général. Les concepts «afy :PropertyOfElement», «afy :Term» et «afy :StructuralElement» viennent raffiner «afy :Resource», et sont disjoints deux à deux. Le concept «afy :Term» découle d'une double motivation : il s'agit d'enrichir les éléments décrits dans une base de connaissances en agroforesterie avec des savoirs terminologiques complémentaires et normalisés, mais aussi et dans un second temps de dégager (en les définissant au besoin) un ensemble de concepts terminologiques pouvant s'appliquer avec succès à l'agroforesterie. Le concept défini «afy :CompositeElement» re-

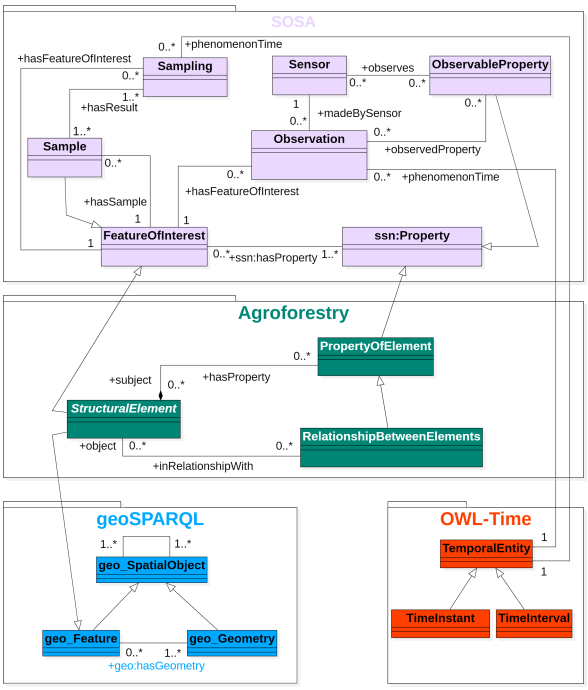


FIGURE 4 – Diagramme de classes intégré.

présente l'ensemble des éléments structuraux comptant au moins une relation de type tout-partie («afy :hasElement») avec tout autre élément structural. Pour ce qui concerne la RBox (conteneur des rôles de l'ontologie) présentée en figure Fig.6, la propriété «afy :hasElement» a une propriété inverse nommée «afy :elementOf». Par ailleurs, nous posons les axiomes d'inclusion présentés en figure Fig.7 qui viennent adosser Agroforestry aux ontologies GeoSPARQL et SOSA. Ainsi «afy :StructuralElement» , en tant qu'entité spatialisée d'intérêt, spécialise à la fois «geo :Feature» et «sosa :FeatureOfInterest». «afy :PropertyOfElement» dérive de «ssn :Property». «afy :Term» est à rapprocher de «skos :Concept». L'ontologie ainsi définie, a été exploitée pour tirer parti de premiers mécanismes de raisonnement. La connaissance des arbres qui sont des éléments d'une parcelle peut permettre par exemple d'en calculer la biomasse. À cet effet, l'ontologie a été rendue opérationnelle sous le formalisme OWL2 [15] ;[42].

2.5 Instanciation du modèle

Notre objectif est de proposer une démarche qui soit à même de décrire l'organisation d'aménagements agroforestiers actuels ou futurs avec des éléments qui peuvent s'avérer inconnus au moment de la constitution du modèle. Ces nouveaux éléments devront venir compléter le modèle sans le remettre en cause et l'invalider. L'importance est donc de disposer d'une organisation de la connaissance pérenne et extensible, pouvant à la fois être réutilisable dans d'autres contextes d'étude sur le long terme et qui soit facile d'exploitation dans différents cas applicatifs. Mais l'ajout sans contrainte de nouvelles caractéristiques pourrait contribuer à alourdir le modèle avec des

problèmes de désignation ou de duplication de ces nouvelles caractéristiques ajoutées au fur et à mesure des besoins. Un manque de clarté dans la définition de ces propriétés pourraient être également un frein à l'analyse des données. Il est indispensable de décrire les entités d'intérêt de l'agroforesterie avec des propriétés décrites au sein de terminologies normalisées qui soient à la fois décrites de manière non ambiguë, et qui fassent consensus pour l'ensemble des différents acteurs de l'agroforesterie. À cet effet, nous privilégions l'usage de termes provenant de plusieurs ressources onto-terminologiques de domaines connexes, à l'exemple d'Agrovoc, Thesae, AgronomicTaxon, TaxRef ou encore AEO (Agricultural Experiments Ontology). Un travail mené en parallèle concerne la construction d'un thésaurus dédié à l'agroforesterie qui soit rendu disponible au format RDF [9] au sein de la sphère des sources de données ouvertes et liées. Certaines notions peuvent en effet être très spécifiques à l'agroforesterie à l'exemple de pratiques agriculturales exclusives à l'agroforesterie, et ne vont pas être retrouvées dans les thésaurus existants. Un premier travail de construction d'un thésaurus dédié à l'agroforesterie [5] a été initié dans le contexte du projet européen AgroFe (Agroforestry Education in Europe) et poursuivi dans le projet Agrof-MM Erasmus+ [3] [41]. Ce thésaurus traite cinq grands volets : services écosystémiques, économie, écologie, systèmes agroforestiers et techniques agroforestières.

afy :Resource $\subseteq \forall$ afy :classifiedUsing.afy :Term $\sqcap \exists$ afy :identifier.xsd :anyURI
afy :PropertyOfElement $\subseteq$ afy :Resource $\sqcap \neg$ afy :StructuralElement
afy :Term $\subseteq$ afy :Resource $\sqcap \neg$ afy :StructuralElement
afy :StructuralElement $\subseteq$ afy :Resource $\sqcap$
$\forall$ afy :hasProperty.afy :PropertyOfElement
afy :CompositeElement $\equiv$ afy :StructuralElement $\sqcap$
$\exists$ afy :hasElement.afy :StructuralElement $\sqcap$
$\forall$ afy :hasElement.afy :StructuralElement
afy :SimpleElement $\equiv$ afy :StructuralElement $\sqcap \neg$ afy :CompositeElement
afy :RelationBetweenElements $\equiv$ afy :PropertyOfElement $\sqcap$
$\exists$ afy :inRelationshipWith.afy :StructuralElement

FIGURE 5 – Concepts d'Agroforestry.

afy :hasElement $\equiv$ afy :elementOf
afy :hasProperty $\equiv$ afy :propertyOf
$\top \subseteq \leq 1$ afy :propertyOf
afy :hasRelationship $\equiv$ afy :inRelationshipWith
$\top \subseteq \leq 1$ afy :inRelationshipWith
afy :classifiedUsing $\equiv$ afy :classifiedBy
$\top \subseteq \leq 1$ afy :identifier

FIGURE 6 – Propriétés d'Agroforestry.

2.5.1 Exemples illustratifs

Nous présentons ici des exemples d'individus venant peupler la base de connaissances. Ces individus sont extraits du jeu de données acquis à partir des expérimentations

3. http ://agrofmm.eu

afy :StructuralElement $\subseteq$ geo :Feature
afy :StructuralElement $\subseteq$ sosa :FeatureOfInterest
afy :PropertyOfElement $\subseteq$ ssn :Property

FIGURE 7 – Adossement aux ontologies de plus haut niveau.

menées sur les parcelles agroforestières, agricoles et forestières du site d'étude de Restinclières [12]. À Restinclières, des parcelles témoins sont également présentes pour comparer la pousse des arbres sans cultures (témoins forestiers) et celle des cultures sans les arbres (témoins agricoles). Les données utilisées pour le cas d'étude ont été collectées entre 2015 et 2018, par des chercheurs de l'INRAE. Les exemples illustrent graduellement les trois axes de modélisation retenus : à savoir représenter la structure des aménagements sur les parcelles, organiser l'ensemble des observations acquises sur les éléments d'intéret présents sur la parcelle et enrichir les connaissances acquises par l'ajout de termes provenant d'ontoterminologies qui vont faciliter la compréhension et donc le partage de la base de connaissances. L'objectif est de transférer la démarche afin de la rendre opérationnelle pour tous les acteurs de l'agroforesterie. Dans le graphe RDF de la figure 8, cinq instances de la classe «afy :StructuralElement» entretiennent des relations tout-partie («obo :BFO_0000051» venant spécialiser «afy :hasElement»). Une parcelle («afy :PA3AF») a pour sous-partie une rangée d'arbres «afy :PA3AFL01» qui a, à son tour, pour sous-parties des arbres dont les arbres numéro 10 et 13 «afy :PA3AFL01A10» et «afy :PA3AFL01A13». Chaque instance se voit associer un label («skos :prefLabel») en anglais. Par exemple, l'arbre 10 a pour label "Tree 10 of line 1"@en. Les individus de la classe «afy :StructuralElement» sont également des individus de la classe «geo :Feature» et à ce titre vont admettre des géométries. Dans la figure 9, l'arbre 10 de la rangée 1 possède une géométrie de type «sf :Point», tandis que la rangée possède une géométrie de type «sf :Polygone». Les coordonnées géographiques sont données dans le système WKT et le référentiel géographique WGS 84. La spatialisation des entités permet de considérer tous les liens qui peuvent se nouer entre ces entités. Ainsi les relations de proximité pourront être posées et faciliteront l'étude des interactions plante-plante. Un dernier exemple porte sur l'acquisition d'observations pouvant être mesurées sur les différentes entités constitutives de la parcelle. Nous prenons l'exemple de la mesure du rendement de la culture de blé en 2015 sur la parcelle agroforestière étudiée. L'estimation de ce rendement se base sur un échantillonnage obtenu à partir de prélèvements de culture avant récolte, réalisés à différents points sur la parcelle. La figure 10 illustre la mise à contribution de la classe Sampling pour traiter les échantillonnages, et le graphe RDF présenté, correspond à un échantillonnage réalisé le 28 Juin 2015 sur la parcelle agroforestière PA3AF. L'observation porte sur les échantillons «afy :PA3AF_Sample_wheat_2017_L1-2_A34_Est» et «afy :PA3AF_Sample_wheat_2017_L1-

©AfIA 2020

2_A34_Est» qui sont les résultats de l'échantillonnage «afy :PA3AF_Sampling_wheat_2017». La ressource «agrovoc :c_10176» avec pour label anglais «crop yield» fait office de propriété observée et le protocole de mesure correspond à un contrôle de performance («agrovoc :c_24061 » avec pour label anglais «performance testing»). L'identité du scientifique ayant joué le rôle de capteur humain est consigné ainsi que la date de l'échantillonnage. Les résultats sont donnés en kilogramme par hectare. Les usages concertés du modèle SOSA et de termes empruntés au vocabulaire Agrovoc facilitent le partage de la démarche et permettent d'envisager l'ouverture du jeu de données ainsi structuré à d'autres équipes de recherche. Nous avons exploité ce jeu de données pour étudier les retombées économiques d'une parcelle agroforestière et estimer la rentabilité de cette parcelle lorsque que des arbres, qui ont une valeur marchande en matière de bois d'œuvre, y poussent. La parcelle agroforestière possède une parcelle forestière témoin et des calculs de biomasse moyenne, à partir de la hauteur et du diamètre de chaque arbre modélisé dans la base de connaissances, ont été effectués pour trois années consécutives (2015, 2016 et 2017). Il est montré, après une validation statistique des résultats, que la biomasse dans la parcelle agroforestière y est supérieure à la biomasse calculée dans la parcelle forestière. Cet exemple n'est qu'un premier exemple à mettre à l'actif de l'agroforesterie qui peut apporter des solutions en matière de développement durable face à l'érosion de la biodiversité et aux changements climatiques. Nous avons utilisé, pour le mettre en œuvre, la plateforme pour le Web sémantique Java Jena [38] et construit des fonctions Jena faisant des appels à des librairies du langage de traitement statistique R [32].

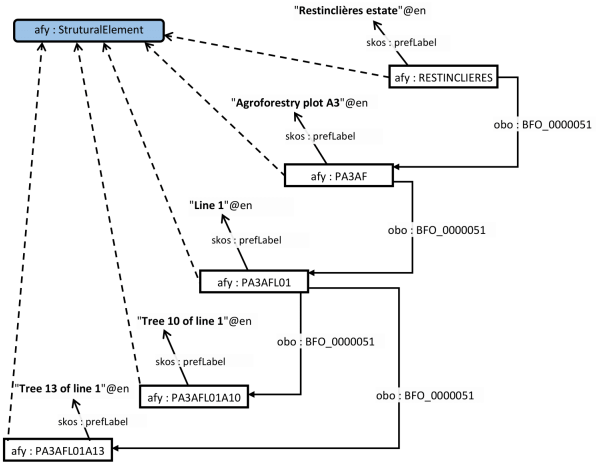


FIGURE 8 – Graphe RDF explicitant l'aménagement de la parcelle agroforestière de Restinclières.

3 Conclusion et perspectives

Nous proposons une ontologie nommée "Agroforestry" dédiée à la description spatiotemporelle de structures composites que sont les aménagements agroforestiers. La vo-

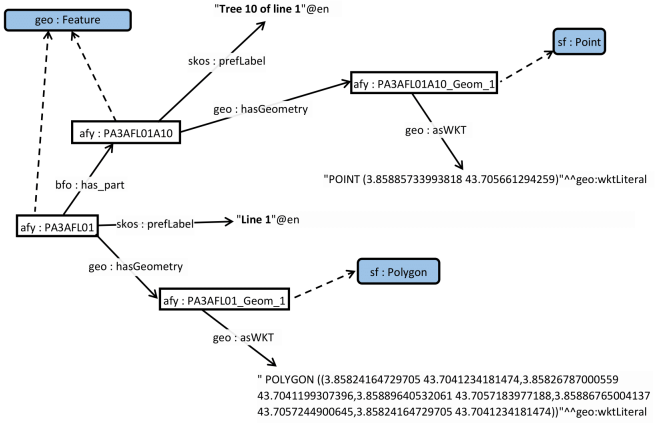


FIGURE 9 – Graphe RDF explicitant les géométries des éléments structuraux de la parcelle agroforestière.

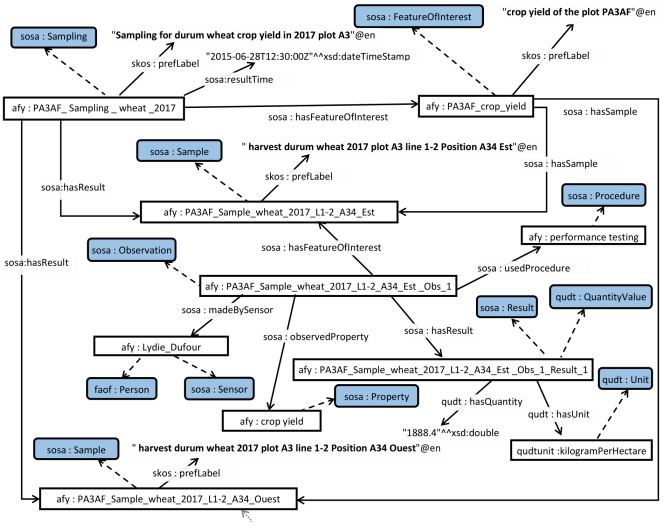


FIGURE 10 – Graphe RDF et définition d'observations s'appliquant aux éléments structuraux.

lonté est de privilégier la réutilisation d'ontologies existantes. À ce titre, nous avons mobilisé des composants ontologiques préconisés par des consortiums œuvrant pour la standardisation des modèles de connaissances. Ainsi GeoSPARQL, pour la dimension spatiale est à l'initiative de l'OGC ; OWL-Time pour la dimension temporelle est à l'initiative du W3C ; de même que SOSA pour tout ce qui découle des observations. Différents travaux (Arenas et al., 2018 ; Aubin et al., 2019 ; Tran et al., 2017) ont d'ores et déjà expérimenté tout le potentiel d'un usage commun de SOSA, GeoSPARQL et Time dans les sciences de l'environnement. Nous nous attachons ici à conduire un travail similaire dans la sphère de l'agroforesterie, qui nécessite de modéliser et de capitaliser des connaissances faisant la part belle aux interactions entre éléments biotiques et/ou abiotiques. Nous dégageons également un socle minimal de connaissances qui articule les apports de chaque com-

posant ontologique autour de trois axes : structuration des aménagements, observations et dispositifs expérimentaux autour des éléments clés présents dans les aménagements, et enrichissements terminologiques des éléments décrits. Ce modèle pensé pour l'agroforesterie, reste cependant générique pour intégrer des connaissances en provenance de domaines connexes à l'agroforesterie, à l'exemple de la climatologie, de la pédologie, de l'hydrologie mais aussi de l'agriculture. Nos perspectives sont donc d'étendre notre démarche à ces domaines de connaissances connexes afin de permettre une meilleure intégration des données systémiques et ouvrir des perspectives en termes de modélisation des systèmes complexes en agroforesterie. Nous souhaitons également poursuivre dans la définition de cas d'usages pouvant être servis efficacement par l'ontologie Agroforestry, et en particulier traiter de tout ce qui relève des interactions entre les arbres et les cultures venant s'intercaler entre ces arbres. Mieux comprendre ces interactions pourrait permettre de définir des politiques agricoles plus respectueuses de l'environnement. Enfin, il nous semble utile également de poursuivre le travail engagé par d'autres groupes de travail autour de la définition d'un thésaurus dédié à l'agroforesterie, en portant ce thésaurus au sein de la sphère des sources de données ouvertes et liées. Une version de ce thésaurus au format SKOS [28] déposé sur un portail de ressources onto-terminologiques à l'exemple d'AgroPortal [23] pourrait être un premier pas dans ce sens.

Références

[1] ALAVI M. & LEIDNER D. E. (2001). Review :*Knowledge management and knowledge management systems : Conceptual foundations and research issues.* MIS Quarterly, 25(1), 107.

[2] ARENAS H., AUSSENAC-GILLES N., COMPAROT C. & TROJAHN C. (2018). *Ontologie pour l'intégration de données d'observation de la terre et contextuelles basée sur les relations topologiques.* In S. RANWEZ, Ed., IC 2018 : 29es Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (Proceedings of the 29th French Knowledge Engineering Conference), Nancy, France, July 4-6, 2018, p. 5–20.

[3] AUBIN S., BISQUERT P., BUCHE P., DIBIE J., IBANESCU L., JONQUET C. & ROUSSEY C. (2019). *Recent progresses in data and knowledge integration for decision support in agri-food chains.* In N. HERNANDEZ, Ed., IC 2019 - Journées francophones d'Ingénierie des Connaissances, p. 43–59, Toulouse, France : AFIA.

[4] BATTLE R. & KOLAS D. (2012). *Enabling the geospatial Semantic Web with Parliament and GeoSPARQL.* Semantic Web, 3(4), 355–370.

[5] BURRIEL C., HERDON M., TAMÁS J. & VÁRILLERAI L. (2017). *Knowledge databank and repository service for agroforestry.* In 2017 EFITA WCCA Congress.

[6] BUTTIGIEG P. L., MORRISON N., SMITH B., MUNGALL C. J., LEWIS S. E. & THE ENVO CONSORTIUM (2013). *The environment ontology : contextualising biological and biomedical entities.* Journal of Biomedical Semantics, 4(1), 43.

[7] CALAME M. (2016). *Comprendre l'agroécologie : Origines, principes et politiques.* Paris : Mayer Charles Leopold Eds.

[8] CARACCIOLO C., STELLATO A., MORSHED A., JOHANNSEN G., RAJBHANDARI S., JAQUES Y. & KEIZER J. (2013). *The AGROVOC Linked Dataset.* Semantic Web, 4(3), 341–348.

[9] CYGANIAK R., WOOD D. & LANTHALER M. (2014). *RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax.* https ://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/. [Online ; accessed 19-feb-2020].

[10] DAVIES J., FENSEL D. & VAN HARMELEN F. (2003). *Towards the Semantic Web.* USA.

[11] DUCROS D., KÉPHALIACOS C. & RIDIER A. (2005). *Systèmes de production diversifiés. les prévergers : une alternative à l'arboriculture intensive face à l'évolution de la pac.*

[12] DUFOUR L. (2019). *Tree planting and management in agroforestry.* In Agroforestry for sustainable agriculture, p. 480 p. Burleigh Dodds Science Publishing.

[13] DUFY L., ABT V. & POYET P. (2006). *GIEA : gestion des informations de l'exploitation agricole. un projet au service de l'interopérabilité sémantique de la profession agricole.* In Ingénieries eau-agriculture-territoires,Lavoisier, p. 27–36.

[14] DUPRAZ C. & LIAGRE F. (2008). *Agroforesterie : Des arbres et des cultures.* Paris : Ed. France Agricole, 1.ed. edition.

[15] GRAU B. C., HORROCKS I., MOTIK B., PARSIA B., PATEL-SCHNEIDER P. & SATTLER U. (2008). *Owl 2 : The next step for owl.* Journal of Web Semantics, 6(4), 309–322.

[16] GRUBER T. R. (1995). *Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing ?* International journal of human-computer studies, 43(5-6), 907–928.

[17] HALLER A., JANOWICZ K., COX S. J. D., MAXIME L., TAYLOR K., LE PHUOC D., LIEBERMAN J., GARCÍA-CASTRO R., ATKINSON R. & STADLER C. (2019). The modular SSN ontology : A joint W3C and OGC standard specifying the semantics of sensors, observations, sampling, and actuation. Semantic Web, 10(1), 9–32.

[18] HOBBS J. R. & PAN F. (2004). *An ontology of time for the semantic web.* ACM Transactions on Asian Language Information Processing, 3(1), 66–85.

[19] ISO/TC & COX S. (2014). *ISO/DIS 19150-2 :2014 - Geographic information – Ontology – Part 2 : Rules for developing ontologies in the Web Ontology Language (OWL).*

©AfIA 2020

[20] JAISWAL P., AVRAHAM S., ILIC K., KELLOGG E. A., MCCOUCH S., PUJAR A., REISER L., RHEE S. Y., SACHS M. M., SCHAEFFER M., STEIN L., STEVENS P., VINCENT L., WARE D. & ZAPATA F. (2005). *Plant ontology (po) : a controlled vocabulary of plant structures and growth stages.* Comparative and Functional Genomics, 6(7-8), 388–397.

[21] JANOWICZ K., HALLER A., COX S. J. D., LE PHUOC D. & LEFRANÇOIS M. (2019). *SOSA : A lightweight ontology for sensors, observations, samples, and actuators.* J. Web Semant., 56, 1–10.

[22] JANOWICZ K., HITZLER P., ADAMS B., KOLAS D. & VARDEMAN C. (2014). *Five stars of linked data vocabulary use.* Semantic Web, 5(3), 173–176.

[23] JONQUET C., TOULET A., ARNAUD E., AUBIN S., DZALÉ YEUMO KABORÉ E., EMONET V., GRAYBEAL J., LAPORTE M., MUSEN M. A., PESCE V. & LARMANDE P. (2018). *AgroPortal : A vocabulary and ontology repository for agronomy.* Computers and Electronics in Agriculture, 144, 126–143.

[24] KRÖTZSCH M., SIMANCIK F. & HORROCKS I. (2014). *Description Logics.* IEEE Intelligent Systems, 29(1), 12–19.

[25] LABELLE R. (1987). *Ten years of work in agroforestry information and documentation.* Agroforestry systems, 5(3), 339–352.

[26] LINIGER H., GICHUKI F. N., KIRONCHI G. & NJERU L. (1998). *Pressure on land : the search for sustainable use in a highly diverse environment.* Eastern and Southern Africa Geographical Journal, (8), 29–44.

[27] LUNDGREN B. & RAINTREE J. (1983). *Sustained agroforestry.* ICRAF Nairobi.

[28] MILES A. & BECHHOFER S. (2009). *SKOS Simple Knowledge Organization System : Reference. Recommendation*, W3C. [Online ; accessed 22-feb-2020].

[29] NAIR P. R. (1985). *Classification of agroforestry systems.* Agroforestry systems, 3(2), 97–128.

[30] O'NEILL B. C., OPPENHEIMER M., WARREN R., HALLEGATTE S., KOPP R. E., PÖRTNER H. O., SCHOLES R., BIRKMANN J., FODEN W., LICKER R., MACH K. J., MARBAIX P., MASTRANDREA M. D., PRICE J., TAKAHASHI K., VAN YPERSELE J.-P. & YOHE G. (2017). *reasons for concern regarding climate change risks.* Nature Climate Change, 7(1), 28–37.

[31] PALMA R., REZNIK T., ESBRÍ M., CHARVAT K. & MAZUREK C. (2016). *An inspire-based vocabulary for the publication of agricultural linked data.* In V. TAMMA, M. DRAGONI, R. GONÇALVES & A. ŁAWRYNOWICZ, Eds., Ontology Engineering, OWLED 2015, p. 124–133, Cham : Springer International Publishing.

[32] R CORE TEAM (2012). *R : A Language and Environment for Statistical Computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.

[33] RANDELL D., CUI Z. & COHN A. (1992). *A spatial logic based on regions and connection.* p. 165–176.

[34] RASMUSSEN M. H., PAUWELS P., LEFRANÇOIS M., SCHNEIDER G. F., HVIID C. A. & KARLSHØJ J. (2017). *Recent changes in the Building Topology Ontology.* In LDAC2017 - 5th Linked Data in Architecture and Construction Workshop.

[35] ROCHE C. (2012). *Ontoterminology : How to unify terminology and ontology into a single paradigm.*

[36] RUMBAUGH J., JACOBSON I. & BOOCH G. (2004). *Unified Modeling Language Reference Manual, The (2nd Edition).* Pearson Higher Education.

[37] SINCLAIR F. L. (1999). *A general classification of agroforestry practice.* Agroforestry systems, 46(2), 161–180.

[38] THE APACHE SOFTWARE FOUNDATION (2011). *A free and open source Java framework for building Semantic Web and Linked Data applications.* https ://jena.apache.org/. [Online ; accessed 22-feb-2020].

[39] TRAN B., PLUMEJEAUD-PERREAU C., BOUJU A. & BRETAGNOLLE V. (2017). *Système d'information spatiotemporel pour l'intégration et l'exploitation de données environnementales.* Revue Internationale de Géomatique, 27(3), 423.

[40] USCHOLD M. & GRUNINGER M. (1996). *Ontologies : Principles, methods and applications.* The Knowledge Engineering Review, Special Issue on Putting Ontologies to Use, 11(2).

[41] VÁRALLYAI L., HERDON M., BURRIEL C. & BOTOS S. (2017). *Agroforestry usage, building knowledge databank for agroforestrytraining and education databank and repository service for agroforestry.* In 8th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food & Environment, p. 54–65.

[42] W3C (2012). *OWL 2 Web Ontology Language.* https ://www.w3.org/TR/owl2-overview/. [Online ; accessed 19-feb-2020].

[43] WHITE J., HUNT L., BOOTE K., JONES J., KOO J., KIM S., PORTER C., WILKENS P. & HOOGENBOOM G. (2013). *Integrated description of agricultural field experiments and production : The ICASA Version 2.0 data standards.* Computers and Electronics in Agriculture, 96, 1–12.

[44] ZSCHOCKE T. (2011). *Subject Classification with DITA Markup for Agricultural Learning Resources : A Case Example in Agroforestry.* In E. GARCÍA-BARRIOCANAL, Z. CEBECI, M. C.OKUR & A. ÖZTÜRK, Eds., Metadata and Semantic Research, p. 500–513, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg.

Approche décentralisée d'insertion avec amélioration continue de la qualité de la solution pour un système TAD

Alaa Daoud[1,2], Flavien Balbo[1,2], Paolo Gianessi[1], Gauthier Picard[1,2]

[1] Univ Lyon, Mines Saint-Étienne,
[2] CNRS, Laboratoire Hubert Curien, UMR 5516, F-42023 Saint-Étienne, France.

alaa.daoud@emse.fr flavien.balbo@emse.fr paolo.gianessi@emse.fr gauthier.picard@emse.fr

Résumé

Dans le cadre du transport à la demande (TAD), l'appariement centralisé traditionnel permet d'obtenir des solutions optimales, mais reste NP-difficile et donc inadapté aux problèmes en ligne et dynamiques. Les approches décentralisées permettent d'obtenir des solutions réalisables en ligne, mais sans garantie de qualité. Ici, nous considérons une version dynamique du TAD, appelée Dial-A-Ride-Problem (DARP) où un réseau inter-véhiculaire est le support aux communications et les décisions sont prises de manière décentralisée par les véhicules. Dans ce cadre multi-agent, nous présentons un nouvel algorithme heuristique décentralisé d'insertion fondé sur une approche classique consistant à associer les véhicules aux demandes les plus proches dans le temps et l'espace, étendue par une phase d'optimisation afin d'améliorer la qualité de la solution. Nous évaluons ses performances sur des données synthétiques et la comparons à une approche gloutonne.

Mots-clés

TAD, DARP, V2V, décentralisation, SMA, heuristique d'insertion.

Abstract

In the context of On-Demand Transport (ODT), traditional centralized matching provides optimal solutions, but remains NP-Hard and therefore unsuitable for online and dynamic problems. Decentralized approaches provide feasible solutions in real time, but without any guarantee of quality. Here, we consider a dynamic version of ODT, called Dial-A-Ride-Problem (DARP) where a V2V network is the communication support and decentralized decisions are made by vehicles. In this multi-agent framework, we present a new decentralized insertion heuristic algorithm based on a classical approach consisting in associating vehicles to the closest requests in time and space, extended by an optimization phase in order to improve the quality of the solution. We evaluate its performance on synthetic data and compare it to a greedy approach.

Keywords

On-Demand Transport (ODT), DARP, V2V, decentralized, MAS, insertion heuristic.

FIGURE 1 – Un exemple de problème AVFAP, avec les sources de demande (triangles) et les taxis (cercles) avec leurs portées de communication respectives (en bleu).

1 Introduction

Le concept de transport à la demande (TAD) a été formulé pour la première fois vers 1990 comme une solution à la désaffection croissante des utilisateurs potentiels des transports publics, en particulier la nuit. La recherche dans ce domaine se concentre principalement sur l'allocation des véhicules aux demandes, le routage et la gestion de flotte.
L'affectation d'un ensemble de ressources à un ensemble d'agents est l'un des problèmes d'optimisation combinatoire les plus fondamentaux des plus étudiés dans la littérature [4]. Il peut être résolu par programmation linéaire car sa relaxation de la formulation admet des solutions intégrales optimales à un instant donné t. Cependant, mise en oeuvre par un *dispatcher* central, cette approche, exige que les véhicules aient un accès continu à leur portail via l'infrastructure de communication globale (4G, par exemple), ce qui est coûteux et peut faire du portail un goulot d'étranglement critique. La complexité algorithmique du problème, qui étend le problème du voyageur de commerce (TSP), fait qu'il est difficile pour un *dispatcher* centralisé de gérer la dynamique du problème pendant son exécution (demandes en continue, problèmes de circulation et autres dynamiques de l'environnement). On peut s'attendre à ce que la décentralisation permette de faire face à ces problèmes.

©AfIA 2020

L'heuristique d'insertion de Slomon[13] est une méthode populaire pour résoudre une variété de problèmes d'ordonnancement et de routage. Elle peut être utilisée comme une méthode pour trouver rapidement une solution réalisable mais sans garantie de qualité de la solution. Dans le cas du problème de routage des véhicules (VRP), elle produit une solution en insérant de façon répétée des demandes non programmées dans un itinéraire partiellement construit ou comme première demande dans un nouvel itinéraire.

Dans ce travail, nous proposons le problème d'allocation de flotte de véhicules autonomes (AVFAP), qui étend le DARP traditionnel en considérant une flotte de véhicules autonomes qui se coordonnent sans *dispatcher* central. Les véhicules prennent des décisions décentralisées selon des informations échangées via une communication pair-à-pair (P2P). La communication véhicule-à-véhicule (V2V) via la communication dédiée à courte distance (DSRC) offre une faible latence, une connectivité réseau rapide, et une portée de communication allant jusqu'à 300 m [5]. Avec des portées de communication limitées (illustrée Figure 1), chaque véhicule n'est conscient que d'un sous-ensemble de demandes, et il ne communique avec une autre entité (un véhicule ou une source de demande) que si elle est directement à portée ou par transitivité. Nous proposons dans ce travail une nouvelle heuristique décentralisée pour l'AVFAP, bénéficiant de la forte réactivité des heuristiques d'insertion, et des bons résultats obtenus par l'optimisation par l'échange des demandes entre véhicules.

Cet article est organisé comme suit. Dans la section 2, nous donnons un aperçu des efforts déployés dans la littérature pour résoudre ce problème. La section 3 expose notre définition du problème AVFAP. Ensuite, nous présentons notre solution pour assurer une prise de décision rapide par les agents dans la section 4 et notre proposition d'amélioration en continu est détaillée dans la section 5. Les paramètres des expérimentations, l'évaluation et les résultats sont détaillés dans la section 6. Enfin, nous concluons le document dans la section 7 avec quelques perspectives.

2 Travaux connexes

Les approches traditionnelles du TAD envisagent soit une architecture avec *dispatcher* centralisé comme dans [6, 12] soit une architecture multi-agent (SMA) décentralisée pour réduire la complexité des problèmes comme dans [7, 10]. Dans ce travail, nous considérons cette seconde famille de travaux. Parmi les nombreuses approches pour les décisions décentralisées et l'auto-coordination, [8] introduit une solution de planification en temps réel fondée sur les offres de plusieurs agents dans des environnements entièrement décentralisés, dans laquelle chaque véhicule est représenté par un agent qui peut négocier par des canaux radio avec des critères de décision flexibles. Un algorithme de reconnaissance des formes est utilisé pour prédire les emplacements les plus probables pour la prochaine demande pour recommander les déplacements vers ces emplacements.

Étudiant l'applicabilité de la programmation génétique (GP) pour développer des SMA décentralisés qui résolvent le DARP. Une méthode pour générer automatiquement un SMA qui peut résoudre le DARP pour un ensemble spécifique de scénarios est présentée par [14]. La programmation génétique est utilisée pour générer une heuristique qui est efficace pour résoudre le DARP. Le meilleur résultat obtenu avec cette approche est la planification d'une seule demande à l'avance par véhicule, ce qui maximise les intérêts locaux de l'agent et produit une solution réalisable très rapidement.

Un modèle d'agent où l'appariement de l'offre et de la demande dépend des événements simulés du marché réel des taxis [9]. Selon leur conclusion, l'une des principales limites du modèle est l'hypothèse d'une distribution uniforme de la demande dans la zone de service.

Pour remédier à l'incertitude causée par la nature dynamique des demandes en ligne, et en ignorant le temps nécessaire à l'exécution d'un algorithme de planification, [1] à proposé d'utiliser une approche déterministe de solution à horizon glissant, dans laquelle les plannings sont établis en utilisant toutes les informations connues dans un horizon de planification, qui est "glissé" vers l'avant pour inclure plus d'informations. Dans nos travaux précédents [11], sur la base de la coordination des véhicules par communication V2V, nous avons proposé le modèle d'allocation de ressources en ligne avec contraintes de communication (OLC^{2}RA). La solution proposée concerne une flotte de taxis autonomes, dans laquelle un véhicule décide de sa prochaine destination en ne considérant qu'une seule demande à l'avance. Au contraire, l'heuristique décentralisée ALMA[4] est complètement découplée et ne nécessite pas de communication entre les participants. Ils démontrent une limite supérieure de la vitesse de convergence qui est polynomiale à la quantité désirée de ressources et d'agents concurrents par ressource ; Dans le cas réaliste où les quantités mentionnées sont limitées quel que soit le nombre total d'agents/ressources, le temps de convergence reste constant à mesure que la taille totale du problème augmente. Cependant, la détection des conflits nécessite toujours une communication avec d'autres véhicules, ressources ou une entité centrale pour permettre aux ressources de partager des informations sur leur statut, comme le mécanisme de coordination du tableau noir.

Jusqu'à présent et à notre connaissance, les efforts déployés dans le domaine de la planification DARP fournissent soit des solutions optimales avec un temps d'exécution souvent peu adapté à la dynamique, soit une solution solution réalisable (rapide est non nécessairement optimale) pour répondre aux demandes en ligne. Dans ce travail, comme la solution optimale pour ce problème dynamique est irréalisable avec un temps de calcul raisonnable, notre proposition combine les avantages de ces approches dans une heuristique qui fournit une réponse rapide fondée sur les enchères (solution rapide et faisable), puis cette solution est améliorée progressivement grâce à un protocole d'échange entre agents des demandes dont la planification est à remettre en cause suite à l'évolution de l'environnement.

3 Modèle du problème AVFAP

Le problème de l'allocation d'une flotte de véhicules autonomes (AVFAP) étend le DARP traditionnel en considérant une flotte de véhicules autonomes qui se coordonnent sans *dispatcher* central. Les véhicules prennent des décisions décentralisées selon des informations échangées via une communication pair-à-pair (P2P). Le graphe de la carte de la ville, illustré dans la Figure 2, est constitué de nœuds qui représentent des emplacements géographiques et d'arcs qui représentent les liaisons routières entre ces emplacements. Une flotte de véhicules autonomes est répartie dans la ville, chaque véhicule possède un ensemble de propriétés dont les valeurs sont constantes (capacité, coût et vitesse moyenne) ou variables (emplacement, planning) car dépendantes du temps. Les passagers émettent des demandes à partir de différents endroits (que nous appellerons sources ensuite). Chacune prend la forme d'une requête qui définit : les lieux de prise en charge et de livraison associés à la fenêtre de temps de service souhaitée.
Nous définissons une solution comme un planning pour chaque véhicule qui répond aux demandes en satisfaisant leurs contraintes, tout en minimisant le temps d'attente des voyageurs et le coût de déplacement des véhicules. Les véhicules communiquent par diffusion via un réseau V2V, où la portée de communication est limitée. Chaque véhicule qui reçoit une nouvelle information la rediffuse et les véhicules sont ainsi connectés par transitivité dans les limites des rayons de communication. Dans ce contexte, un véhicule ne connaît pas les demandes en dehors de sa zone de communication. Cette connaissance évolue pendant le temps d'exécution, car le véhicule se déplace, reçoit de nouvelles demande des sources de demandes, rencontre d'autres véhicules et échange des messages entre eux. Ce modèle AVFAP est défini comme suit :

$$
\begin{aligned}
AVFAP &:=< M, V, D, T > \\
M &:=< G, w > \\
V &:= \{v_1, v_2, \ldots, v_n\} \\
D &:= \{d_1, d_2, \ldots, d_m\} \\
T &:= \{t_0, t_1, \ldots, t_{end}\}
\end{aligned}
$$

Ici, M définit la carte des infrastructures urbaines (emplacements, routes et distances) sous la forme d'un graphique dirigé G associé à une fonction de valuation w ; l'offre est représentée par une flotte V de n véhicules autonomes ; D définit un ensemble dynamique de demandes de passagers qui apparaissent au moment de l'exécution ; et T définit l'horizon temporel dans lequel les véhicules doivent répondre aux demandes des passagers. Nous définissons le temps T comme un ensemble discret de $ticks$.

3.1 Propriétés de l'infrastructure routière

La carte des infrastructures routières est définie par un graphe dirigé pondéré M, comme le montre la Figure 2.

$$
\begin{aligned}
G &:=< N, E > \\
w &:= \{w_{e_1}, w_{e_2}, \ldots, w_{|E|}\}
\end{aligned}
$$

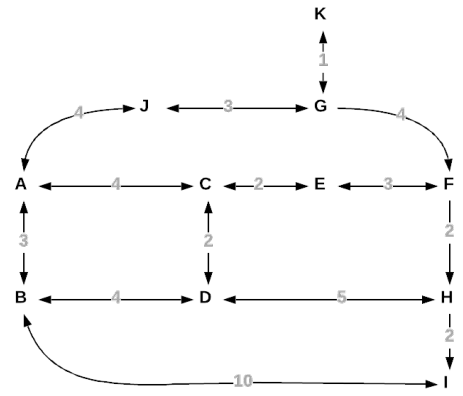


FIGURE 2 – Un exemple d'infrastructure urbaine

G est un graphe connecté dirigé où N est l'ensemble des nœuds, E est l'ensemble des arcs entre les nœuds. La fonction de valuation w associe chaque arc e à la valeur w_e selon une mesure de distance temporelle (par exemple, le temps de conduite moyen en minutes), qui sera utilisée pour calculer les coûts opérationnels des déplacements des véhicules.

3.2 Propriétés des véhicules

Chaque véhicule $v \in V$ est défini par

$$v :=< capa, cpd, range >$$

et ses propriétés dynamiques sont définies par

$$
\begin{aligned}
v_location &: V \times T \to N \cup E \\
free_seats &: V \times T \to \mathbb{N}^+
\end{aligned}
$$

où $capa$ définit le nombre total de sièges passagers dans le véhicule, cpd définit le coût du véhicule par unité de distance, et $range$ définit la portée de communication dans laquelle le véhicule peut communiquer avec d'autres entités.
A tout moment $t \in T$ un véhicule $v \in V$ connaît sa situation courante : $v_location$ définit l'emplacement de v qui pourrait être situé dans un nœud $n \in N$ ou se déplaçant sur un arc $e \in E$; et $free_seats$ définit le nombre de places libres disponibles dans v au moment t.

3.3 Propriétés des demandes

Une demande $d \in D$ est définie comme

$$d :=< required, tw, pick_up, drop_off >$$

Pour une demande $d \in D$, $required$ est le nombre de sièges requis ; tw définit un intervalle de temps (t_{min}, t_{max}) dans lequel l'événement de ramassage est considéré comme acceptable ; $pick_up$ et $drop_off$ sont respectivement l'origine et la destination de la demande. Comme pour les véhicules, au temps $t \in T$, nous considérerons qu'une demande $d \in D$ peut également être communiquée en utilisant le réseau V2V. La demande pourrait

©AfIA 2020

être émise par le client ou l'infrastructure (unité de bord de route).

4 Insertion basée sur des enchères

Dans notre modèle, nous utilisons une heuristique d'insertion comme celle décrite par [13] pour adapter en continu les plannings locaux des véhicules. Le résultat de cet algorithme est un ensemble de demandes avec pour chacune l'horaire auquel un véhicule sera à la position de son origine. Chaque agent détermine ses horaires pour maximiser la valeur de la qualité de sa solution. Comme plusieurs véhicules peuvent être intéressés par une même demande, nous avons besoin d'un mécanisme de coordination pour résoudre ces conflits. Nous utiliserons pour cela un mécanisme d'enchères, qui est l'un des moyens efficaces et éprouvés pour résoudre de tels problèmes [3].

4.1 Critère de l'enchère

Lorsqu'un véhicule v a connaissance d'une demande d, il la classe dans sa file d'attente selon la priorité qu'il lui a attribuée.

Au temps t, v choisit la première demande d_s dans la file d'attente, génère un ensemble d'alternatives, chacune étant un planning potentiel résultant de l'insertion de d_s dans une étape réalisable du planning actuel de v. Le coût opérationnel marginal de l'ajout de cette demande au planning est noté $cost$. Le choix avec le meilleur $cost$ est considéré pour diffuser une offre

$$Bid_v^d(t_{start}, cost)$$

avec t_{start} le moment de $pick_up$ pour d_s. Dans ce document, nous considérons le coût opérationnel d'un voyage comme la longueur totale de son trajet (somme des distances indiqués dans la Figure 2). Le coût marginal d'insertion est donc la différence de longueur de trajet entre le trajet initial et le nouveau trajet. Les offres restent disponibles pendant une période de temps spécifique t_{expire}. Ainsi, si le coût de l'offre de v est inférieur à toute autre offre reçue à $t + t_{expire}$ pour servir une demande d, il se considère comme gagnant de l'enchère, et met à jour son planning avec le nouveau chemin de l'offre.

Exemple 1 *Le scénario simple de la Figure 3 montre deux véhicules V_1 et V_2 situés en A et B, en état de repos avec des plannings vides au début. Au temps t_1, la première demande est annoncée $d_1 :< 1, (t_{10}, t_{20}), C, H >$. Les deux véhicules connaissent maintenant d_1. V_1 peut le servir en suivant le chemin $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow H$, donc V_1 place l'offre $Bid_{V_1}^{d_1}(t_{10}, 11)$. V_2 peut la servir via le chemin $B \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow H$, donc émet l'offre $Bid_{V_2}^{d_1}(t_{10}, 13)$. V_1 est considéré comme un gagnant et ajoute d_1 à son planning, de sorte que le coût opérationnel global de la flotte est maintenant* 11.

4.2 Le besoin d'échange de demandes

Afin de pouvoir faire des offres efficaces pour de nouvelles demandes ou pour améliorer la solution, nous proposons que les véhicules échangent leurs demandes planifiées.

Exemple 2 *La Figure 4 montre une situation où l'utilisation de l'heuristique d'insertion fondée sur les enchères est très réactive mais ne garantit pas de bons plannings. Au moment t_2 où la nouvelle demande $d_2 :< 1, (t_{15}, t_{40}), J, K >$ arrive, les deux véhicules en prennent connaissance et placent leurs éventuelles offres. En l'absence de capacité d'échange, V_1 a encore d_1 dans son planning (avec un coût initial de* 11*), donc la meilleure offre qu'il peut placer est de servir les deux demandes (servir d_2 puis aller servir d_1) avec un coût marginal de* 14*. Alors que V_2 place l'offre gagnante $Bid_{V_2}^{d_2}(t_{15}, +11)$, il ajoute d_2 à son planning, et le coût global devient* 22*. Notez que dans ce cas, servir d_2 avec V_1 et laisser V_2 s'occuper de d_1 entraîne un gain de coût opérationnel global de* 21*, mais cette solution n'est jamais réalisée car d_1 est déjà programmé sur V_1.*

Pour parvenir à ce type de solution, nous devons permettre aux véhicules d'échanger leurs demandes déjà programmées.

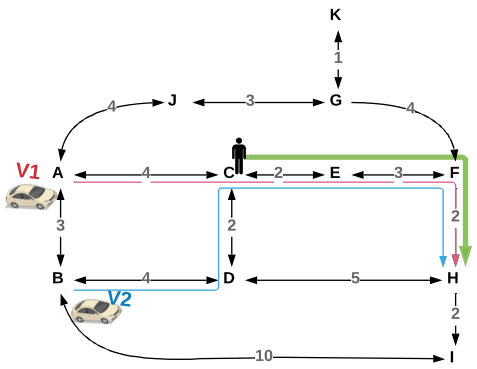


FIGURE 3 – V_1 remporte l'enchère pour servir d_1 de C à H

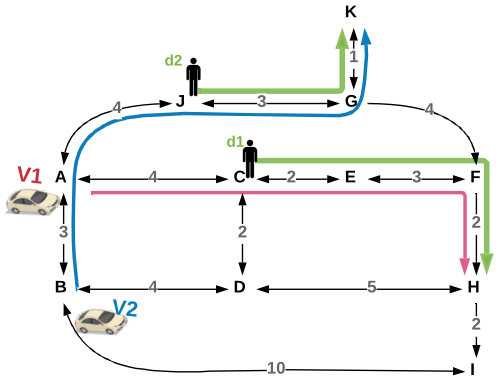


FIGURE 4 – Sans échange de la demande, V_2 gagne d_2 et V_1 garde d_1

5 Améliorer la qualité des solutions

Dans ce qui suit nous proposons un protocole d'optimisation locale pour améliorer la qualité de la solution pour les cas comme celui illustré Figure 4 et l'exemple 3

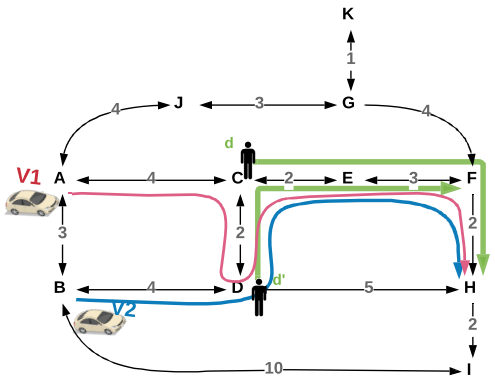


FIGURE 5 – Même s'il peut servir les deux demandes, V_2 ne peut soumettre une offre que pour une seule demande à la fois

5.1 Protocole d'optimisation « *Pull-demand* »

À l'instar de la stratégie *Rolling Horizon* de [1], nous proposons un protocole d'optimisation d'offres pour améliorer notre heuristique. Dans la stratégie *Rolling Horizon*, tous les plannings des véhicules sont considérés comme temporaires et disponibles pour être planifiés par n'importe quel véhicule, à moins qu'ils ne soient considérés comme des *demandes engagés* par des événements particuliers (par exemple, v a commencé à servir (se diriger vers) d, dont le temps restant pour le servir est inférieur au seuil de l'horizon). L'application de cette stratégie exige que tous les plannings des véhicules soient en mémoire partagée, de sorte que lorsqu'un véhicule v_i offre de servir une demande d, il sache s'il est programmé par un autre véhicule v_j, et donc s'il doit envoyer son coût d'offre à v_j. Ensuite, v_j calculera le gain (ou la perte) de coût opérationnel en abandonnant d et le coût pour v_i. S'il y a un gain, il accepte d'abandonner d et ensuite v_i met à jour son planning avec d, sinon l'offre est rejetée.

Dans notre proposition de protocole, nous ne faisons pas appel au concept de *demande engagée*, mais un véhicule ne peut faire des offres que pour des demandes qu'il peut satisfaire, de sorte que les demandes qui sont reprises ou qui n'ont pas assez de temps pour être reprogrammées sont automatiquement ignorées par l'agent. Une autre différence ici est que nous n'avons pas de mémoire partagée. Les agents échangent des informations sur le contexte de l'environnement et sur les demandes par des messages d'information. En plus de la proposition de [1], où l'optimisation est effectuée périodiquement à une fréquence prédéfinie, le protocole que nous proposons doit être exécuté en parallèle avec une stratégie fondée sur des enchères d'insertion, sur la base des informations partagées sur le contexte courant pour avoir une replanification rapide pour les demandes en continu. Le **Protocole 1** détaille cette stratégie.

Protocole 1 Protocole d'optimisation « *Pull-demand* »

Étape 1 Des nouvelles demandes entre dans le système par ordre d'annonce.

Étape 2 Chaque une est diffusée dans l'ensemble connecté auquel les sources appartiennent. Chaque agent de cet ensemble sélectionne ses demandes potentielles parmi toutes leurs demandes : les nouvelles demandes, les demandes planifiées et non planifiées qui n'ont pas encore atteint leur heure de départ prévue.

Étape 3 Les agents débutent l'enchère pour servir leurs demandes potentielles.

Étape 4 Chaque agent recherche parmi ses demandes planifiées celle à satisfaire au prochain tick, cette demande est appelée d_{next}. Si d_{next} existe, l'agent diffuse un message "$clear_demand$" pour informer les autres agents de sa prise en charge de d_{next}. Chaque récepteur efface cette dernière de leurs ensembles de demandes potentielles et connues. Chaque agent efface toute autre demande qui atteint sa limite de temps.

Étape 5 Les demandes programmées et non programmées qui ont encore du temps restent diffusées par leurs sources (*Étape 2*). Cela permet une meilleure planification dans le prochain tick, étant donné que de nouvelles demandes peuvent être annoncées.

5.2 Discussion

Compte tenu du contexte décentralisé, l'utilisation de l'heuristique d'insertion est très efficace en termes de temps de réponse. La complexité temporelle de l'heuristique d'insertion de base pour le VRP est en $\mathcal{O}(n^3)$[2]. Ce type d'heuristique est souvent utilisé pour résoudre des DARP, où les nouvelles demandes entrantes doivent être traitées en continu et intégrées dans les plannings évolutifs des véhicules. Dans l'exemple suivant, nous illustrons comment le protocole « *Pull-demand* » peut apporter une amélioration notable de la qualité de la solution.

Exemple 3 *Examinons un autre cas illustré dans la Figure 5, où V_1 possède d dans son planning, V_2 a un planning vide, et une nouvelle demande d' $:< 1, (t_{10}, t_{20}), D, F >$ est annoncée. Les offres des véhicules sont donc $Bid^{d'}_{V_1}(t_{12}, +4)$, et $Bid^{d'}_{V_2}(t_{10}, +11)$. Examinons le protocole mis en œuvre, étape par étape.*

Étape 1 *d' entre dans le système à t_2 et les deux véhicules en sont conscients, V_1 remporte l'enchère avec un coût global de* 15

Étape 2 *d et d' sont maintenant dans l'ensemble de demandes connues par les deux véhicules, V_2 cal-*

©AfIA 2020

cule les coûts pour servir d seule (13), d' seule (9) et les deux demandes ensemble ce qui fait 13. Il sélectionne donc les deux demandes comme ses demandes potentielles. V_1 n'a pas de demande potentielle car il a déjà les deux demandes dans son planning

Étape 3 *V_2 place une offre $Pull_Bid_{V_2}^{d',d}((t_{10}, t_{12}), 13)$. Pour V_1 le coût pour servir les deux demandes est de 15 donc il accepte $Pull_Bid_{V_2}^{d',d}$ car cela engendre un gain de 2.*

Étape 4 *Aucune des demandes n'atteint son temps de service prévu ou la limite supérieure de sa fenêtre temporelle.*

Étape 5 *Toutes les demandes connues restent diffusées et disponibles pour la prochaine amélioration potentielle.*

V_2 gagne et la solution est améliorée avec un cycle d'optimisation supplémentaire.

6 Évaluation expérimentale

Dans cette section, nous évaluons expérimentalement la performance de notre approche « *Pull-demand* », en utilisant des données générées et des données cartographiques ouvertes.

6.1 Configuration expérimentale

La ville de Saint-Étienne a été choisie pour la simulation. La structure du graphique $G =< N, E >$ incluant les nœuds, les arêtes et un ensemble de sources d'émission de la demande $S \subset N$ est extraite d'OpenStreetMap (OSM [1]). Dans toutes les expérimentations, nous avons fixé le nombre de sources $|S| = 20$, ayant un ensemble $E_S \subset E$, tel que $|E_S| = 75$ arcs reliant les sources, chaque arc a un nombre de points qui varie en fonction de sa longueur et des informations extraites d'OSM. La distance entre deux points consécutifs est de 40 mètres. Nous avons utilisé un simulateur de transport en temps discret disponible dans la *Plateforme Territoire* [2] pour évaluer la stratégie proposée et l'analyser en termes de qualité de service et de gain.

Une flotte V de n véhicules est distribuée au hasard sur S au début de l'exécution. Chaque véhicule $v \in V$ se déplace d'un point à un autre sur le même arc au cours de chaque cycle de simulation. Dans notre test, nous considérons que les véhicules communiquent via V2V avec une portée de communication réaliste de 250 mètres, de sorte qu'un véhicule peut envoyer/recevoir des messages vers/depuis d'autres entités situées dans sa portée. Chaque véhicule v peut adopter deux comportements de déplacement distincts : soit *marauder* pour les demandes, soit *aller* vers une destination :

— `marauding` définit l'état d'un véhicule lorsqu'il n'a pas de demande à servir, c'est-à-dire qu'au début de la simulation, chaque véhicule maraude jusqu'à ce qu'il décide de servir une demande. Une fois qu'un passager est déposé, le véhicule repasse en `marauding`. Dans cet état, le véhicule se déplace aléatoirement dans son quartier afin de trouver des demandes à servir.

— `going_to` définit l'état d'un véhicule lorsqu'il a une destination spécifique, c'est-à-dire qu'une demande de desserte du véhicule est soit *going_to* lieu de prise en charge si la demande n'est pas encore prise en charge, soit *going_to* lieu de livraison sinon.

À chaque cycle de simulation, 0 ou 1 demande est générée de façon aléatoire uniforme. Pour chaque demande, les points d'origine et de destination sont générés de manière aléatoire et uniforme à partir de l'ensemble des sources. La fenêtre de temps pour les demandes est générée en utilisant deux paramètres constants l et u pour les limites inférieure et supérieure comme suit. $[tw_{min}, tw_{max}]$ est initialisée avec deux valeurs aléatoires uniformes où :

$$tw_{min} < tw_{max}$$

$$tw_{min} \geq t_{actuel} + l$$

$$tw_{max} \leq tw_{min} + u$$

Les critères d'évaluation de ces simulations sont principalement le nombre de demandes satisfaites comme mesure de la qualité de service (QoS), le bénéfice simulé de la solution comme mesure de la qualité des affaires (QoB). Le bénéfice est calculé en termes de différence entre le prix du voyage et le coût.

$$profit = total_income - total_cost$$

où

$$total_income = \sum_{d \in D_s} P + p * distance(d)$$

$D_s \subseteq D$ est l'ensemble de toutes les demandes satisfaites, P est un prix fixe par demande, p est un facteur de tarification par unité de distance parcourue, $distance(d)$ est la distance totale de déplacement pour une demande d et

$$total_cost = \sum_{v \in V} cpd(v) * total_distance(v)$$

Dans nos tests, nous considérons que les véhicules sont identiques en ce qui concerne le coût de déplacement $cpd(\cdot)$ et le facteur de tarification p. Nous avons fixé à $P = 1.5$, $p = 2$ et $cpd(v) = 1$ pour tout v.

6.2 Résultats expérimentaux

Pour évaluer la faisabilité de l'approche heuristique « *Pull-demand* », nous la comparons à une approche gloutonne (programmer une seule demande à l'avance) qui a été mentionnée par [14] comme la meilleure stratégie pour les réglages dynamiques, suite à une sélection génétique. Les deux approches comparées utilisent la même straté-

1. https://www.openstreetmap.org/
2. https://territoire.emse.fr/

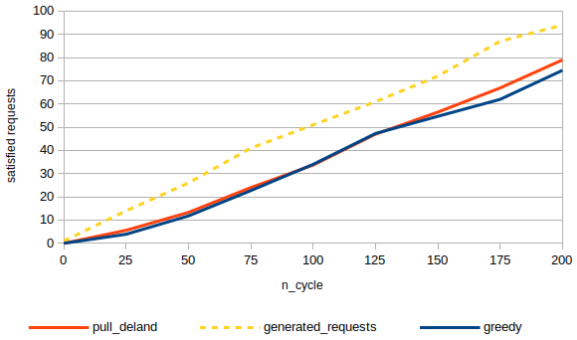


FIGURE 6 – QoS pour une flotte de 16 véhicules

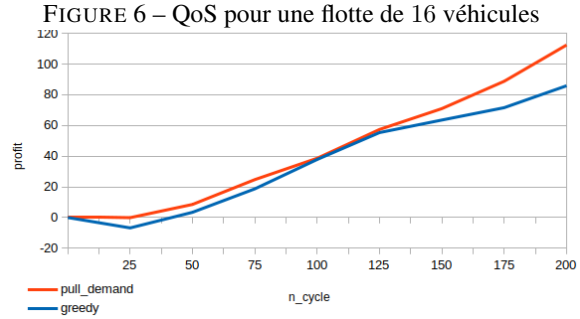


FIGURE 7 – QoB pour une flotte de 16 véhicules

gie de sélection des demandes (fonction de priorité des demandes) au cours de chaque scénario. Les résultats présentés dans les Figures 6 et 7 concernent un scénario dans lequel les véhicules choisissent la demande la moins chère. La fonction de priorité retourne pour une demande d une valeur qui est inversement proportionnelle au coût de la demande pour v : $1/costDemand(d, v)$. Ainsi plus le coût est faible plus la priorité est élevée. $costDemand(d, v)$ est le coût marginal mentionné dans la section 4 ; il en va de même pour l'algorithme glouton, puisque la planification des véhicules ne peut contenir qu'une seule demande. Nous avons exécuté plusieurs instances de problèmes variant en fonction de la taille de la flotte n. Chaque instance de ces tests est exécutée 10 fois avec différentes graines aléatoires. Tout d'abord, nous évaluons avec une taille de flotte fixe $n = 16$ pour suivre la qualité de la solution dans le temps, puis avec une taille de flotte variable $n \in [4, 36]$ sur 200 cycles pour chaque scénario. Il est à noter qu'il est impossible d'atteindre un taux de qualité de service de 100% dans ces scénarios, car il y aura toujours des demandes qui seront générées jusqu'au dernier cycle, en supposant que l'exécution du scénario continue à les servir, alors que l'exécution s'arrête au dernier cycle, les laissant non servies. Bien que les valeurs de QoS de notre algorithme soient proches de celles générées par l'approche gloutonne, elles restent légèrement supérieures à celles-ci dans la plupart des cas, comme le montre la Figure 8. En partant d'une petite flotte de 4 véhicules, l'heuristique « *Pull-demand* » permet d'obtenir des solutions avec les mêmes valeurs de QoS et de QoB que celles de l'algorithme glouton. En augmentant la taille de la flotte, plus de demandes peuvent être

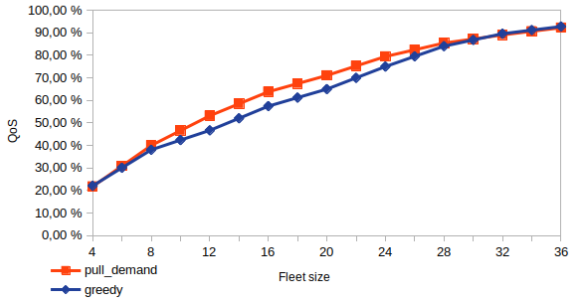


FIGURE 8 – QoS avec des flottes de tailles croissantes

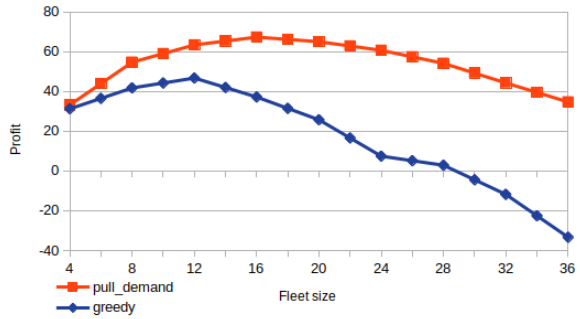


FIGURE 9 – QoB avec des flottes de tailles croissantes

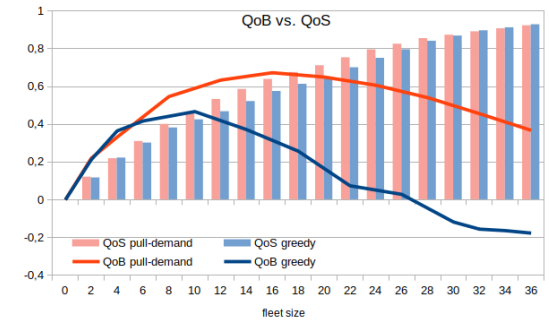


FIGURE 10 – Évolution de QoS vs. QoB

satisfaites, ce qui augmente la valeur de QoS et de QoB. Nous constatons que l'augmentation de ces valeurs pour l'heuristique est plus importante que celle de l'approche gloutonne. Cela peut s'expliquer par le fait que la planification des demandes améliore le profit du système dans un avenir prévisible, car elle réduit le processus de déplacement sans destination spécifique jusqu'à ce qu'une nouvelle demande soit choisie, ce qui est le comportement des véhicules dans l'algorithme glouton.

La valeur de la qualité de service continue de croître lorsque la taille de la flotte augmente, jusqu'à atteindre un seuil n_{QoS} pour lequel l'ajout de nouveaux véhicules devient inutile, car toutes les demandes reçues dans le système maintenant ou à l'avenir (sauf celles qui sont reçues dans les derniers moments d'exécution) peuvent être servies avec la taille actuelle de la flotte. Il en va de même pour la QoB, mais la différence ici est que les véhicules

©AfIA 2020

ajoutés entraîneront des dépenses opérationnelles supplémentaires, ce qui entraîne une perte de valeur du bénéfice après avoir atteint son seuil de croissance n_{QoB}. Habituellement, n_{QoB} est inférieur à n_{QoS}, et nous pouvons observer un compromis entre l'amélioration de la QoS ou de la QoB.

D'après la Figure 9, nous constatons que la flotte gloutonne dispose de $n_{QoB}^{\text{greedy}} = 12$ alors que sa QoS n'est que d'environ 60%, tandis que $n_{QoB}^{\text{pull-demand}} = 16$ avec une QoS d'environ 70%. Notez que $n_{QoB}^{\text{gloutonne}} < n_{QoB}^{\text{pull-demand}}$ et même si elle diminue ensuite, la valeur de $n_{QoB}^{\text{pull-demand}}$ reste supérieure à $n_{QoB}^{\text{gloutonne}}$. Cela donne un plus large éventail d'options pour combiner les améliorations de la solution fournie (QoS et QoB). Les résultats ci-dessus montrent que dans tous les cas, la programmation de plusieurs demandes à l'avance avec le protocole d'optimisation « *Pull-demand* » donne de meilleurs résultats que la programmation d'une seule demande, tout en nécessitant un temps de calcul réduit, et aucune information globale.

7 Conclusion

Nous avons proposé dans cet article un protocole décentralisé pour l'échange de demandes, s'appuyant sur une heuristique d'insertion, pour allouer des demandes aux véhicules dans le contexte du transport à la demande dynamique. Nous montrons au travers des exemples que le protocole de demande d'échange de demandes peut être une amélioration prometteuse de la qualité des solutions. Afin d'évaluer la faisabilité du protocole proposé, nous avons évalué les résultats de notre technique sur des données synthétiques pour les taxis opérant dans la ville de Saint-Étienne, et avons montré qu'elle surpasse une approche gloutonne classique. Dans les travaux futurs, nous prévoyons d'évaluer l'efficacité, la performance, la robustesse et l'optimalité de cette heuristique par rapport à différentes approches, en simulant différents paramètres sur la distribution de l'information, les critères de décision et différents niveaux de dynamique du problème.

Références

[1] Niels A.H. Agatz, Alan L. Erera, Martin W.P. Savelsbergh, and Xing Wang. Dynamic ride-sharing : A simulation study in metro atlanta. *Transportation Research Part B : Methodological*, 45(9) :1450 – 1464, 2011.

[2] Ann Melissa Campbell and Martin Savelsbergh. Efficient insertion heuristics for vehicle routing and scheduling problems. *Transportation science*, 38(3) :369–378, 2004.

[3] Peter Cramton, Yoav Shoham, and Richard Steinberg. An overview of combinatorial auctions. *ACM SIGecom Exchanges*, 7(1) :3–14, December 2007.

[4] Panayiotis Danassis, Aris Filos-Ratsikas, and Boi Faltings. Anytime Heuristic for Weighted Matching Through Altruism-Inspired Behavior. In *Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 215–222, Macao, China, August 2019.

[5] Kakan Chandra Dey, Anjan Rayamajhi, Mashrur Chowdhury, Parth Bhavsar, and James Martin. Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network – Performance evaluation. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 68 :168–184, July 2016.

[6] Malcolm Egan and Michal Jakob. Market Mechanism Design for Profitable On-Demand Transport Services. *arXiv :1501.01582 [cs]*, January 2015.

[7] Mohamad El Falou, Mhamed Itmi, Salah El Falou, and Alain Cardon. On demand transport system's approach as a multi-agent planning problem. In *2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*, pages 53–58. IEEE, 2014.

[8] Andrey Glaschenko, Anton Ivaschenko, George Rzevski, and Petr Skobelev. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies. *AAMAS*, page 8, 2009.

[9] Josep Maria Salanova Grau and Miquel Angel Estrada Romeu. Agent Based Modelling for Simulating Taxi Services. *Procedia Computer Science*, 52 :902–907, 2015.

[10] Josep Maria Salanova Grau, Miquel Angel Estrada Romeu, Evangelos Mitsakis, and Iraklis Stamos. Agent based modeling for simulation of taxi services. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 1(2) :159–163, 2013.

[11] Gauthier Picard, Flavien Balbo, and Olivier Boissier. Approches multiagents pour l'allocation de courses à une flotte de taxis autonomes. In *RIA2018*, number 2 in Revue d'intelligence artificielle, pages 223–247, 2018.

[12] Wen Shen and Cristina Lopes. Managing Autonomous Mobility on Demand Systems for Better Passenger Experience. In *PRIMA 2015 : Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, volume 9387, pages 20–35, Cham, 2015. Springer International Publishing.

[13] Marius M. Solomon. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35(2) :254–265, 1987.

[14] Rinde R.S. van Lon, Tom Holvoet, Greet Vanden Berghe, Tom Wenseleers, and Juergen Branke. Evolutionary synthesis of multi-agent systems for dynamic dial-a-ride problems. In *Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference companion - GECCO Companion '12*, page 331, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2012. ACM Press.

Suivi thérapeutique intelligent par recommandation à base d'ontologie et de règles

X. Goblet[1], C. Rey[2]

[1] Jeolis Solutions – Chamalières, France
[2] LIMOS – Université Clermont Auvergne, France

xavier.goblet@lojelis.com, christophe.rey@uca.fr

Résumé

Le domaine de l'Education Thérapeutique du Patient vise à habituer un patient à adopter les bons comportements qui lui permettront au quotidien de renforcer l'action d'un traitement médical. Dans ce contexte, nous présentons une application proposant automatiquement des défis ludiques à un patient souffrant d'obésité. Le processus de recommandation est basé sur l'usage d'une ontologie des patients, des défis et de règles pédagogiques pour le choix des meilleurs défis. Nous utilisons les standards du web sémantique que sont OWL2, SWRL, et le raisonneur Pellet, orchestrés par un programme en Python grâce au module Owlready2. Nous discutons des résultats obtenus ainsi que de l'intérêt d'utiliser des langages déclaratifs tels que OWL2 et SWRL du point de vue du génie logiciel.

Mots-clés

Education thérapeutique du patient, recommandation, OWL2, SWRL, Owlready2, langage déclaratif

Abstract

The field of patient education aims at accustoming a patient to adopt the right behaviors which will allow him daily to reinforce the action of a medical treatment. In this context, we present an application automatically offering fun challenges to an obese patient. The recommendation process is based on the use of an ontology that models the patients, the challenges and on educational rules for choosing the best challenges. We use the semantic web standards OWL2, SWRL, and the Pellet reasoner, orchestrated by a program in Python thanks to the Owlready2 module. We discuss the obtained practical results as well as the interest to use declarative languages such as OWL2 and SWRL in software engineering.

Keywords

patient education, recommendation, OWL2, SWRL, Owlready2, declarative language

1 Introduction

De plus en plus de pathologies chroniques sont prises en charge par des entretiens de suivi avec les professionnels de santé (PS). Ce suivi est efficace si les entretiens sont le moins espacés dans le temps, le plus souvent en présentiel (face-à-face) et si le patient est pleinement acteur de sa thérapie. L'objectif d'un entretien est, après un diagnostic, la mise en place de bonnes pratiques et leur maintien. C'est en cela que l'on peut parler d'éducation thérapeutique du patient (ETP) [6]. Les principaux freins à une ETP efficace sont : le manque de temps des praticiens et patients, les contraintes économiques du monde de la santé, les contraintes écologiques (limiter les déplacements physiques par exemple), une accessibilité grandissante d'informations sur internet (pas toujours fiables), un contenu peu adapté à l'individu, une faible adhésion si la motivation du patient n'est pas présente [6, 18]. Ces freins sont par exemple vérifiés dans le contexte d'une expérience d'ETP sur le bassin clermontois pour prévenir l'obésité infantile dans une famille à risques (au moins un enfant en surpoids) [17]. Pendant six mois, une famille incluse dans ce protocole est suivie sur les axes Nutrition, Activités Physiques Adaptées (APA), et Parentalité/Sociabilité par trois spécialistes qui se déplacent chacun dans la famille pour cinq ateliers de suivi. Les six mois suivant cette première période, la famille n'est plus suivie ; elle rentre alors en phase d'autonomie. Au bout d'un an, le protocole se finit par des entretiens de bilan avec chaque PS et le(s) médecin(s). Il a ainsi été constaté, en l'absence d'un suivi régulier, une baisse de motivation des participants. De plus, la phase d'autonomie est souvent préjudiciable aux progrès observés les six premiers mois. Dans ce contexte, dans le même esprit que [7], un projet de digitalisation de cette ETP est en cours d'élaboration. L'objectif à partir d'une application mobile est d'augmenter singulièrement le suivi des patients, de l'individualiser en utilisant des outils basés sur de l'IA et de maintenir la motivation via une ludification du protocole au moyen de défis personnels en complément des entretiens de suivi. Ce concept de défis (cf. tableau 1) est le pendant des tâches à accomplir par le patient dans le cadre des thérapies cognitives et comportementales (TCC). « Chaque patient progresse à son propre rythme » est aussi le principe fondateur des psychologues cliniciens des TCC. De plus, mis à part la toute première fois, c'est toujours le patient qui choisit son prochain défi. Nous avons conçu « ORALOOS » un Outil de Recommandation d'Activités Ludiques basé sur une Ontologie Opération-

©AfIA 2020

Nutrition (nb=499)	- Buvez seulement de l'eau à vos repas. - La télévision est éteinte lors de vos repas.
Activités Physiques Adaptées (nb=207)	- Descendez un arrêt de bus/métro/tram avant destination et faites-le reste à pieds. - Marchez d'un bon pas sur les trajets courts.
Parentalité /Sociabilité (nb=144)	- Essaie de parler sans pouce ni doudou dans la bouche. - Prenez un moment pour faire une activité avec votre conjoint(e).

TABLE 1 – Des exemples de défis, définis par une psychologue de Jeolis avec les praticiens de Proxob [17].

nelle de Suivi, pour permettre un suivi adaptatif du patient. Nous l'avons défini en utilisant les langages standard du Web sémantique OWL2 et SWRL [9, 10], et le raisonneur Pellet, le tout orchestré par du code Python (via le framework Owlready2 [11]). L'ontologie est dite opérationnelle puisque son contenu va déterminer les traitements effectués par l'application. Les deux contributions de cet article sont : (i) la description de la conception d'ORALOOS, de son ontologie et de son usage dans la gestion et la recommandation des défis personnels pour une meilleure ETP, et (ii) les conséquences, en termes de génie logiciel, de la nature déclarative d'OWL2 et de SWRL, dans le contexte d'une application en langage impératif Python.

2 Travaux antérieurs

Nous nous sommes inspirés des travaux autour de l'utilisation de la logique du premier ordre dans les AEHS (Adaptive Educational Hypermedia Systems) [14, 8]. Chaque système adaptatif, en tant que système hypermédia éducatif, fait des hypothèses sur les documents et leurs relations dans un espace documentaire. Il propose un modèle d'utilisateur pour spécifier diverses caractéristiques d'utilisateurs individuels ou de groupes d'utilisateurs. Pendant l'exécution, il collecte des observations sur les interactions de l'utilisateur. Sur la base de l'organisation de l'espace documentaire sous-jacent, ainsi que des informations du modèle utilisateur et de l'observation du système, une fonctionnalité adaptative est fournie. Un AEHS se conceptualise sous la forme de quatre composants ou espaces : DOCS pour DOCument Space, UM pour User Model, OBS pour OBServations et AC pour Adaptation Component. Cette architecture correspond à nos besoins dans le domaine de l'ETP si l'on remplace les utilisateurs par les patients et si l'on considère que la fonctionnalité adaptative consiste à recommander les meilleurs défis aux patients. Pour la modélisation du domaine, nous nous sommes tournés vers les langages de la logique du premier ordre. En effet, des sous-langages de cette logique permettent la représentation de connaissances dynamiques sous forme de règles et la représentation de connaissances statiques sous forme d'énoncés et de faits. Ces deux types de connaissances sont cruciaux pour un système hypermédia éducatif adaptatif qui doit permettre l'expression et la réutilisation des règles d'adaptation (connaissances dynamiques) dans différents contextes en prenant en compte des métadonnées pour l'adaptation (connaissances statiques) [2]. Dans le domaine du web sémantique, OWL2 et SWRL figurent parmi les langages du premier ordre les plus utilisés et permettent le découplage entre représentation de connaissances dynamiques (en SWRL) et statiques (en OWL2). Le profil EL d'OWL2 [12] assure de plus de bonnes performances dans les raisonnements associés (subsomption, satisfaisabilité, traitement de requêtes), ces derniers étant traitables dans la plupart des cas. SWRL est quant à lui un langage de règles basé sur les clauses définies (sous-ensemble de la logique du premier ordre) étendu par des prédicats qui sont des concepts OWL2. En dehors des langages du web sémantique, nous avons aussi regardé le langage IDP (premier ordre augmenté par la récursivité) [4] qui apparaît très intéressant sur le plan théorique étant donné la possibilité d'exécuter plusieurs types d'inférences différentes. Cependant sur le plan pratique, il semble moins intéressant que les langages du web sémantique étant donné une plus grande difficulté d'apprentissage a priori, l'absence de recommandation W3C associée, ainsi que d'outil de modélisation du type Protégé [15]. De plus on s'interroge sur la possibilité de passage à l'échelle d'un tel langage. C'est pourquoi nous avons choisi OWL2 avec un profil EL et SWRL. Plus précisément, nous utilisons le profil EL d'OWL2 augmenté avec des propriétés d'objet fonctionnelles ainsi qu'avec le constructeur d'union de classes et la possibilité de définir des types intervalles de valeurs ayant une valeur minimale. Nous gagnons donc en expressivité au détriment de la complexité des raisonnements qui perd son caractère traitable mais n'en devient pas prohibitive pour autant en pratique (voir la section 5). Dans la suite, nous supposons le lecteur familier avec OWL2 et SWRL qu'on ne peut redéfinir ici par soucis de synthèse.

3 Approche

En section 3.1, nous expliquons la modélisation déclarative sous la forme des quatre espaces/modèles d'un AEHS en utilisant OWL2 et SWRL. En section 3.2, nous présentons le module python permettant d'accéder à l'ontologie et de raisonner avec elle.

3.1 Modélisation déclarative de l'ontologie

L'ontologie OWL2 et les règles SWRL ont été définies en utilisant l'éditeur Protégé. Comme évoqué précédemment, OWL2 est utilisé pour la modélisation statique du domaine de l'ETP, c'est-à-dire pour décrire les notions qui structurent le domaine (comme par exemple les catégories de patients ou les caractéristiques d'un défi), et SWRL est utilisé pour décrire les aspects dynamiques du domaine, c'est-à-dire les règles métier (notamment celles qui définissent le processus de recommandation de défis aux patients). Dans ce qui suit, nous présentons certaines parties de l'ontologie OWL2 sous forme de diagrammes de classes UML. En effet, la connaissance pouvant être décrite avec le profil EL de OWL2 utilisé correspond aux notions de classe et de relation en UML. Plus précisément, une classe OWL2 est représentée par une classe UML, une propriété OWL2

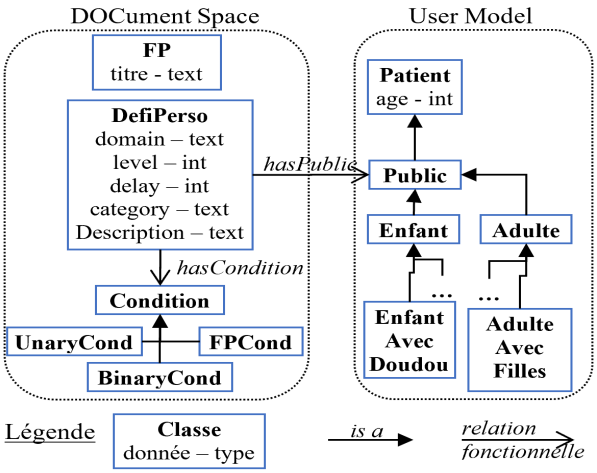


FIGURE 1 – Les espaces Document et Utilisateur

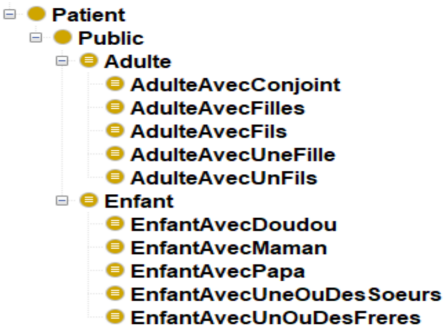


FIGURE 2 – Hiérarchie des différents types de patients

par une relation (ou association) UML [1] , et une relation de subsomption entre classes par une relation d'héritage. Cela nous permet de regrouper en une seule vue graphique, les classes et les propriétés OWL2. Nous voyons maintenant la modélisation des quatre parties du cadre des AEHS.

DOCument Space (cf. Fig.1) : c'est l'espace documentaire de l'ontologie qui contient les défis personnels, ainsi que des fiches pédagogiques (FP). Un défi personnel est défini obligatoirement par un domaine d'application (Nutrition, APA, ou Parentalité), le public concerné par la relation fonctionnelle [2] hasPublic, un niveau de difficulté (niveau croissant avec un entier), et une échéance (entier croissant : 1 → Jour, 2 → WE, 3 → Semaine, 4 → Mois). Les autres données ou relations sont optionnelles : une condition d'exécution du défi par la relation hasCondition (avoir lu une fiche pédagogique ou une caractéristique spécifique du public ciblé), une catégorie du défi dans le domaine et une description textuelle du défi. Dans un domaine, les défis sont définis indépendamment et il n'y pas non plus de dépendances entre les domaines.

User Model (cf. Fig.1) : c'est l'espace des utilisateurs qui porte sur la classe Patient défini par un âge qui permet de classifier le public auquel il appartient. Les classes Adulte et Enfant peuvent être spécialisées chacune en sous-

1. Dans la suite, on parlera de manière interchangeable de propriété (OWL2) ou de relation (UML).

2. Une relation est fonctionnelle lorsqu'il n'y a qu'une seule valeur possible entre les deux classes (1 → 1).

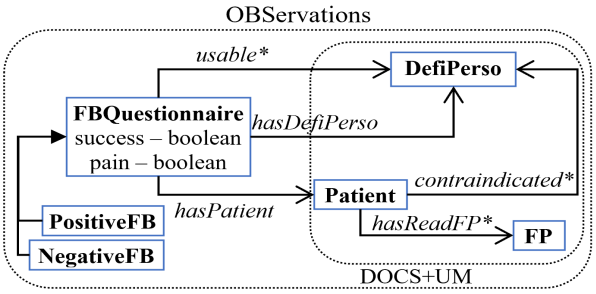


FIGURE 3 – Espace des observations

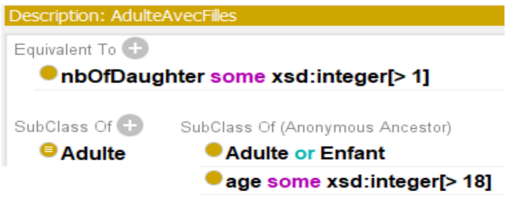


FIGURE 4 – La classe AdulteAvecFilles sous Protégé

classes qui portent une caractéristique optionnelle du patient (exemples : nombre de frères ou de sœurs, avoir un conjoint. . .). La figure 2 montre la hiérarchie des différents types de patients et la figure 4 montre la modélisation de la classe AdulteAvecFilles sous Protégé. Un individu peut appartenir à plusieurs classes : un enfant de 12 ans, vivant uniquement avec sa mère et possédant un doudou est : [Enfant, EnfantAvecDoudou, EnfantAvecMaman]. A contrario un adulte sans conjoint, ni fils, ni fille appartient uniquement à la classe Adulte.

OBServations (cf. Fig.3) : c'est l'espace des observations qui contient toutes les interactions des utilisateurs avec le système. Le premier type d'interaction est le questionnaire d'auto-évaluation (classe FBQuestionnaire, FB pour "feedback"). A échéance d'un défi, un questionnaire d'auto-évaluation est envoyé au patient sur son application mobile. En répondant à une série de questions, il évalue son succès ou non dans la réalisation du défi (booléen success), ainsi que sa difficulté ou non d'exécution (booléen pain). Chaque feed-back est contextualisé par le défi courant (relation fonctionnelle hasDefiPerso) et le patient ayant réalisé le défi (relation fonctionnelle hasPatient). La relation non fonctionnelle [3] usable filtre en amont tous les défis applicables de même domaine et même public que le défi courant à l'instant du feed-back. Ainsi tous les défis qui ne sont plus applicables après un feed-back ne sont pas dans usable. Un défi est applicable dans deux cas. Premièrement, il ne doit pas être contre-indiqué pour le patient. Cela correspond à la relation non fonctionnelle contraindicated. Par exemple un défi réalisé avec succès n'est plus proposé, ou bien un professionnel de santé peut explicitement interdire certains défis pour certains patients. Dans les deux cas le défi est dans contraindicated. Deuxièmement, si ce défi porte une condition, elle doit être vérifiée à cet instant, sinon le défi n'est pas applicable. C'est le cas de la relation

3. Une relation est non fonctionnelle lorsqu'il y a plusieurs valeurs possibles entre les deux classes (1 → *). Ce type de relation exprime aussi une liste dynamique d'informations.

©AfIA 2020

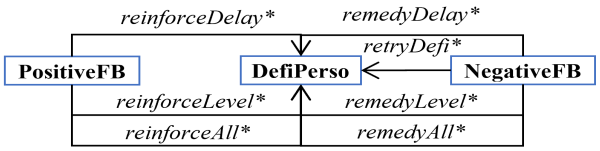


FIGURE 5 – Les relations selon la classe de feed-back

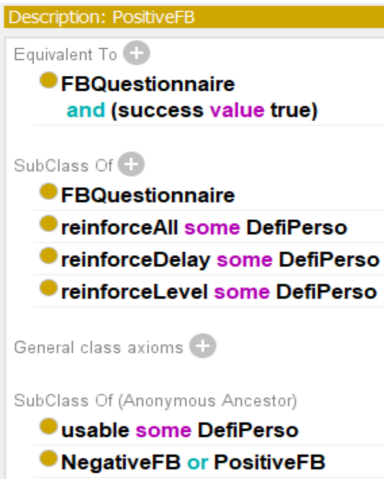


FIGURE 6 – Spécification Protégé de PositiveFB

non fonctionnelle hasReadFP qui concerne les fiches pédagogiques lues/vues par le patient et qui conditionne l'exécution de certains défis. En résumé, la relation usable est une liste dynamique des défis applicables. Comme évoqué à la section 5, mettre à jour cette liste nécessite du code Python. A contrario, une fois usable calculée, seules les règles SWRL (cf. Fig.7) sont nécessaires pour que le système établisse dynamiquement ses recommandations de défis à venir.

Adaptation Component (cf. Fig.5) : c'est l'espace des règles d'adaptation qui implémente les principes de progression au rythme de chaque patient et qui détermine les défis à recommander. Nous avons vu que l'espace des défis est important et que, sans guide, le patient ne progressera pas. Nous avons donc, en relation avec les experts psychologues et pédagogues, défini des règles métier en s'inspirant de la pédagogie behavioriste [5]. Le premier cas est celui où l'on renforce le succès en proposant des défis un peu plus difficiles. Cela se traduit dans la classe DefiPerso par une incrémentation du niveau, de l'échéance ou bien des deux. Cette incrémentation est exprimée par les règles R1, R2 et R3 de la figure 7. Le second cas est celui où l'on remédie à l'échec en proposant des défis un peu moins difficiles. Cela se traduit dans la classe DefiPerso par une décrémentation du niveau, de l'échéance ou bien des deux. Cette décrémentation est exprimée par les règles R5, R6 et R7 de la figure 7. On peut vérifier que les classes et les propriétés non fonctionnelles OWL2 présentes dans les figures 5 et 6 sont bien utilisées en prédicats dans les règles précédemment citées. Pour un même type de feed-back, chaque règle associée à une relation non fonctionnelle peut être activée en même temps (cependant, elles ne contiennent pas les mêmes défis). La règle R4 de la figure 7 implémente le fait qu'un défi évalué avec succès n'est plus proposé au patient en augmentant sa relation non fonctionnelle contraindicated. De même, les règles R8 et R9 de la figure 7 stipulent qu'un défi en échec peut soit être proposé de nouveau (retryDefi) au patient si une cause extérieure sans lien avec sa pathologie en a empêché la réussite (par ex. une météo défavorable), soit n'être plus proposé au patient s'il a échoué et éprouvé une difficulté.

```
R1 PositiveFB(?fb) ^ hasDefiPerso(?fb, ?df) ^
    hasLevel(?df, ?l) ^ hasDelay(?df, ?delay) ^
    swrlb:add(?nl, ?l, 1) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasLevel(?ndf, ?nl) ^ hasDelay(?ndf, ?delay)
    -> reinforceLevel(?fb, ?ndf)
R2 PositiveFB(?fb) ^ hasDefiPerso(?fb, ?df) ^
    hasDelay(?df, ?delay) ^ hasLevel(?df, ?l) ^
    swrlb:add(?ndelay, ?delay, 1) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasLevel(?ndf, ?l) ^ hasDelay(?ndf, ?ndelay)
    -> reinforceDelay(?fb, ?ndf)
R3 hasLevel(?ndf, ?nl) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df) ^ swrlb:add(?nl, ?l, 1) ^
    hasDelay(?df, ?delay) ^ hasDelay(?ndf, ?ndelay) ^
    swrlb:add(?ndelay, ?delay, 1) ^ PositiveFB(?fb) ^
    hasLevel(?df, ?l)
    -> reinforceAll(?fb, ?ndf)
R4 PositiveFB(?fb) ^ hasDefiPerso(?fb, ?df) ^
    hasPatient(?fb, ?pat)
    -> contraindicated(?pat, ?df)
R5 hasLevel(?ndf, ?nl) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df) ^ swrlb:greaterThan(?l, 1) ^
    hasDelay(?ndf, ?delay) ^ hasDelay(?df, ?delay) ^
    swrlb:subtract(?nl, ?l, 1) ^ NegativeFB(?fb) ^
    hasLevel(?df, ?l)
    -> remedyLevel(?fb, ?ndf)
R6 hasLevel(?ndf, ?l) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df) ^
    swrlb:greaterThan(?delay, 1) ^
    swrlb:subtract(?ndelay, ?delay, 1) ^
    hasDelay(?df, ?delay) ^
    hasDelay(?ndf, ?ndelay) ^ NegativeFB(?fb) ^
    hasLevel(?df, ?l)
    -> remedyDelay(?fb, ?ndf)
R7 hasLevel(?ndf, ?nl) ^ usable(?fb, ?ndf) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df) ^ swrlb:greaterThan(?l, 1) ^
    swrlb:greaterThan(?delay, 1) ^
    swrlb:subtract(?ndelay, ?delay, 1) ^
    hasDelay(?df, ?delay) ^ swrlb:subtract(?nl, ?l, 1) ^
    hasDelay(?ndf, ?ndelay) ^ NegativeFB(?fb) ^
    hasLevel(?df, ?l)
    -> remedyAll(?fb, ?ndf)
R8 NegativeFB(?fb) ^ pain(?fb, false) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df)
    -> retryDefi(?fb, ?df)
R9 NegativeFB(?fb) ^ pain(?fb, true) ^
    hasDefiPerso(?fb, ?df) ^ hasPatient(?fb, ?pat)
    -> contraindicated(?pat, ?df)
```

FIGURE 7 – Les règles SWRL de recommandation de défis. Les paramètres ?x sont des variables, les prédicats sont des classes ou des relations OWL2, et swrlb préfixe des fonctions prédéfinies SWRL

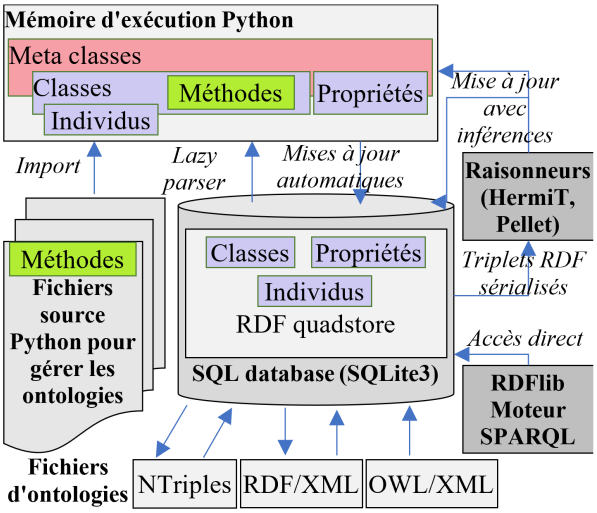


FIGURE 8 – Architecture d'Owlready2 extrait de [11]

```
with onto:
 class FBQuestionnaire(Thing):
  def preFilter(self):
   dom = self.hasDefiPerso.domain
   pub = self.hasDefiPerso.hasPublic
   contraindicates = self.hasPatient.contraindicated
   usables = onto.search(type=onto.DefiPerso,
                         domain=dom,
                         hasPublic=pub)
   # le defi courant doit etre enleve
   current = self.hasDefiPerso
   usables.remove(current)
   if len(contraindicates) != 0:
    for df in usables:
     if df in contraindicates:
      usables.remove(df)
   for df in usables:
    cond = df.hasCondition
    if (cond is None)
       or
       (cond.checkApplicability(self.hasPatient)):
     self.usable.append(df)
   return True
```

FIGURE 9 – Classe FBQuestionnaire

3.2 Programmation impérative d'ontologie

Nous avons programmé notre application en langage Python, avec l'aide d'Owlready2 un module Python (version 3 du langage) facilitant la programmation d'ontologies (accès aux données et connaissances, exécutions d'inférences, lecture et écriture avec les formats standards du Web sémantique). Ce module inclut nativement une base de triplets (appelée quadstore) et les raisonneurs HermiT et Pellet [4]. En plus des raisonnements fournis par ces deux raisonneurs, l'utilisateur d'Owlready2 peut en développer d'autres en Python. L'architecture d'Owlready2 est présentée à la figure 8. Avec Owlready2, toutes les classes OWL2 correspondent à des classes Python. Nous illustrons ce principe avec la classe OWL2 FBQuestionnaire contenant la méthode preFilter() qui met à jour la relation usable. La figure 9 montre le code python de cette classe.

Par ailleurs les classes FPCond et UnaryCond implémentent la vérification dynamique d'une condition d'applicabilité d'un défi (cf. Fig.10). On ne peut pas implémenter cette vérification grâce à des règles SWRL car il faudrait pouvoir exprimer des négations dans le corps des règles, voire même écrire des règles hors de la logique du premier ordre (cf. section 5).

4. Voir les sites web `http://www.hermit-reasoner.com/` et `https://github.com/stardog-union/pellet`.

```
class FPCond(Thing):
 def checkApplicability(self, patient):
  fp = self.hasFP
  readings = list(patient.hasReadFP)
  if fp in readings:
   return True
  return False

class UnaryCond(Thing):
 def checkApplicability(self, patient):
  classe = self.type
  subclasses = str(patient.is_a)
  if classe in subclasses:
   return True
  return False
```

FIGURE 10 – Les classes FPCond et UnaryCond

```
with onto:
 pat = onto.Patient(patient.ident,
                    age=patient.age,
                    **patient.kargs)
 try:
  sync_reasoner_pellet([onto],
        fer_property_values = True,
        infer_data_property_values = True)
 except OwlReadyInconsistentOntologyError:
  destroy_entity(pat)
  raise HTTPException(status_code=500,
        detail="Inconsistent ontology!"+
        "Check if patient age " +
        "is aligned with optional" +
        "characteristics...")
 return patient
```

FIGURE 11 – Création et classement d'un patient

La figure 11 illustre le raisonnement permettant de classer le patient en adulte ou enfant ; si l'individu possède des caractéristiques optionnelles, le raisonnement affine la classification dans l'une des deux branches de la hiérarchie des patients (cf. Fig.2), tout en gérant les inconsistantes éventuelles (comme par exemple le fait qu'un enfant n'a pas de conjoint).

Le second raisonnement est la recherche des réponses à une requête et est implémenté en utilisant le raisonneur Pellet couplé à notre fonction ad-hoc preFilter() (cf. Fig.12) : la première étape consiste à créer un individu de classe FBQuestionnaire avec les différents paramètres d'entrées. La seconde étape consiste à appeler la méthode preFilter() qui permet de contextualiser dynamiquement le feed-back en calculant les défis applicables du domaine pour le patient (c'est-à-dire en mettant à jour la relation usable). La troisième étape consiste à lancer le raisonneur Pellet pour trouver le type de feed-back (de la classe FB) positif ou négatif et appliquer en conséquence les règles SWRL.

4 Intégration en application de suivi

Dans le cadre d'une architecture orientée services, ORALOOS est un composant micro-service qui interagit avec d'autres applications via une API Web REST comme illustré sur la figure 13. Il utilise pleinement la base de données nativement intégrée d'Owlready2 pour persister la base ontologique.

©AfIA 2020

```
with onto:
 fdbk = onto.FBQuestionnaire(fb.fbID,
                             success=fb.success,
                             pain=fb.pain,
                             hasDefiPerso=defi,
                             hasPatient= pat)
 fdbk.preFilter()
 try:
  sync_reasoner_pellet([onto],
             infer_property_values = True,
             infer_data_property_values = True)
  except OwlReadyInconsistentOntologyError:
   raise HTTPException(status_code=500,
                       detail="Inconsistent ontology!")
  if isinstance(fdbk, onto.PositiveFB):
   response = PosFBAPI(ID = fb.fbID,
              patientID = fb.patientID,
                   defiID = fb.defiID,
    reinforceAll = format_defis(fdbk.reinforceAll),
    reinforceLevel = format_defis(fdbk.reinforceLevel),
    reinforceDelay = format_defis(fdbk.reinforceDelay)
                    )
  else:
   response = NegFBAPI(ID = fb.fbID,
              patientID = fb.patientID,
                   defiID = fb.defiID,
    remedyAll = format_defis(fdbk.remedyAll),
    remedyLevel = format_defis(fdbk.remedyLevel),
    remedyDelay = format_defis(fdbk.remedyDelay),
    retry = format_defis(fdbk.retryDefi)
                    )
return response
```

FIGURE 12 – Mise à jour des défis à recommander

4.1 API Web

Les principales interactions entre le back office et Oraloos permettent de peupler la base d'individus : createPatient, createChallenge, createFeedBack. Ces requêtes sont initiées par le serveur BO. Seules createPatient et createFeedBack déclenchent le raisonneur Pellet comme présenté en section 3.2. La réponse principale d'ORALOOS, contient les recommandations calculées par les règles dans les différentes listes, selon le type de feed-back. C'est le serveur BO qui les notifie alors au Patient.

4.2 Premiers résultats

Le tableau 2 montrent quelques métriques issues de Protégé. La figure (a) du tableau 2 concerne l'ontologie avant insertion des défis. Après peuplement de la base avec les 850 défis, et après inférence, nous constatons normalement une augmentation du nombre d'individus, mais aussi une augmentation importante du nombre d'axiomes (figure (b) du tableau 2). Evidemment, il y a une augmentation d'individus et d'axiomes lors des créations des patients et des feedbacks. Nos premiers tests montrent un temps de raisonnement moyen de l'ordre de 3-4 secondes lors de la création d'un patient et un temps de 6-7 secondes lors de la création d'un feed-back. Ces temps peuvent sembler importants mais nous rappelons que notre besoin de recommandations n'est pas en temps réel ; l'échéance minimale d'un défi est la journée. Ces résultats sont à confirmer avec une utilisation par des patients en conditions réelles lorsque l'application sera industrialisée.

5 Apports et limites de l'ontologie

Le principal avantage lié à l'usage d'une ontologie et d'un raisonneur dans notre application d'ETP est l'ajout d'une dimension déclarative forte au développement et à la maintenance de cette application. Cela permet ainsi d'éviter

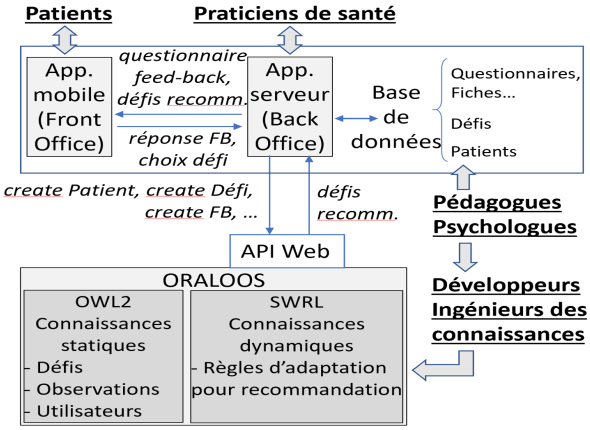


FIGURE 13 – Architecture de l'application de suivi à distance pour une ETP interactive, ludique et adaptative

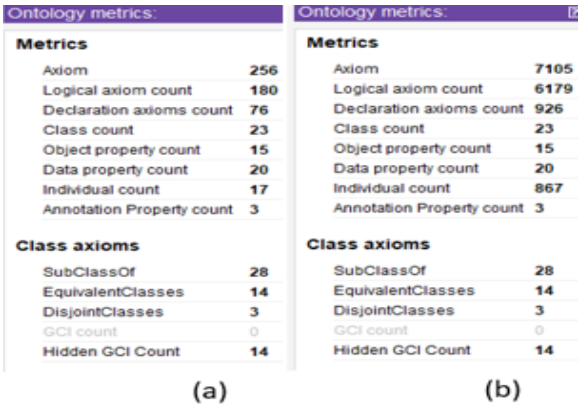


TABLE 2 – Quelques métriques Protégé

l'écriture d'un code Python complexe puisque toute la partie nécessitant la classification des connaissances et données ainsi que le requêtage avec les règles sont entièrement pris en charge par le raisonneur. Par ailleurs, la connaissance stockée dans l'ontologie est facilement extensible et maintenable puisqu'il suffit d'éditer le fichier avec un éditeur dédié comme Protégé.

Nous mettons ici en avant le fait que le niveau de déclarativité permis par le couple (ontologie avec règles, raisonneur) va bien au-delà de celui permis par un couple (fichiers texte de paramètres, bibliothèque de fonctions en python). En effet, grâce aux règles notamment, le développeur (cf. Fig.13) a la possibilité, par exemple, d'ajouter une nouvelle règle métier à l'application et ce déclarativement, c'est-à-dire en décrivant seulement les états initial et final de l'application de cette règle. Avec un langage impératif tel que Python, cela correspondrait à l'ajout d'une nouvelle fonction au sein d'une bibliothèque où, en plus des états initial et final associés à la fonction, nous devrions aussi décrire la gestion de la mémoire et les structures de contrôle nécessaires au calcul fait par la fonction. En résumé, nous pouvons étendre ou modifier très simplement les règles métier sans manipulations compliquées dans le code de l'application. Une autre conséquence intéressante de cette approche déclarative en OWL2 est la possibilité d'ajouter de nouveaux concepts du domaine uti-

lisables dans de nouvelles règles. C'est donc bien plus puissant qu'un fichier texte contenant des paramètres qu'on ne peut que modifier sans pouvoir en ajouter d'autres non prévus par le développeur d'origine. Ainsi une telle application nécessite-t-elle moins de développeurs, de temps de développement et de maintenance. Cependant, l'ontologie OWL2 avec règles SWRL présente quelques limites. Comme évoqué en section 3.2, certains traitements, notamment de réification , sortent du cadre de la logique du premier ordre. Par exemple, la méthode checkApplicability() de la classe FPCond de la figure 10 pourrait être traduite par la règle suivante :
UnaryCond(?cond) ^ type(?cond, ?classe) ^?classe(?pat) -> applicable(?cond, ?pat)
où la variable ?classe est tantôt utilisée en objet du triplet type(?cond, ?classe) de propriété type, tantôt utilisée en propriété dans le triplet ?classe(?pat). Une autre limite importante citée précédemment est celle de l'impossibilité d'exprimer la négation dans le corps d'une règle SWRL. Par exemple, à la figure 9, le calcul d'une différence ensembliste avec l'instruction :

```
if df in contraindicates:
        usables.remove(df)
```

pourrait être exprimée avec la règle non SWRL (avec ?x0 un FBQuestionnaire et ?x un DefiPerso) :
NOT contraindicates(?x0, ?x) -> usables(?x0, ?x)
Enfin, l'impossibilité bien connue d'exprimer certains cas de jointures en OWL2 impose de décrire certaines connaissances statiques sous forme de règles SWRL. Ceci peut être une gêne dans la mesure où cela brise le principe de modélisation réservant les règles SWRL à la modélisation des règles métier, c'est-à-dire à la partie dynamique des connaissances (cf. section 3.1).

6 Perspectives

Un axe de nos futurs travaux est de conceptualiser les notions de profil et de parcours Patient. Nous allons évidemment nous intéresser au choix du défi par le patient suite aux recommandations faites par ORALOOS. Comme le feed-back mémorise de quelle relation non fonctionnelle est issue le défi choisi par le patient, nous allons définir avec les psychologues et pédagogues des profils pour le patient, par exemple : performant, persévérant, prudent, etc. Ensuite, en analysant plus finement le parcours de chaque patient et son profil, à partir de modèles machine learning ou de métarègles, nous pourrons moduler les règles de recommandation behavioristes.
Par ailleurs, nous voulons améliorer la modélisation statique OWL2 de l'ontologie : (i) introduire une hiérarchie dans les défis et l'espace documentaire, (ii) étudier le concept d'échéance (delay/deadline) d'un défi qui peut être interprété différemment selon les domaines et/ou professionnels de santé, (iii) retravailler la modélisation des conditions et (iv) conceptualiser la notion d'espace pour améliorer l'organisation de l'ontologie. Nous discutons maintenant des moyens d'atteindre un plus grand niveau de déclarativité en proposant des solutions aux problèmes évoqués en section 5.
Le problème du besoin de réification pourrait être résolu en utilisant la sémantique basée sur RDF de OWL2 qui permet des cas de réification. Cette sémantique n'est cependant pas la même que celle utilisée par les règles SWRL ou par les raisonneurs HermiT et Pellet inclus dans Owlready2 (qui est la sémantique directe d'OWL2 basée sur la théorie des modèles). Utiliser la sémantique basée sur RDF apparaît donc très compliqué car cela implique de changer une bonne partie du code de l'application et de gérer la cohabitation de plusieurs sémantiques différentes. Ainsi, soit nous changeons, dans la mesure du possible, la modélisation de l'ontologie pour éviter les cas de réification, soit nous gardons le code Python permettant ce genre de traitement.
La question de l'ajout de la négation dans les règles SWRL est plus ouverte. La première solution serait d'utiliser dans les règles des noms de prédicats définis dans la partie OWL2 de l'ontologie par des descriptions de classes utilisant la négation (c'est possible avec OWL2). De fait, nous augmentons alors la complexité de raisonnement relative à la partie OWL2 (en s'éloignant un peu plus de la traitabilité du profil EL). De plus, les raisonneurs HermiT et Pellet ne peuvent pas raisonner avec des négations dans des descriptions de propriétés. Ainsi cette solution ne couvrirait pas les cas de négation de prédicats binaires dans les règles.
La deuxième solution pour ajouter la négation dans les règles est d'adopter une stratégie de raisonnement différente de celle des raisonneurs HermiT et Pellet. En effet, il est possible de traduire les connaissances d'une ontologie OWL2 en profil EL (sans les extensions évoquées en section 2). en règles existentielles (ou datalog$^{\pm}$), qui sont des règles SWRL auxquelles nous ajoutons des variables existentielles en tête [13]. Il existe depuis quelques années des travaux permettant d'étendre à la négation les algorithmes des deux grandes familles permettant de raisonner avec ces règles existentielles (les algorithmes de saturation et les algorithmes de réécriture de requêtes) [1]. Cependant, ces travaux restent pour le moment essentiellement théoriques. En dehors de ces algorithmes, une autre possibilité est de skolémiser les variables existentielles des règles, c'est-à-dire de les remplacer par des termes fonctionnels uniques pour chaque variable. Nous obtenons alors des programmes datalog avec des fonctions, passant ainsi dans le monde de la programmation logique où de nombreux travaux décrivent l'ajout de la négation aux règles. Citons par exemple : (i) la SLDNF-resolution avec stratification et complétion du programme [16], (ii) la sémantique bien fondée [16], et même l'answer set programming (ASP) avec la sémantique des modèles stables [3]. Le choix de l'approche dépend alors de la sémantique de la négation souhaitée. Globalement cette solution impose donc de changer de raisonneur (et donc sans doute de framework et de langage de programmation) et de corriger la partie OWL2 de l'ontologie pour rester dans le profil EL strict.
Le dernier problème évoqué en section 5 est celui de la perte de séparation nette entre la modélisation statique en OWL2 et la modélisation dynamique en SWRL, dans le cas où des connaissances statiques ne peuvent être exprimées que par des règles. Une solution peut être d'abandon-

©AfIA 2020

ner cette distinction pour s'orienter vers une modélisation initiale de toute la connaissance sous forme de règles existentielles. Mais alors en plus de perdre le principe de séparation statique-dynamique permettant une modélisation claire de la connaissance, nous abandonnons aussi tous les standards et outils du web sémantiques dont la diffusion est de plus en plus large, notamment en lien avec les bases de données de graphes et plus généralement avec le domaine des linked data.

7 Conclusion

Nous montrons comment créer une application d'ETP basée sur une ontologie avec recommandation automatique et adaptative de défis. Les temps d'exécution sont encourageants et permettent une mise en production de l'application à court terme. D'un point de vue génie logiciel, la présence d'une ontologie et d'un raisonneur amènent une dimension déclarative au développement, se traduisant par un code impératif plus petit, des besoins en développeurs moins grands et des temps de développement plus courts. Aller vers une plus grande déclarativité imposerait d'étendre l'expressivité des langages OWL2 et SWRL (en ajoutant par exemple la négation aux règles). Cela pourrait avoir comme conséquence une remise en question de l'application en profondeur (avec un changement possible de langage de programmation). De même, une mise à jour de l'ontologie vers le profil EL sans extension pourrait être nécessaire, ce qui, paradoxalement, constitue une réduction de l'expressivité. Ainsi la question importante devient-elle celle du meilleur compromis entre expressivité et déclarativité. Dans cette optique, le langage des règles existentielles est intéressant puisqu'il peut généraliser SWRL et le profil EL d'OWL2. Cependant l'ajout de la négation reste encore un problème ouvert et principalement théorique.

Références

[1] M. Alviano, M. Morak, and A. Pieris. Stable model semantics for tuple-generating dependencies revisited. In *36th ACM Symposium on Principles of Database Systems (PODS'17)*, page 377–388, 2017.

[2] S. Angeletou, M. Rigou, and S. Sirmakessis. A logic-based approach to learner assessment. In *the 1st Int. Conf. on Educational Technologies, Tenerife, Spain*, pages 200–205, December 2005.

[3] J.-F. Baget, L. Garcia, F. Garreau, C. Lefevre, S. Rocher, and I. Stéphan. Bringing existential variables in answer set programming and bringing non-monotony in existential rules : two sides of the same coin. *Annals of mathematics and artificial intelligence*, 82(1-3) :3–41, 2018.

[4] B. De Cat, B. Bogaerts, M. Bruynooghe, and M. Denecker. Predicate Logic as a Modelling Language : The IDP System. *CoRR*, 2014.

[5] A. Giordan. Education thérapeutique du patient : les grands modèles pédagogiques qui les sous-tendent. *Médecin des maladies métaboliques*, 4(3), 2010.

[6] S. Hamy-Shoshany. Freins et dynamiques à la mise en place de programmes d'éducation thérapeutique du patient en soins primaires. *Thèse de Docteur en Médecine, Université Claude Bernard - Lyon 1*, 2015.

[7] B. Hansel, P. Giral, L. Gambotti, A. Lafourcade, G. Peres, C. Filipecki, D. Kadouch, A. Hartemann, J.-M. Oppert, E. Bruckert, M. Marre, A. Bruneel, E. Duchene, and R. Roussel. A fully automated web-based program improves lifestyle habits and hba1c in patients with type 2 diabetes and abdominal obesity : Randomized trial of patient e-coaching nutritional support (the anode study). *J Med Internet Res*, 19(11), 2017.

[8] N. Henze and W. Nejdl. Logically characterizing adaptive educational hypermedia systems. In *In International Workshop on Adaptive Hypermedia and Adaptive Web-based Systems (AH 2003)*.

[9] P. Hitzler, M. Krötzsch, B. Parsia, P. Patel-Schneider, and S. Rudolph. Owl 2 web ontology language primer (second edition), 2012. https ://www.w3.org/TR/owl2-overview/.

[10] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider, H. Boley, S. Tabet, B. Grosofand, and M. Dean. SWRL : A semantic web rule language combining OWL and RuleML, 2004. http ://www.w3.org/Submission/SWRL/.

[11] J.-B. Lamy. Owlready : Ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high level constructs for biomedical ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*, 80 :11 – 28, July 2017.

[12] B. Motik, B. Cuenca Grau, I. Horrocks, Z. Wu, A. Fokoue, and C. Lutz. Owl 2 web ontology language : Profiles (second edition), 2012.

[13] M.-L. Mugnier and M. Thomazo. An introduction to ontology-based query answering with existential rules. In *Reasoning Web Summer School*, 2014.

[14] C. Mulwa, S. Lawless, M. Sharp, I. Arnedillo-Sanchez, and V. Wade. Adaptive educational hypermedia systems in technology enhanced learning : A literature review. SIGITE '10, page 73–84, 2010.

[15] M. A. Musen. The protégé project : A look back and a look forward. *AI Matters*, 1(4) :4–12, June 2015.

[16] U. Nilsson and J. Maluszynski. *Logic, programming and PROLOG (2ed)*. 2001.

[17] R. Rigondet, A. Rigal, C. Desblès, Q. Lesaichot, J. Masurier, C. Cardenoux, D. Thivel, B. Pereira, C. Lambert, Y. Boirie, and M. Miolanne. Accompagnement familial à domicile et de proximité de l'obésité infanto-juvénile proxob : étude pilote de faisabilité en recherche interventionnelle en santé. *Nutrition Clinique et Métabolisme*, 33(1) :83 – 84, 2019.

[18] K. Sandid. Usage des nouvelles technologies en éducation thérapeutique du patient., 2019. https ://www.slideshare.net/KarimSandid/.

Inférence Grammaticale pour la Prévision de la Consommation Énergétique

G. Guerard[1], H. Pousseur[2], M. Rivoire[2]

[1] Pole Universitaire Léonard de Vinci, Research Center, DVRC
[2] Research Student, DVRC
92 916, Paris La Défense, France

prenom.nom@devinci.fr

Résumé

La domotique est programmable, contrôlable, et la plupart du temps a une consommation connue. Néanmoins, la prévision d'une consommation des ménages représente un problème difficile généralement résolu à l'aide de l'apprentissage en profondeur ou de modèles mathématiques coûteux en temps et en mémoire. L'approche proposée est basée sur l'inférence grammaticale pour prédire la consommation d'un appareil à partir du passé. L'automate de prédiction consomme peu de ressources et peut être facilement intégré dans des appareils intelligents, des compteurs intelligents ou des maisons intelligentes.

Mots-clés

Prédiction, Inférence grammaticale, ALERGIA

Abstract

Home automation is programmable, schedulable, and most of the time has a known consumption. Nevertheless, forecasting a household consumption represents a challenging problem typically resolved using deep learning or huge mathematical models. The proposed approach is based on grammatical inference to predict a device's consumption from the past. The prediction machine consumes little resources and can be easily embedded into smart devices, smart meters or smart houses.

Keywords

Forecast, Grammar Induction, ALERGIA

1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, les applications de prévision énergétique ont été développées non seulement du côté réseau des réseaux électriques, mais aussi du côté client afin d'équilibrer la charge et de la demande. Dans ce contexte, la prévision à court terme de la consommation d'énergie électrique est une condition nécessaire à la gestion de l'énergie et à la planification de tous les bâtiments, des ménages et des résidences à petite échelle aux énormes complexes immobiliers à grande échelle. Elle permet de surveiller la consommation d'énergie et de trouver les creux et les pics de demande, de réduire les pertes, de minimiser les risques, de garantir la fiabilité pour un fonctionnement ininterrompu. La prévision des charges joue un rôle actif dans la prise de décisions viables en ce qui concerne la planification de la maintenance et les investissements futurs, y compris les technologies énergétiques renouvelables et non renouvelables.

Plus récemment, l'omniprésence de l'Internet des objets rend les systèmes énergétiques distribués plus intelligents en optimisant l'efficacité énergétique pour réduire les pertes et crée une nouvelle aire appelée Internet de l'énergie (IoE) qui est équipée de systèmes de prévision intelligents. Ces derniers utilisent des prévisions météorologiques et d'autres explications pour prévoir la consommation d'énergie future. Selon l'un des derniers rapports de l'Agence internationale de l'énergie [1], les bâtiments représentent la plus grande partie de la consommation finale d'énergie avec une part de 36% du marché mondial, ce qui augmente l'importance des prévisions énergétiques des bâtiments afin de rétablir l'équilibre entre l'offre et la demande pour un avenir plus économe en énergie.

Il n'existe actuellement pas de norme définissant les types de prévisions. Hong et Fan ont regroupé les catégories de prévisions en très court terme, court terme, moyen terme et long terme avec des horizons de coupure de 1 jour, 2 semaines et 3 ans [9]. Principalement, les prévisions à court terme se réfèrent à des prévisions à l'heure, à la journée ou à la semaine à venir et il est considéré que ce concept peut également être appliqué à la prévision de la consommation d'énergie électrique des bâtiments [23].

Les algorithmes d'apprentissage automatique de la littérature sont couramment utilisés pour prévoir la consommation d'énergie électrique des bâtiments à court terme. La littérature contient une variété d'étude résumant les méthodologies de prévision de la consommation d'énergie des bâtiments sous différents angles.

Zhao et Magoules ont examiné les prévisions de consommation d'énergie des bâtiments en classant les méthodologies telles que les méthodes d'ingénierie, les méthodes statistiques et les méthodes d'IA [22]. Ahmad et al. ont ré-

1. 2019 Global Status Report for Buildings and Construction : Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.

©AfIA 2020

sumé les applications des réseaux de neurones artificiels (ANN) et des machines à vecteurs de support (SVM) [1]. Raza et Khosravi ont mené une étude sur les techniques de prévision de la demande de charge basées sur l'IA, non seulement pour les bâtiments, mais aussi pour les réseaux intelligents, en expliquant toutes les phases de la prévision de charge à court terme [16]. Daut et al. ont examiné la prédiction de la consommation d'énergie électrique des bâtiments en divisant les méthodologies en méthodes conventionnelles, IA et hybrides [5]. Wang et Srinivasan ont comparé des modèles simples et d'ensemble pour la prévision de la consommation d'énergie des bâtiments basée sur l'IA [20].
Wei et al. ont présenté des approches d'apprentissage machine basées sur l'étude des données pour la prévision et la classification de la consommation d'énergie des bâtiments [21]. De la même manière, Amasyali et El-Gohary ont examiné les études de prévision de la consommation d'énergie des bâtiments basées sur les données en se concentrant particulièrement sur les domaines de prédiction, les propriétés des données et les méthodes de prétraitement, les algorithmes d'apprentissage automatique et les mesures de performance [2]. Enfin, Runge et Zmeureanu ont présenté une étude de la prévision de la consommation d'énergie dans les bâtiments utilisant des ANN en mettant en évidence les applications, les données, les modèles de prévision et les mesures de performances [17].
L'apprentissage machine et l'apprentissage profond sont efficaces et proposent des modèles avec des dizaines de colonnes en entrée (en fonction des capteurs / données externes et internes aux bâtiments) pour prédire la consommation énergétique. Cependant, un détail n'est jamais abordé dans ces études : la consommation énergétique d'un tel dispositif par rapport aux gains potentiels.
Notre étude propose une méthode de prédiction peu consommatrice en temps et en mémoire, donc énergétiquement sobre. La méthode se base sur l'inférence grammaticale, c'est-à-dire un apprentissage par construction d'un automate stochastique à partir d'une série temporelle représentant la consommation énergétique d'un appareil.
Le papier est construit comme suit : la deuxième section présente la méthodologie ; cette dernière est décomposée dans les sections 3, 4 et 5 par les traitements sur le jeu de données, les opérations sur ces dernières et la méthode d'inférence grammaticale. La section 6 présente les résultats et le papier se conclut par la section 7.

2 Méthodologie

2.1 Jeu de données

Chaque appareil produit une courbe de consommation. Celui-ci est enregistré par un compteur intelligent sous la forme d'une série temporelle où chaque tuple fournit les informations suivantes : ID_périphérique, consommation (en Wh), date. La courbe de consommation est considérée sans erreur car le compteur intelligent transmet une valeur consolidée. Le système d'éclairage, l'ordinateur et les petits appareils électroménagers ne sont pas pris en compte.

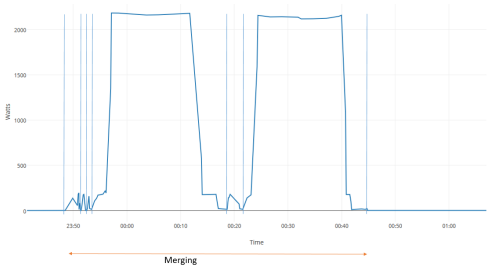


FIGURE 1 – Cycle de consommation d'une machine à laver.

Afin d'apprendre de la consommation d'un appareil, nous devons définir des séquences de consommation. Cette dernière commence lors du passage d'une valeur de consommation nulle à une valeur de consommation non nulle sur deux étapes consécutives de la série temporelle. Dès qu'il y a une valeur nulle de consommation à l'étape suivante, la séquence s'arrête.
Certains appareils peuvent avoir des cycles de consommation programmés avec de courtes périodes à consommation nulle. La méthode suivante fusionne deux séquences de consommation si elle est considérée sur un même cycle de consommation :

$$\Delta B \leqslant \Delta T_i \text{ and } \Delta B \leqslant \Delta T_j$$

avec les variables suivantes : ΔB le temps de césure ; ΔT_i le temps de consommation de la séquence i ; ΔT_j pour la séquence j.
La figure 1 présente un exemple de fusion de plusieurs séquences (séparées par des lignes verticales) pour constituer un cycle de consommation unique.

2.2 Méthodes

L'approche proposée dans ce papier est composée de trois étapes distinctes :

- TRAITEMENT DES DONNÉES : tout d'abord, les séquences sont définies comme présentées précédemment. Le bruit est éliminé par une méthode de regroupement.
- PRÉRÉGLER LES DONNÉES : ensuite, les séquences sont analysées en motifs récurrents.
- INFÉRENCE GRAMMATICALE : un automate stochastique est construit par inférence grammaticale des séquences
- PRÉDICTION ET SIMULATION : à partir d'un début de séquence, il est possible de prédire les possibilités futures, mais aussi d'obliger l'automate stochastique à adopter un comportement donné.

3 Traitements des données

La consommation des appareils est considérée en Wh. Étant donné le très grand nombre de symboles que cela produit, il est pertinent de nettoyer les données : un premier algorithme pour discrétiser les données, nommé *Discr. Algo.* ; un deuxième algorithme partitionne l'alphabet, nommé *Clust. Algo.*

3.1 Réduction des données

Discr. Algo. a pour objectif, à partir d'un échantillon de toutes les données de consommation appelé *data*, à fournir un ensemble de données discrétisé à un timer constant qui commence à la valeur de 5 minutes. *Discr. Algo.* calcule entre chaque valeur la pente. En effet, les appareils peuvent avoir des cycles de consommation similaires, mais avec des variations de la puissance requise (par exemple les types distinctifs de cycle de lavage d'une machine à laver).
Une fois que toutes les pentes sont calculées dans l'ensemble de données suivant *données discrétisées*, l'intégrale de la courbe *données* est comparée à l'intégrale de la courbe *données discrétisées*. Le rapport entre ces deux courbes fournit une estimation de la perte d'informations. Ce ratio ne doit pas dépasser une valeur α.
Tant que ce rapport est strictement inférieur à α, il est possible de considérer les données avec un timer plus grand. Au contraire, si le rapport est supérieur à α, il faut raccourcir le timer. L'algorithme s'arrête lorsque le rapport est proche de α.

3.2 Partitionnement des données

Discr. Algo. génère un grand alphabet alors que certaines valeurs de pente sont proches. Pour réduire la taille de l'alphabet et surtout pour réduire le bruit entre les valeurs, des valeurs similaires sont assimilées à une unique. Ce processus est appelé partitionnement.
Le partitionnement représente le processus de détermination de groupes typiques, appelés partitions, dans un ensemble de données. L'objectif est de trouver les partitions les plus homogènes et les plus distincts possible des autres partitions. Plus formellement, le regroupement devrait maximiser la variance inter-partition tout en minimisant la variance intra-partition.
Une classification des méthodes de partitionnement pour diverses données statiques est proposée dans [10]. Dans le contexte de notre ensemble de données, le partitionnement basé sur les centroïdes convient.
Le problème contient une dimension (les valeurs de consommation), donc le centre de la partition est une moyenne arithmétique des valeurs. L'algorithme k-moyennes convient exactement à l'ensemble de données et a une petite complexité de temps et de mémoire. Cet algorithme est linéaire en fonction du k, du nombre de points et du nombre d'itérations.
Comme dans l'algorithme précédent, il ne doit pas perdre trop d'informations. Le rapport entre la différence des courbes intégrales *data clustered* et *data* ne doit pas dépasser une valeur α'.
Tant que ce ratio est strictement inférieur à α', il est possible de diminuer la valeur k des k-moyennes. Au contraire, si le rapport est supérieur à α', on augmente la valeur de k. Notez que la k-moyenne peut générer des résultats divers pour la même valeur de k.

3.3 Extraction des données isolées

Une fois que les k-moyennes atteignent un partitionnement approprié, une mesure spécifique est calculée : la silhouette. Elle fait référence à une méthode d'interprétation et de validation de la cohérence dans le regroupement des données et fournit une représentation graphique de la façon dont chaque point a été classé.
Soit $a(i)$ la distance moyenne entre un point i et tous les autres points de données de la même partition ; soit $b(i)$ la plus petite distance moyenne du point i à tout autre groupe dont i ne fait pas partie de l'ensemble. La silhouette du point i est définie comme suit :

$$s(i) = \begin{cases} 1 - a(i)/b(i), \text{if } a(i) < b(i) \\ 0, \text{if } a(i) = b(i) \\ b(i)/a(i) - 1, \text{if } a(i) > b(i) \end{cases}$$

la silhouette donne un résultat compris entre -1 et 1. Un $s(i)$ proche de 1 signifie que les données sont correctement regroupées.
Pour chaque partition, la silhouette est calculée pour chaque point. Si la silhouette de certains points est inférieure à un seuil $0 < silh < 1$, alors ces points sont considérés comme $noise$. Si la silhouette de certains points est supérieure au seuil $silh$, alors ces points sont considérés comme $accessibles$. Si la silhouette fournit une valeur négative, le point est concédé à la partition correspondante. Une nouvelle partition est construite pour chaque point $noise$.
La méthode proposée n'est pas optimale mais linéaire sur le nombre de clusters et le nombre d'itérations, et log-linéaire sur le nombre de points.

4 Opérations sur le jeu de données

Un appareil peut avoir des motifs de consommation qui se produisent dans plusieurs ou une même séquence. Pour limiter la longueur des séquences et améliorer l'efficacité de la prédiction, ces motifs sont regroupés comme un unique symbole, c'est-à-dire qu'une fois le motif détecté ou suggéré, la prédiction le produira dans son entièreté.
Cette section est composée de deux algorithmes : *Disco. Motif. Algo.* est conçu pour découvrir un motif fréquent à l'intérieur de l'ensemble des séquences ; *Ext. Motif. Algo* étend un motif à l'intérieur des séquences.

4.1 Découverte des motifs

L'exploration de modèle séquentiel est une méthode d'exploration de données importantes qui peut extraire des séquences similaires tout en conservant leur ordre. Cependant, il est essentiel d'identifier les intervalles des éléments des modèles séquentiels extraits par exploration de modèles séquentiels. *Disco. Motif. Algo.* est basé sur l'algorithme de Hirate et Yamana [8].
Ces intervalles peuvent être un intervalle entre deux symboles ou un intervalle de temps. Dans notre jeu de données, les deux approches sont identiques. De plus, le motif doit être continu et contigu. L'exploration de modèle séquentiel est donc définie sur des données contiguës sans intervalle de temps.
En plus du motif, l'algorithme Hirate et Yamara fournit aussi son support. Le support fournit la fréquence de cette

©AfIA 2020

TABLE 1 – Jeu de données après *Clust. Algo.*

ID	Séquence
1	aaabacc
2	bacaaa
3	ccbacaaa

TABLE 2 – Algorithme de Hirate and Yamana.

Motif	Support (>50%)
bac	100%
aaa	100%
ba	100%
...	...
cc	66%
ca	66%

sous-séquence parmi l'ensemble de données mais ne donne pas si le motif est récurrent dans la même séquence. Ce processus est illustré dans les tableaux 1 et 2.

Après avoir trouvé les motifs, seuls ceux dont la longueur et le support sont les plus importants sont pris en compte sans aucun conflit entre eux. Le tableau 3 montre les séquences de l'exemple avant et après traitement. Les motifs sont entre parenthèses.

4.2 Extension des motifs

L'objectif de *Ext. Motif. Algo.* est de découvrir des versions étendues des motifs dans les séquences. Par exemple, les séquences $aaaeaaa$ et $aaafaaa$ ne diffèrent que par un seul symbole. Si les symboles e et f ont des valeurs proches, les deux séquences sont considérées comme égales avec un nouveau symbole $g = \frac{e+f}{2}$.

Á partir de deux mêmes motifs, l'extension se réalise sur le suffixe et / ou le préfixe. Si la pente du motif généré diffère de α'' pour cent de celui d'origine, alors le processus d'agglomération s'arrête pour le côté concerné.

5 Inférence grammaticale et prédiction

Suivant les étapes précédentes, les cycles de consommation sont désormais composés de symboles et de motifs. L'objectif de cette section est de construire un automate de prédiction à partir de ces séquences. À partir d'un arbre de préfixe de fréquence, une inférence grammaticale construit l'automate stochastique. À ce stade, une marche aléatoire

TABLE 3 – Jeu de données après *Disco. Motif. Algo.*

ID	Séquence
1	(aaa)(bac)c
2	(bac)(aaa)
3	cc(bac)(aaa)

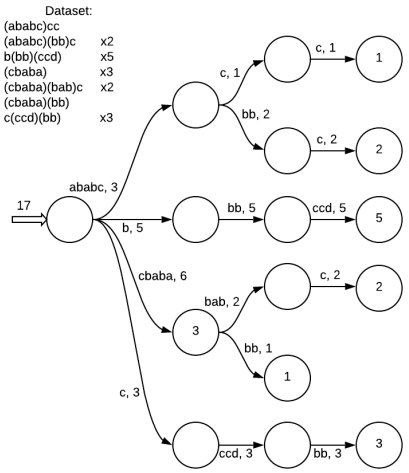


FIGURE 2 – Exemple d'arbre de préfixe.

détermine les schémas de consommation future de l'appareil concerné.

5.1 Arbre de préfixe

Un arbre de préfixe est un arbre dont les transitions représentent les symboles d'une séquence et qui possède les deux propriétés suivantes : pour chaque état, la somme des fréquences (des symboles) entrantes est égale à la somme des fréquences sortantes ; le nombre de séquences démarrant à la racine est égal à la somme des arrêts sur les noeuds.

Pour chaque appareil, chaque séquence est entrée dans l'arbre de préfixe comme suit :

1. Pour commencer à analyser une séquence, on se positionne à la racine de l'arbre de préfixe et on incrémente la fréquence d'entrée de 1.
2. Pour chaque symbole d'un mot (ordre des préfixes).
   (a) Si un arc contenant ce symbole existe déjà, incrémentez sa valeur de fréquence de un et continuez d'interpréter le mot sur le nœud enfant correspondant.
   (b) Sinon, créez un nœud enfant correspondant au symbole avec un arc de valeur de fréquence 1.
   (c) S'il s'agit du symbole terminal du mot, alors le nœud enfant correspondant devient terminal avec une valeur de terminaison incrémentée de 1.
3. Renvoyer l'arborescence des préfixes de fréquences.

Un exemple est montré sur la figure 2 où chaque mot est suivi de sa fréquence. Les fréquences deviennent des fréquences relatives (probabilité) en divisant chaque fréquence sortante par la somme de toutes les fréquences sortantes.

5.2 Inférence grammaticale

Comme nous avons un arbre de préfixe probabiliste, il est possible de faire une inférence grammaticale sur celui-ci. L'inférence grammaticale a été développée de manière significative par Colin de la Higuera dont les travaux sont présentés dans ces livres [6, 7]. L'inférence grammaticale représente le processus d'apprentissage d'une grammaire formelle à partir d'un ensemble d'observations (dans notre cas, l'arbre de préfixe probabiliste).

Il existe de nombreuses méthodes d'inférence grammaticale, souvent en compétition dans le concours PAutomaC [19]. Parmi les algorithmes, ALERGIA est un algorithme non déterministe permettant la réduction d'un automate déterministe probabiliste par un calcul d'équivalence d'automate probabiliste [4, 18].

ALERGIA a été appliqué à l'extraction d'informations à partir de textes ou de documents structurés et à la modélisation du langage vocal. Lorsque la probabilité d'apparition d'une chaîne suit une distribution bien approximée, ALERGIA a la capacité de fusionner des noeuds lorsque les automates résultants sont compatibles avec la fréquence observée de chaînes.

Soit n_i le nombre de séquences arrivant au noeud i ; f représente la fréquence : $f_i(a)$ est le nombre de séquences arrivant au noeud i et ayant comme prochain symbole a ; $f_i(.)$ est le nombre de séquence se terminant en i. ALERGIA a besoin du calcul préliminaire suivant : $p_i(a) = \frac{f_i(a)}{n_i}$ pour chaque transition sortante.

Deux noeuds i et j sont dit compatibles si pour toutes les transitions (dont les terminaisons) sortantes et récursivement pour l'ensemble de leurs enfants :

$$|p_i(a) - p_j(a)| < \sqrt{0.5 \ln \frac{2}{\epsilon}} \left(\frac{1}{\sqrt{n_i}} + \frac{1}{\sqrt{n_j}} \right)$$

où ϵ est appelé plage d'acceptation.

L'algorithme ALERGIA vérifie toutes les paires de noeuds, si aucune paire n'est compatible, l'algorithme s'arrête. La fusion et la plage d'acceptation sont présentées dans les deux sous-sections suivantes.

5.3 Fusion

Si deux noeuds i et j sont compatibles, ALERGIA traite la fusion et le repli de ceux-ci et de leurs enfants. Ce processus est connu sous le nom d'algorithme RPNI [12].

La fusion de deux noeuds signifie les réduire à un unique, dont la position est la plus petite profondeur des deux fusionnés. Ce noeud est considéré comme terminal si le noeud fusionné était terminal.

Quant aux transitions sortantes, elles sont elles-mêmes fusionnées si elles sont étiquetées avec le même symbole, et dans un tel cas, les deux noeuds pointés sont fusionnés récursivement.

Étant donné que i et j sont fusionnés, dans un premier temps, la transition entre j et ses parents est rompus. Ces transitions se situent actuellement entre i et les parents de j (pour chaque transition).

Ensuite, l'algorithme RPNI absorbe récursivement les enfants de j comme suit :

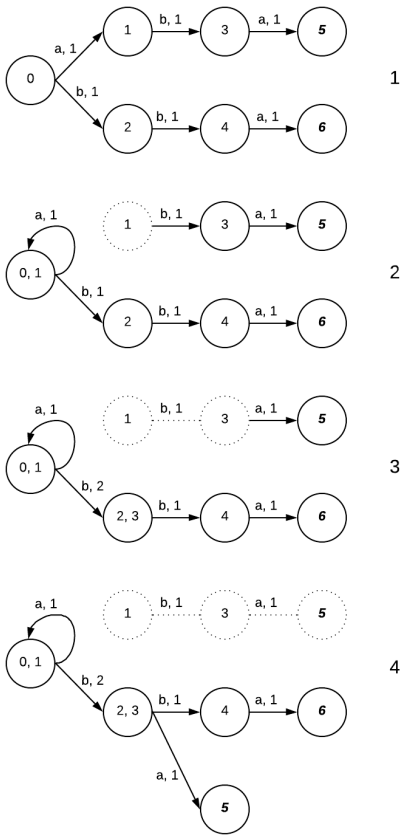


FIGURE 3 – Fusion entre les sommets 0 et 1.

1. Si la transition entre j et un successeur existe entre i et un successeur ; alors la fréquence de ce chemin est incrémentée. Si le successeur de j est un noeud terminal, alors l'état correspondant de i devient ou reste un noeud terminal.
2. Si la transition entre j et un successeur n'existe pas entre i et un successeur, et récursivement pour toutes les transitions entre j et le successeur choisi ; alors le chemin de j au successeur est attaché à i.

Dans la figure 3, nous fusionnons les noeuds 0 et 1. La transition montre le symbole et la fréquence, le noeud terminal est en italique et en gras. À la première étape, la transition entre 1 et ses parents est rompue puis ajoutée entre 0 et le parent de 1, dans ce cas entre 0 et 0. Cela crée une boucle étiquetée a sur le noeud 0 comme indiqué dans la deuxième image.

On considère maintenant le chemin entre 1 et 3, la transition b existe déjà après le noeud 0, mais pas le chemin ba. Ainsi, l'état 3 fusionne avec le noeud 2 (troisième image) mais le noeud 5 reste seul. Ce dernier se réfère à la deuxième règle, le noeud est apposé à l'état 2 comme le montre la quatrième image.

5.4 Influence de la plage d'acceptation

Les scientifiques spécialistes dans l'inférence grammaticale posent la plage d'acceptation à $\epsilon = \frac{1}{N^r}$ avec N le

©AfIA 2020

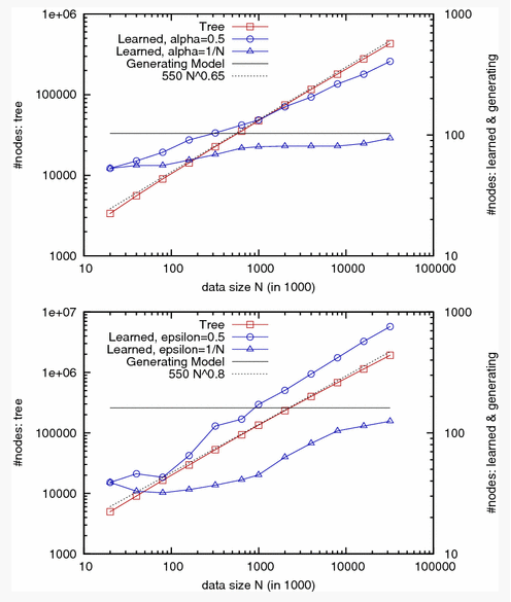


FIGURE 4 – Taille de l'automate finale (en haut $r = 3$, en bas $r = 5$) [14].

nombre de symboles différents dans l'ensemble des séquences, et le facteur de puissance à $r > 2$. Mao et al. [14] ont effectué de nombreuses expériences sur la valeur de r. La figure 4 provient de leur papier, les deux graphes présents indiquent le nombre de sommets de l'automate stochastique en fonction du nombre de sommets initiaux et de la valeur de r.
Afin de comprendre la similitude entre l'automate réduit et l'automate de départ, Mao et al. ont implanté la divergence de Kullback-Leiber [11]. La divergence diminue à r constant et en augmentant le nombre de sommets de départ ; la divergence augmente quand r augmente (donc si ϵ diminue).
L'automate généré par la présente méthode doit générer les mots de départ mais doit être suffisamment flexible afin de reconnaître des comportements non rencontrés lors de la phase d'apprentissage. Le compromis est trouvé avec $r = 3$.

5.5 Prédiction

Une fois l'automate réduit par l'algorithme ALERGIA, il est possible de l'exploiter pour fournir des prédictions sur la consommation future de l'appareil. Les prédictions sont obtenues en effectuant des marches aléatoires dans l'automate probabiliste sur un certain nombre w d'étapes. Cela est réalisé en considérant l'automate probabiliste comme une chaîne de Markov, le passage à travers un arc produira le symbole associé comme une prédiction. La prédiction est un suffixe de la consommation actuelle.
A noter que la prédiction par marche aléatoire peut se faire en générant des individus. L'autre possibilité, adapté à des chaînes de petite taille, consiste à multiplier le vecteur de population (donc le vecteur de distribution après lecture du préfixe) par la matrice représentant la chaîne de Markov

TABLE 4 – Prédiction des suffixes à partir du mot b.

Longueur	Suffixes et probabilités d'apparition
1	{b, 0.86} ; {ϵ, 0.14}
2	{ba, 0.11} ; {bb, 0.43} ; {bϵ, 0.32}, {ϵ, 0.14}
3	{bab, 0.07} ; {baa, 0.04} ; {bbϵ, 0.43} ; {bϵ, 0.32} ; {ϵ, 0.14}

associé à l'automate stochastique.
Étant donné que la fréquence d'un chemin avec des individus et la probabilité d'un suffixe convergent lorsque le nombre d'individus est vaste, ils sont un moyen plus pratique de générer des prévisions. En effet, un arbre de possibilités de longueur croissante utilise plus de mémoire que certaines marches aléatoires. Étant donné que la machine de prédiction peut être intégrée, les marches aléatoires sont préférées.
Expliquons le processus avec un exemple. La figure 5 présente à gauche la machine de prédiction avec les symboles et les fréquences ; et à droite la chaîne de Markov correspondante. Le tableau 4 montre une prédiction de l'augmentation de la longueur du mot b avec la probabilité correspondante du suffixe (où ϵ signifie la fin du mot).

6 Expériences

6.1 Résultats

Les tests ont été effectués avec un ensemble de données de plus de 700.000 lignes référençant la quantité de kW consommée avec un timer d'une seconde, soit plus d'une semaine de données. Le dispositif étudié est un réfrigérateur industriel fréquemment utilisé et pouvant contenir des produits différents d'une journée à l'autre. Sa consommation dépend des éléments à l'intérieur, de l'heure d'ouverture de la porte et de sa variable environnementale. La figure 6 présente un échantillon de l'ensemble de données.
La prédiction a été générée plusieurs fois et toujours après un départ de consommation de l'appareil. Toutes les prédictions fournissent une prévision précise. En prenant un intervalle de 95% des prédictions faites à partir d'un instant donné (nous écartons les prédictions trop éloignées de la masse), au moins 92% (97% en moyenne) de toutes les prévisions sont similaires à la consommation réelle avec un écart-type d'au plus 5% (3% en moyenne). Cet écart-type s'explique par les différentes approximations faites dans la méthode proposée ; l'écart type dépend de la valeur des seuils.

6.2 Discussions

La méthode présentée dans ce papier obtient de bons résultats sur des appareils ayant une latence dans sa consommation. C'est-à-dire que suite à un stimulus, la consommation de l'appareil est perturbé après et pendant un certain temps qui est bien plus grande que la durée du stimulus. En effet, l'automate de prédiction est une méthode assez simple

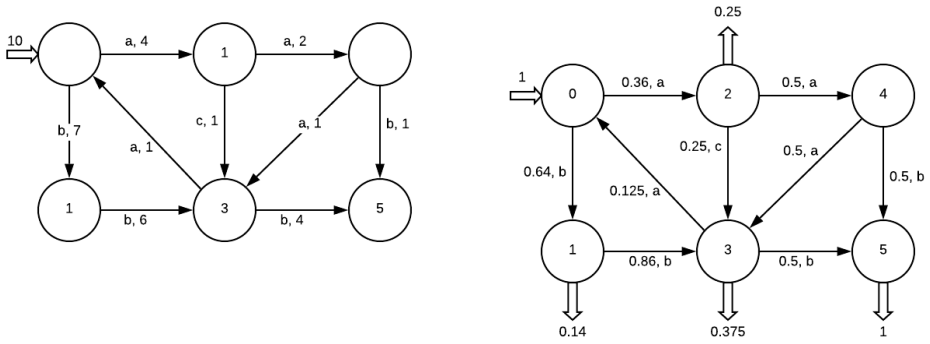


FIGURE 5 – De l'automate à fréquence à un automate stochastique.

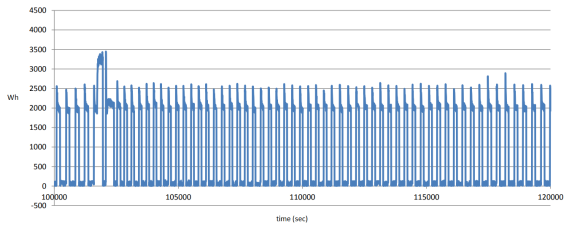


FIGURE 6 – Données utilisées.

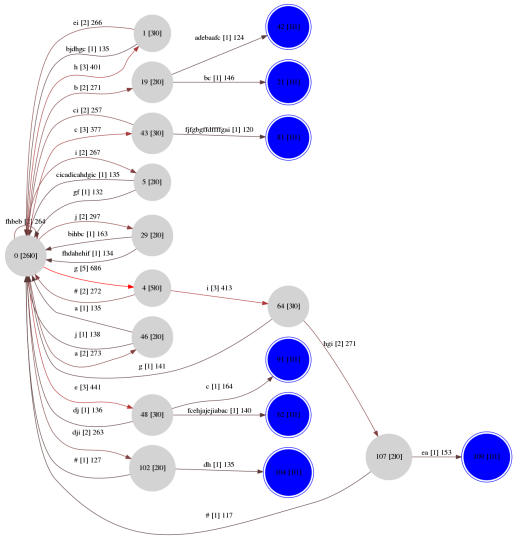


FIGURE 7 – Automate stochastique obtenu par la méthode présentée.

représentant des cycles de consommations. Nous avons vu précédemment que le processus de la méthode repère les schémas récurrents puis réduit l'automate par inférence. Il est donc logique que l'automate soit capable de reconnaître des schémas à des types de stimuli mais ait plus de difficulté à prédire la consommation d'un appareil plus erratique.
Si l'automate présente des résultats non satisfaisants, il est possible de créer un nouvel automate stochastique avec des nouvelles valeurs.

7 Conclusion

La prédiction de la consommation est un problème fondamental du réseau électrique intelligent. La plupart des méthodes de la littérature font appel à des méthodes coûteuses, consommatrices mais ayant des résultats similaires à la réalité. Cependant, notre approche soulève et répond à une problématique sous-jacente à la prédiction : peut-on prédire la consommation future avec peu de mémoire et une puissance de calcul minime ? si possible de manière embarquée dans l'appareil ou chez le consommateur.
La méthode proposée est adaptée à des appareils ayant des schémas distincts et répondant à des stimuli avec une grande amplitude dans le temps comparé à la durée du stimulus. Le principal défaut de la méthode est la mise à jour de son automate stochastique en repartant de zéro. Les travaux futurs ont pour objectif de changer l'automate stochastique en chaîne de Markov à état caché. En effet ces dernières sont capables d'apprendre les nouveaux cycles de consommation au fil de l'eau si la prédiction s'avère trop médiocre.
De plus, la première partie de l'algorithme sur la discrétisation des données doit être retravaillée et comparée à des méthodes comme [3], SAX [13] et Persist [15]

Références

[1] AS Ahmad, MY Hassan, MP Abdullah, HA Rahman, F Hussin, H Abdullah, and R Saidur. A review on applications of ann and svm for building electrical energy consumption forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33 :102–109, 2014.

[2] Kadir Amasyali and Nora M El-Gohary. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81 :1192–1205, 2018.

[3] Marc Boullé. Modl : A bayes optimal discretization method for continuous attributes. *Machine learning*, 65(1) :131–165, 2006.

[4] Rafael C Carrasco and José Oncina. Learning stochastic regular grammars by means of a state merging method. In *International Colloquium on Grammatical Inference*, pages 139–152. Springer, 1994.

©AfIA 2020

[5] Mohammad Azhar Mat Daut, Mohammad Yusri Hassan, Hayati Abdullah, Hasimah Abdul Rahman, Md Pauzi Abdullah, and Faridah Hussin. Building electrical energy consumption forecasting analysis using conventional and artificial intelligence methods : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 :1108–1118, 2017.

[6] Colin De la Higuera. *Grammatical inference : learning automata and grammars*. Cambridge University Press, 2010.

[7] Rémi Eyraud, Colin De La Higuera, Makoto Kanazawa, and Ryo Yoshinaka. Introduction to the grammatical inference special issue of fundamenta informaticae, 2016.

[8] Yu Hirate and Hayato Yamana. Generalized sequential pattern mining with item intervals. *JCP*, 1(3) :51–60, 2006.

[9] Tao Hong and Shu Fan. Probabilistic electric load forecasting : A tutorial review. *International Journal of Forecasting*, 32(3) :914–938, 2016.

[10] Han Jaiwei and Micheline Kamber. Data mining : concepts and techniques. *ed : Morgan Kaufmann San Francisco*, 2006.

[11] Solomon Kullback. *Information theory and statistics*. Courier Corporation, 1997.

[12] Kevin J Lang. Random dfa's can be approximately learned from sparse uniform examples. In *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, pages 45–52, 1992.

[13] Jessica Lin, Eamonn Keogh, Li Wei, and Stefano Lonardi. Experiencing sax : a novel symbolic representation of time series. *Data Mining and knowledge discovery*, 15(2) :107–144, 2007.

[14] Hua Mao, Yingke Chen, Manfred Jaeger, Thomas D Nielsen, Kim G Larsen, and Brian Nielsen. Learning deterministic probabilistic automata from a model checking perspective. *Machine Learning*, 105(2) :255–299, 2016.

[15] Fabian Mörchen and Alfred Ultsch. Finding persisting states for knowledge discovery in time series. In *From Data and Information Analysis to Knowledge Engineering*, pages 278–285. Springer, 2006.

[16] Muhammad Qamar Raza and Abbas Khosravi. A review on artificial intelligence based load demand forecasting techniques for smart grid and buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50 :1352–1372, 2015.

[17] Jason Runge and Radu Zmeureanu. Forecasting energy use in buildings using artificial neural networks : a review. *Energies*, 12(17) :3254, 2019.

[18] Franck Thollard, Pierre Dupont, Colin de la Higuera, et al. Probabilistic dfa inference using kullback-leibler divergence and minimality. In *ICML*, pages 975–982, 2000.

[19] Sicco Verwer, Rémi Eyraud, and Colin De La Higuera. Pautomac : a probabilistic automata and hidden markov models learning competition. *Machine learning*, 96(1-2) :129–154, 2014.

[20] Zeyu Wang and Ravi S Srinivasan. A review of artificial intelligence based building energy use prediction : Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75 :796–808, 2017.

[21] Yixuan Wei, Xingxing Zhang, Yong Shi, Liang Xia, Song Pan, Jinshun Wu, Mengjie Han, and Xiaoyun Zhao. A review of data-driven approaches for prediction and classification of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :1027–1047, 2018.

[22] Hai-xiang Zhao and Frédéric Magoulès. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6) :3586–3592, 2012.

[23] Kasım Zor, Oğuzhan Timur, and Ahmet Teke. A state-of-the-art review of artificial intelligence techniques for short-term electric load forecasting. In *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, pages 1–7. IEEE, 2017.

Événements abstraits et états d'affaires « occurrent-facteurs »

G. Kassel

Laboratoire MIS, Université de Picardie Jules Verne

33 rue Saint-Leu, 80039 Amiens Cedex 1

Gilles.kassel@u-picardie.fr

Résumé

*Dans cet article, nous défendons une conception abstraite, psychologique, de l'*événement. *Nous adoptons comme cadre formel d'ontologie un double réalisme ordinaire et conceptuel s'engageant vis-à-vis de l'existence de propriétés-relations et objets ordinaires, mais aussi conceptuels. Parmi les objets conceptuels, nous admettons notamment les* propositions *et les* événements *et identifions une classe de propositions assertant l'*occurrence *(ou réalisation) d'événements. Ceci nous conduit à nous interroger sur la nature des entités concrètes réalisant les événements, des* faits *que nous nommons « occurrent-facteurs », par analogie avec le terme « véri-facteur » (ce qui rend vrai une proposition). En considérant des* états *et des* changements *comme événements, nous montrons que les faits en question peuvent se limiter à des faits ayant pour seuls constituants des particuliers.*

Mots-clés

Ontologie formelle, événement, processus, réalisme ordinaire et conceptuel, état d'affaires, véri-facteur, occurrent-facteur.

Abstract

In this article, we defend an abstract psychological view of the event*. As a formal ontology framework, we adopt an ordinary and conceptual double realism which is committed to the existence of both ordinary and conceptual properties-relations and objects. Among the conceptual objects, we notably admit* propositions *and* events *and identify a class of propositions asserting the* occurrence *(or realization) of events. This leads us to question the nature of the concrete entities realizing the events, facts which we call "occurrent-makers", by analogy with the term "truth-maker" (which makes propositions true). By considering* states *and* changes *as events, we show that the facts in question can be limited to facts having only individuals as constituents.*

Keywords

Formal ontology, event, process, ordinary and conceptual realism, state of affairs, truth-maker, occurrent-maker.

1 Introduction

Récemment, pour rendre compte de la nature des entités communément qualifiées de « survenantes » (*processus*, *événements*, *états*, *changements d'état*), nous avons proposé un cadre ontologique dont les principes de structuration remettent en cause la distinction « continuant » vs « occurrent » sur laquelle se fondent, dans la communauté ontologie appliquée, la plupart des ontologies dites fondatrices (BFO, DOLCE, GFO). En bref, ce cadre repose sur 3 principes [22][23] :

- Le monde physique est peuplé de particuliers – *objets et processus* – qui, en endurant, assurent sa stabilité tout autant que sa dynamicité ;
- Ces particuliers ont une vie en portant des *propriétés* et en entretenant des *relations* temporairement avec d'autres particuliers, de tels liens constituant des *faits* ;
- Des sujets cognitifs, plongés dans le monde physique, se représentent au moyen notamment d'*événements* l'histoire passée, présente et future du monde pour interagir avec lui.

Jusqu'à présent, en guise de défense de ce cadre, nous avons pris soin de montrer une filiation de nos conceptions avec des théories existantes (en ontologie formelle) et une cohérence d'ensemble. Ainsi, pour notre primitive *processus physique*, nous avons adopté la conception de Cleland [8] du « processus causal de transformation de propriété », en phase avec les travaux de Stout [34][35] et de Galton [15][16]. Concernant la catégorie d'*événement*, nous nous sommes placés dans les traces de Chisholm [7] et de Wilson [37] en proposant une conception abstraite de l'événement. Enfin, côté *faits*, nous nous sommes principalement référé à la circonstance de Fine [13] et à l'état d'affaires d'Armstrong [1].

Dans cet article, nous visons plus particulièrement à défendre notre conception de l'événement *abstrait* en la positionnant vis-à-vis de théories contemporaines en philosophie du langage et de la logique. Cette philosophie reste traversée par une ligne de fracture, apparue au tournant du XX^{e} siècle, concernant la possibilité d'une sémantique cognitive. D'un côté, des philosophes comme Russell (1872-1970), Quine (1908-2000) et Davidson (1917-2003) ont affiché leur scepticisme (et c'est un euphémisme) vis-à-

©ARIA 2020

vis d'une quelconque ontologisation du *sens* (qu'elle soit psychologique ou idéale) jouant un rôle intermédiaire entre les phrases et leur référent[1]. D'un autre côté, se situant dans un courant de pensée prenant sa source avec le *complex significabile* stoïcien, des philosophes comme Bolzano (1781-1848), Brentano (1838-1917), Frege (1848-1925) et Meinong (1853-1920) ont au contraire donné du crédit à un « objectivisme » sémantique en reconnaissant au sens une certaine forme d'existence[2]. L'auteur se situe dans ce second courant, en positionnant l'événement du côté du sens.

Dans la suite de l'article, nous commençons par rappeler notre cadre ontologique de référence pour ce qui concerne le domaine des entités dites « survenantes », ce qui va nous conduire à identifier la figure de l'*événement abstrait* (Section 2). Nous nous dotons ensuite d'une théorie sémantique conférant à l'événement abstrait un rôle à la fois de constituant de sens et d'objet direct de référence (Section 3). Finalement, nous mettons à l'épreuve notre ontologie du monde et notre théorie sémantique en identifiant, pour différentes phrases assertant l'occurrence d'événements, les faits véri-facteurs (Section 4). .

2 Processus, faits et événements (en résumé)

Dans cette section, nous donnons une caractérisation succincte de nos primitives – *processus*, *faits* et *événements* – rendant compte du domaine des entités « survenantes », telles que définies dans [22][23]. Nous en profitons pour préciser quelques engagements ontologiques de base, notamment le fait d'adopter une théorie *présentiste* du temps.

Pour introduire ces primitives, nous revenons sur l'histoire récente des théories philosophiques du changement. En des termes actuels, le changement temporel se définit comme le fait qu'une substance[3] porte des propriétés contradictoires (*F* et *non F*) à des temps différents. Par exemple, un objet *O* est froid à un temps T_1 et chaud à un temps T_2. Au début du XX^{e} siècle, Bertrand Russell [31] propose la conception suivante du mouvement continu, en tant qu'un changement temporel de localisation spatiale : « Motion consists merely in the occupation of different places at different times ». Ainsi, un mouvement continu d'un objet *O* n'est *rien de plus* qu'une série de faits correspondant à l'occupation *Loc* par *O* de différentes positions Pos_i à des instants successifs I_j : <O, Loc, Pos_1, I_1>, <O, Loc, Pos_2, I_2>, *etc*[4]. Cette conception a été critiquée par de nombreux philosophes, au motif qu'elle ne rend pas compte du caractère dynamique du déplacement. Comme Henri Bergson [4] a pu notamment l'exprimer, le mouvement est traité « comme s'il était fait d'immobilités ».

Avant d'aller plus loin sur la dynamicité du mouvement, on peut noter que la métaphysique contemporaine donne crédit à l'existence de *Faits*, ceux-là mêmes auxquels il est fait référence dans les formulations de la théorie 'at-at'. La thèse de l'existence des *Faits* a été défendue notamment par Kit Fine [13] et David Armstrong [1]. Un *Fait* (ou « circonstance », selon la terminologie de Fine, ou encore « état d'affaires », pour reprendre le terme d'Armstrong), est une entité complexe constituée d'une substance (ex : 'Paul'), d'une propriété (ex : 'Être à côté de Marie') et d'un temps, l'instant 'I' : <Paul, Être à côté de Marie, I>)[5]. L'existence simultanée à un instant donné d'une substance et d'une propriété ne signifie pas pour autant que la substance exemplifie la propriété à cet instant. Le *Fait* correspond à un lien interne unissant, à un instant donné, substance et propriété/relation en une entité à part entière. L'argument principal de l'existence des Faits est qu'ils constituent un « véri-facteur », autrement dit ce qui rend vrai dans le monde des propositions comme 'Paul est à côté de Marie'. Les Faits auxquels il est fait référence dans la théorie 'at-at' du mouvement ont pour constituant une propriété de localisation spatiale d'une substance.

Revenons à la dynamique du mouvement. Il nous reste à expliquer comment il est possible à un objet d'entrer et de sortir d'une position plutôt que d'être statiquement dans une position. Pour ce faire, nous adoptons l'analyse de la philosophe Carol Cleland [8], faisant appel à la notion d'*effort*, au cœur de la physique newtonienne. Considérons l'expérience consistant à faire tourner autour de soi un globe (ou tout autre objet) maintenu par une ficelle. Selon Cleland, le fait que l'on puisse sentir la tension dans la ficelle, autrement dit le fait que la tendance de l'objet à être éjecté soit un observable mesurable, constitue un argument décisif pour son existence physique (*Ibid.*, 273) :

> Given their crucial role in physical explanation and theory, I propose that we admit operative tendencies to be elsewhere into our ontology as primitive properties of physical objects. We can think of them as physicists think of instantaneous vector quantities, viz., as uneliminable proclivities of varying degrees of strength.

Ainsi, pour rendre compte de la notion d'effort, Cleland pose l'existence d'une entité correspondant à un « état actif de mouvement », qu'elle nomme tour à tour « tendance opérante » ou « processus causal de transformation de propriété ». L'existence d'un tel processus est justement ce qui distingue le fait, pour un objet, de passer dynamiquement à travers des états plutôt que d'être

[1] Pour mémoire, dans son [11] *Truth and Meaning*, Davidson déclarait (p. 307) : « Paradoxically, the one thing meanings does not seem to do is oil the wheels of a theory of meaning – at least as long as we require of such a theory that it non-trivially gives the meaning of every sentence in the language. My objection to meanings in the theory of meaning is not that they are abstract or that their identity conditions are obscure, but that they have no demonstrated use ».

[2] L'ouvrage édité par Jocelyn Benoist [3] présente de façon historique et critique ce courant.

[3] Dans cet article, nous utilisons le terme « substance » au sens d'un « substrat », autrement dit d'une entité susceptible de porter des propriétés.

[4] Le terme « changement de Cambridge » a été proposé par Peter Geach [19, p. 13] pour dénoter cette conception du changement continu promue par des philosophes de Cambridge dont John McTaggart et Bertrand Russell. Cette conception porte également le nom de théorie « *at-at* ». Pour rendre compte du caractère continu du changement, la plupart des versions privilégient comme temps l'instant indivisible.

[5] Nous optons pour une théorie *présentiste* du temps stipulant que seul le présent existe. De ce fait, nous n'accordons d'existence physique qu'à des instants indivisibles, mais de durée non nulle [23].

statiquement dans des états différents.

Nous venons de caractériser le processus comme *capacité*/*disposition dynamique*, ou comme « moteur » d'un mouvement continu. Toujours suivant Cleland, nous généralisons la notion de processus comme moteur de *tout* type de changement continu, qu'il s'agisse d'un changement de température, de couleur, *etc*. Plus précisément, nous considérons que lors d'un changement continu, un même et unique processus est continuellement actif. Finalement, nous aboutissons à une conception du processus en tant qu'une entité endurante portant des propriétés et pouvant changer dans le temps (une marche peut s'accélérer, changer de direction)[6]. Une propriété importante que nous attribuons aux processus est d'être ancrés dans un objet : il s'agit du processus du mouvement d'*une balle*, du mûrissement d'*un fruit*, de la fonte d'*un glacier*, de l'oxydation d'*une pièce de métal*, *etc*. Pour rendre compte de ce lien fort entre objets et processus, nous reprenons à notre compte la relation d'*énaction* introduite par Galton et Mizoguchi [18] : un objet *énacte* contingentement un processus lorsqu'il est le siège du processus et que ce denier conduit, par son activité, à provoquer un changement réel de l'objet.

Pour définir maintenant nos *événements*, revenons sur l'analyse du changement et reprenons la caractérisation du mouvement continu. Prenons l'exemple d'une personne marchant. Comme nous venons de le définir, cette personne énacte un processus de marche – nommons le 'Marcher$_{Proc}$' – ce qui la conduit à se déplacer en occupant successivement des positions distinctes. Envisageons maintenant l'histoire de la vie de la personne, en lien avec son déplacement sur une certaine période de temps. Nous pouvons par exemple considérer 'la marche de Paul jusqu'à la gare ce matin'. La thèse que nous défendons est que, ce faisant, nous conférons une existence à une nouvelle entité – nommons la 'Marche$_{Evén}$'. Cette entité, par contre, ne peut être physique. Rappelons en effet que nous adoptons une théorie présentiste du temps, ce qui nous empêche d'admettre des entités physiques étendues dans le temps. Qui plus est, sur un plan strictement physique, on notera que 'Marche$_{Evén}$' a pu donner lieu à plusieurs processus comme 'Marcher$_{Proc}$', si Paul a flâné sur le trajet en s'interrompant et en reprenant sa marche. Nous posons donc que 'Marche$_{Evén}$' est un construit psychologique, un événement abstrait.

Dans [23], nous envisageons différentes catégories de chroniques du monde et donc de catégories d'événements. C'est ainsi qu'à côté des *changements*, nous considérons les *états* rendant compte de la stabilité du monde. Une propriété importante des événements en général est qu'ils sont susceptibles d'*occurrer*, ou d'être *réalisés*. Cette propriété est distincte de celle de l'*existence* : un événement comme 'Marche$_{Evén}$' existe en étant pensé par un sujet ; l'événement *occurre* lorsque des processus comme 'Marcher$_{Proc}$' sont actifs et que l'activité de ces processus fait que l'histoire du monde correspondant à 'Marche$_{Evén}$' est satisfaite.

En Section 4, nous identifions ces processus à des constituants de faits que nous qualifions d'« occurrent-facteurs », traduisant le fait que leur existence correspond à l'*occurrence* ou la réalisation d'événements. Avant cela, nous précisons la théorie sémantique que nous adoptons.

3 Fondements d'une théorie sémantique

L'enjeu de cette section est de se doter d'une théorie sémantique générale, qui accorde notamment une place à l'événement abstrait. Ceci va nous conduire à préciser nos engagements ontologiques vis-à-vis des entités abstraites et de leurs relations avec les entités concrètes. Nous adoptons tout d'abord un double réalisme ordinaire (pour le monde concret) et psychologique ou conceptuel (pour le monde abstrait) (§3.1). Notre réalisme conceptuel nous ouvre un espace pour accueillir le *sens* et, suivant une tradition contemporaine forte, nous faisons jouer à la *proposition*, que nous identifions à un contenu, le rôle de sens. Nous en profitons pour réhabiliter la notion d'*état d'affaires abstrait* et identifier nos événements à cette espèce d'entités (§3.2). Finalement, nous proposons, pour les faits concrets, de nous en tenir à la figure restreinte (par rapport à la proposition objective russellienne) de l'état d'affaires wittgensteinien [38] (§3.3).

3.1 Un double réalisme, ordinaire et psychologique

Précisons en premier lieu les fondements de l'ontologie formelle que nous adoptons. Cette ontologie emprunte à la *théorie de l'objet abstrait* d'Edward Zalta [39][7] et au *réalisme naturel et conceptuel* de Nino Cocchiarella [9][8]. Les fondements concernent tout à la fois la nature psychologique et la variété des entités abstraites considérées et leur articulation avec les entités concrètes. Le terme « emprunt » se justifie par le fait que nous commençons par adopter une caractérisation commune à ces deux auteurs concernant la distinction et la nature des entités concrètes et abstraites (les thèses (i) et (ii) ci-dessous). Toutefois, nous choisissons de mentaliser l'objet abstrait, contrairement à la conception de Zalta, en favorisant la théorie sémantique de Cocchiarella (thèse (iii)).

Commençons par la caractérisation commune :

(i) Le monde est peuplé d'entités *concrètes* et d'entités *abstraites* organisant une partition du monde ;

[6] Notre conception du processus est proche de celle promue par Rowland Stout [34][35] et Antony Galton [15][16] en rapprochant les processus physiques des objets dans leur façon d'endurer dans le temps.

[7] Il s'agit plus précisément de la *théorie typée des objets abstraits* que Zalta élabore dans les chapitres 5 et 6 de son [39] *Abstract Objects* et qui intègre des *propriétés* et *relations abstraites*. Sa *théorie de l'objet abstrait* (de base), définie dans les premiers chapitres, est une élaboration de théories proposées par différents néoMeinongiens, dont Ernst Mally, William Rapaport et Terence Parsons.

[8] Le terme « réalisme naturel » désigne un réalisme aristotélicien consistant à conférer une existence aux objets ordinaires nous entourant (tables, maisons, personnes), mais également aux objets de taille micro et macroscopique. L'inconvénient de ce terme, lorsqu'il est opposé aux termes « réalisme conceptuel » ou « réalisme psychologique », est qu'il semble exclure de la nature les entités psychologiques, cognitives. Pour éviter cela, nous lui préférons dans cet article le terme « réalisme ordinaire ».

(ii) Ces deux parties distinctes du monde sont peuplées d'entités simples *saturées* et *insaturées* se combinant en des *complexes*.

La thèse (i) de la partition du monde en entités concrètes et abstraites est un principe métaphysique bien établi, même si le positionnement de la frontière demeure toujours une question ouverte, en témoigne le statut d'entité abstraite que nous revendiquons pour les événements. La distinction correspond à des modes distincts d'*être* : les entités *concrètes* existent indépendamment d'être pensées, au contraire des entités *abstraites* qui sont des construits psychologiques et sociaux. A noter qu'en adoptant cette caractérisation des entités abstraites, nous les délogeons d'un royaume platonicien d'entités existant en dehors de l'espace et du temps[9]. Ainsi, qu'elles soient concrètes ou abstraites, nous considérons que toutes les entités sont *dans le temps* : elles peuvent être *actuelles*, *passées* ou *futures*.

La thèse (ii), fermement revendiquée par Zalta et Cocchiarella, consiste à positionner la *prédication* comme principe ontologique de base. La prédication s'explique par l'existence d'entités *saturées* – des objets *complets*, dans un sens analogue aux substances aristotéliciennes – et d'entités *insaturées* se combinant pour constituer des *complexes*. Du côté concret, comme du côté abstrait, on distingue ainsi des objets et des propriétés-relations qui, lorsqu'ils se combinent, donnent des « complexes-propositions ». Les principes de combinaison relèvent respectivement des lois physico-biologiques et des lois régissant nos pensées et actes de langage : un complexe-proposition concret consiste en un lien physico-biologique entre un objet concret et une propriété-relation concrète (l'objet est dit « exemplifier » la propriété-relation) ; un complexe-proposition abstrait correspond à une pensée (pouvant être extériorisée en un énoncé) combinant un objet abstrait et une propriété-relation abstraite (on dit de l'objet qu'il « encode » la propriété-relation).

Dans la suite de la section 3, nous précisons nos engagements vis-à-vis de ces complexes-propositions abstraits et concrets. Avant cela, nous précisons le lien existant entre entités abstraites et concrètes, en posant une troisième thèse :

(iii) Les propriétés-relations abstraites *représentent* des propriétés-relations concrètes, tandis que les objets abstraits *représentent* des objets concrets.

Le verbe « représenter » est à entendre dans un sens large de *comporter un contenu se référant à*. Chez Cocchiarella [9], cette thèse (iii) s'accompagne d'une théorie sémantique, que nous reprenons à notre compte. Nous la formulons en adoptant la terminologie de Cocchiarella : le terme « concept » est utilisé en lieu et place de « propriété-relation abstraite ».

Une assertion telle « Paul est prudent » ou « Paul est à côté de Marie » s'analyse sémantiquement à deux niveaux. La structure prédicative de ces jugements en est le point de départ. À un premier niveau, ces assertions s'analysent comme la combinaison d'un *concept-référentiel* exprimé par le sujet « Paul » et d'un *concept-prédicat* exprimé respectivement par le prédicat « est prudent » et « est à côté de Marie ». À un second niveau, de façon dérivative, ces concepts représentent des objets concrets et des propriétés-relations concrètes. Ainsi, le sujet « Paul » tient pour deux entités distinctes, à savoir un concept-référentiel et un objet ordinaire. De même, le prédicat « est prudent » tient pour deux entités distinctes, à savoir un concept-prédicat et une propriété ordinaire. De façon importante, la théorie sémantique de Cocchiarella n'exige pas que chaque concept abstrait représente une entité concrète. En Section 4, nous allons justement nous émanciper de cette contrainte pour proposer (notamment) que la relation de proximité spatiale, exprimée par « Être à côté de », soit uniquement conceptuelle.

Parmi les entités abstraites saturées figurent la *proposition*. Nous précisons maintenant nos engagements vis-à-vis de cette entité. A côté de la proposition, nous comptons réhabiliter une certaine conception de l'*état d'affaires abstrait* pour positionner nos événements.

3.2 La proposition et l'événement abstraits

Historiquement, la proposition abstraite puise ses racines au milieu du XIX^{e} siècle dans la 'proposition en soi' (*Satz an sich*) de Bernard Bolzano. Elle s'est ensuite forgée au tournant du XX^{e} siècle avec, d'un côté, la 'pensée' (*Gedanke*) de Gotlob Frege, et, de l'autre, les théories psychologiques des actes de pensée et de discours établies par Franz Brentano et ses élèves[10].

Ces théories ont en commun d'avoir mis en scène différentes entités : des actes « occurrents » et des entités « continuants » leur étant associées, à savoir des contenus, des états d'affaires, des objets de référence. L'existence et la nature de ces entités continuent aujourd'hui de faire débat. Notamment, côté sens, se pose la question de savoir si nous devons lui accorder un véritable statut ontologique et, le cas échéant, si sa nature est d'être un occurrent (un acte) ou un continuant (un contenu)[11]. Le lecteur aura compris qu'en ayant fait le choix d'une sémantique cognitive, nous avons de fait opté pour la reconnaissance d'un contenu-propositionnel jouant le rôle de sens pour des actes de

[9] On notera à ce propos que chez Zalta, l'individu abstrait – un concept d'un objet concret individuel – correspond à un « contenu cognitif » mais sans être pour autant une entité mentale, c'est-à-dire une entité présente dans la tête d'une personne. Cette position est liée à l'héritage du concept intensionnel Frégéen, clairement revendiqué par Zalta [40]. On peut mentionner également l'héritage Meinongien dont les objectifs-contenus de jugements (Objektive) ne sont ni physiques, ni mentaux. L'option que nous prenons, en adoptant la théorie psychologique des concepts de Cocchiarella, est de mentaliser nos entités abstraites.

[10] Pour une présentation historique et critique de cette période, nous renvoyons le lecteur à Smith [32], tout particulièrement au chapitre 6 (pp. 155-195) *Kasimir Twardowski: On Content and Object*, et à Benoist [3], tout particulièrement son chapitre introductif (pp. 13-49) *Variétés d'objectivisme sémantique*.

[11] L'ouvrage édité par Friedericke Moltmann et Mark Textor [26] se fait l'écho de ces débats contemporains entre des approches qualifiées respectivement de 'act first' et 'content first'. Parmi les partisans de l'approche 'act first' figurent de façon prééminente Scott Soames [33] et Peter Hanks [20]. Leur position est d'identifier les propositions à des actes (ou plutôt à des types d'actes) consistant à prédiquer des propriétés d'objets. Ce faisant, leur conception s'oppose à celle d'un contenu endurant, que nous promouvons au contraire. Dans cet article, nous ne souhaitons pas développer un argumentaire détaillé en faveur de telle ou telle conception. Nous comptons plutôt nous focaliser sur les questions suivantes : quels objets et quelles propriétés reconnaissons-nous ? En sachant que notre intention est d'ouvrir le domaine des objets communément considérés à des événements abstraits dont l'*occurrence* est prédiquée.

©AFIA 2020

pensée et de discours. Également, la question est de savoir si des états d'affaires abstraits jouant le rôle d'objets de référence existent et, le cas échéant, quelle est leur nature. À cette dernière question, nous allons répondre positivement en identifiant nos événements abstraits à de tels états d'affaires. Nous allons donc prendre quelques engagements ontologiques supplémentaires pour rendre compte de « ce que l'on pense ou dit » et « ce à quoi on se réfère en pensant ou disant ».

Un premier engagement que nous souhaitons prendre, pour rendre compte de « ce que l'on pense ou dit », est le suivant : il existe des propositions *mentales* ayant un caractère *social*. Bolzano, nous le savons, a conçu sa 'proposition en soi' comme idéale. Toutefois, contrairement à Frege (et à sa pensée), Bolzano n'a jamais dit que les propositions en soi étaient indépendantes du langage et de la pensée, seulement qu'elles étaient indépendantes du sujet qui les pense, les énonce ou les juge. Ceci explique que les élèves de Brentano, au corps défendant de leur maître, aient pu s'approprier la proposition en soi de Bolzano, selon un double geste : d'une part, en étoffant le domaine des propositions brentaniennes, jusque-là réduites à des propositions existentielles ; d'autre part en faisant en quelque sorte « gagner en immanence » les propositions bolzaniennes vis-à-vis de l'acte[12]. La théorie bolzanienne distingue déjà les propositions subjectives correspondant aux contenus d'actes datables de pensée et de discours et les propositions objectives, ou propositions en soi, dont la raison d'être est de porter une vérité objective. Le second geste que nous évoquons est parti du constat que ce que pensent et disent différents individus à différentes occasions (et indépendamment des langues utilisées) se ressemble, au point de paraître être la même chose. Sur la base de ce constat, Husserl a proposé que cette « même chose » relève d'un universel ou d'une espèce, dont les contenus datables soient les instances ou membres (de la même façon que l'universel de rougeur est présent dans les rougeurs contingentes d'objets matériels variés). La proposition en soi bolzanienne devient cet universel présent dans chaque proposition subjective (notre proposition mentale) en lui conférant un caractère social.

Intéressons-nous maintenant à « ce à quoi on se réfère en pensant ou disant ». Chez Bolzano, la proposition se réfère tout au plus à l'objet de sa représentation sujet (par exemple, à l'objet 'Paul' dans la proposition [Paul salue Marie]). L'objet peut être concret, comme dans le cas de la personne 'Paul', ou abstrait-idéal, comme dans le cas des entités mathématiques tel un nombre ou un triangle. Par ailleurs certaines représentations sont dites 'an-objectuelles' (*gegenstandlos*) lorsque l'objet est contradictoire, comme dans le cas du 'carré rond'. Brentano n'ira pas plus loin, tenté un temps d'élargir le domaine des objets visés à celui de 'choses' (*Dinge*) comme des collectifs, des parties d'objets matériels ou des êtres appartenant à un passé révolu, pour finalement y renoncer et restreindre aux entités du monde concret la possibilité d'être visées par des actes mentaux. Ce pas sera franchi par Twardowski et Meinong, s'assurant par là-même que chaque représentation ait à la foi un contenu et un objet (existant d'une certaine manière par le fait même d'être pensé et représenté). Pour notre propos dans cet article, notre intérêt concerne l'extension au jugement de cette doctrine d'une existence conjointe et distincte d'un contenu et d'un objet. Twardowski, très tôt, élabore une théorie du jugement en lui appliquant la distinction du contenu et de l'objet, ce dernier étant conçu comme un 'état d'affaires' (*Sachverhalt*). Le geste fondamental accompli par Twardowski est de considérer qu'une proposition telle [Paul salue Marie], qu'il identifie au contenu d'un jugement relationnel, se réfère ou donne accès à l'objet-état d'affaires 'Salutation de Paul à Marie'[13]. Nous sommes bien en présence de deux entités abstraites distinctes, la proposition et l'état d'affaires. Nous identifions ces états d'affaires abstraits à nos événements.

3.3 L'état d'affaires concret

Venons-en maintenant à élucider la nature du complexe concret auquel nous avons fait référence en §3.1 en le caractérisant comme une forme prédicative d'exemplification par un objet concret d'une propriété-relation également concrète.

À notre époque contemporaine, la figure de ce complexe concret est incarnée de façon prééminente par le « fait » armstrongien [1], lui-même héritier de la proposition objective russellienne. Nous y avons fait référence en Section 2, à l'occasion de l'analyse du mouvement continu, en évoquant des faits de localisation spatiale qui s'obtiennent successivement lorsqu'un objet se meut. Selon le cadre ontologique posé en Section 2, de tels faits participent de l'ameublement du monde physique à côté des objets et des processus. D'une façon générale, ils se définissent comme un complexe constitué d'un objet physique et, soit d'une propriété (comme dans : <Livre, Être rouge>, <Paul, Marcher>), soit d'une relation (comme dans : <Livre, A pour prix, 50€>, <Paul, Être à côté, Marie>, <Paul, Dresser des plans sur la comète avec, Marie>).

Avant de poursuivre, il est fondamental de noter que dans la présentation que nous venons d'effectuer des complexes concrets, sous couvert de « généralité », en réalité nous avons évoqué deux espèces différentes d'entités dont la nature métaphysique et la justification de l'existence diffèrent. D'une part, nous avons évoqué des faits de la théorie 'at-at' n'étant constitués que d'individus (nous justifierons dans un instant cette affirmation) et dont l'existence est justifiée sur un plan exclusivement ontologique. D'autre part, nous avons évoqué les faits armstrongiens constitués notamment de propriétés-relations universelles et dont la justification de l'existence est essentiellement sémantique. Rappelons que, selon Armstrong, l'existence de ces faits représente la meilleure explication à fournir en termes d'entités véri-factrices qui rendent vraies des propositions comme « Le livre est rouge », « Paul marche », *etc.* Cette différence d'espèces est d'autant plus importante à souligner que nous nous apprêtons à accorder une existence aux « faits at-at » et à dénier toute forme d'existence aux « faits armstrongiens ».

Le coup de grâce contre l'existence des faits armstrongiens nous paraît avoir été porté notamment par William F. Vallicella [36]. Vallicella considère qu'à partir du moment où un universel est considéré comme constituant d'un fait concret, à côté de particuliers, tout espoir est vain de concevoir une entité concrète liant les constituants en une

[12] Cette filiation et la contribution de Husserl évoquée juste après sont retracées avec soin par Wolfgang Künne [24].

[13] Nous nous fondons ici sur l'analyse de Arianna Betti [5].

©AFLA 2020

unité : le lien représenté par notre notation <„> – devient un constituant lui-même, mais alors on s'expose à une régression infinie de devoir supposer l'existence d'un nouveau lien liant le premier lien et ses constituants, et de même pour ce nouveau lien, etc.

Cette analyse nous paraît tout à fait pertinente et nous pousse, si nous voulons conserver un complexe concret dans notre ameublement du monde physique, à trouver une parade. A notre connaissance, on trouve une telle parade dans la littérature. Mulligan, Simons et Smith [27] ont en effet proposé de revenir à ce qu'ils estiment être l'esprit de l'état d'affaires du *Tractatus* de Wittgenstein [38]. Selon ces auteurs, l'état d'affaires tractarien repose uniquement sur des particuliers liés par des « relations de fondation mutuelle » :

> It is, we suggest, because analytic-philosophical interpreters of the Tractacus have standardly lacked a theory of lateral foundation relations, relations which may bind together individual objects, that they have been constrained to resort to views of the kind which see Sachverhalte as involving both individuals and universal properties. It is open to us here, however, to develop a view of Sachverhalte as involving individuals alone, linked together by relations of foundation. 'This speck is red' might be made true, on such a view, by a two-object Sachverhalt comprising the speck and an individual moment of redness linked by a relation of mutual foundation.

En se focalisant sur des entités appelées « moments » (et définies comme des entités existentiellement dépendantes d'autres entités, à l'instar des qualités de substances), Mulligan *et coll.* ont ouvert la voie à une approche cherchant à identifier les états d'affaires concrets à des complexes constitués de seuls particuliers. On évite ainsi le problème évoqué supra d'entités hybrides constituées de particuliers et d'un universel. Par la suite, nous choisissons de suivre leur proposition. Ce choix relève d'un projet et, en ce sens, nécessite d'être évalué, ce que nous nous proposons de faire en Section 4.

4 Événements et états d'affaires occurrent-facteurs

Dans cette section, nous mettons à l'épreuve les théories ontologique et sémantique que nous venons d'établir. Pour des phrases que nous interprétons comme des assertions d'occurrence d'événement, nous commençons par proposer une forme logique reconnaissant à l'événement le statut d'entité abstraite que nous lui avons octroyé (§4.1). Nous envisageons ensuite différents types d'événement et, pour chaque type, nous identifions les faits « occurrent-facteur » permettant de décider de la véracité de l'occurrence de l'événement. Nous montrons alors que, sous certaines conditions portant sur la nature en général des propriétés-relations, il nous semble possible de nous en tenir à des états d'affaires wittgensteiniens (§4.2).

4.1 L'événement abstrait logique

Historiquement, nous devons à deux philosophes – Hans Reichenbach, dans son [30] *Elements of Symbolic Logic*, et Donald Davidson, dans son [12] *The Logical Form of Action Sentences* – d'avoir proposé des formes logiques de phrases d'action, conférant à l'événement un statut ontologique. Les deux philosophes partagent la même doctrine sémantique de la référence directe : les phrases douées de vérité, qu'ils nomment « propositions », dénotent directement des entités, sans intermédiation d'un quelconque sens[14]. Leurs propositions sont réputées distinctes (Davidson a, du reste, fermement rejeté dans son [12] la forme logique proposée par Reichenbach). Nous les comparons sur l'exemple de la phrase ci-dessous :

(1) « Paul a déplacé la table »

La thèse défendue par Reichenbach est qu'une phrase comme (1) est équivalente sémantiquement à la phrase (2) « Un déplacement de la table par Paul a occurré », ces deux phrases donnant lieu à des structures logiques différentes, que nous notons respectivement (1-R) et (2-R) : selon (1-R), (1) prédique du sujet-objet « Paul » d'« avoir déplacé la table »[15] ; selon (2-R), (2) prédique du sujet-événement « Déplacement de la table par Paul » d'« avoir occurré ».

(1-R) DéplacerLaTable (Paul)
(2-R) Occurer (DéplacementDeLaTableParPaul)

Ces deux phrases dénotent, selon Reichenbach, une et une seule *situation* concrète (ce qui justifie qu'elles soient sémantiquement équivalentes), mais cette situation admet, comme décalque des formes logiques, deux décompositions distinctes : suivant (1-R), la situation a pour constituants l'objet physique 'Paul' et la propriété physique 'DéplacerLaTable'[16] ; suivant (2-R), la même situation a pour constituants l'événement physique 'DéplacementDeLaPorteParPaul' et la propriété physique 'Occurrer'. Comme on peut le constater, l'analyse de Reichenbach conduit à une promiscuité ontologique importante avec des *situations* côtoyant des *événements*, des *propriétés* et des *objets* physiques.

Envisageons, de façon complémentaire, la proposition de Davidson. La thèse défendue par Davidson est que tout verbe d'action, exprimant « ce que quelqu'un a fait », doit être construit comme comportant un argument implicite se référant, au moyen de variables ou de termes singuliers, à un événement. Davidson propose ainsi l'expression logique (1-D) quantifiée existentiellement, la variable 'e' prenant ses valeurs dans un domaine d'événements. Par la suite, la

[14] Nous avons rappelé en Introduction la position de Davidson. Reichenbach, pour sa part, expose sa position en introduction de [30]. Tout d'abord, selon Reichenbach, une phrase dans sa totalité dénote une *situation* concrète (*Ibid.*, pp. 14-15) : « Physical objects divide into *things*, such as individual human beings, tables, atoms, and *situations*, also called *states of affairs*, which constitute the denotata of sentences. Thus the sentence 'the battle-ship *Bismarck* was sunk' denotes a situation; the ship itself is a thing ». Par ailleurs, aucun intermédiaire n'existe entre la phrase et la situation (*Ibid.*, p. 15) : « When some logicians thought it necessary to distinguish between 'proposition' and 'sentence' they did so because they believed that there was a third thing between the sentence, *i.e.*, the linguistic expression, and the situation. Such a third thing is certainly unnecessary, and we shall therefore identify sentence and proposition ».

[15] Pour des raisons de simplification, nous omettons le temps dans la forme logique.

[16] La table étant un autre objet physique auquel fait référence la phrase (1), on peut préférer la forme logique (1-Rbis) Déplacer (Paul, Table), le prédicat « déplacer » se référant à une propriété binaire, ou relation.

©AFLA 2020

formulation (1-D) sera révisée en (1-DP) par Terence Parsons [28] pour éviter l'usage de prédicats à arité variable. En vue de comparer avec la proposition de Reichenbach, on notera que ce dernier, dans (2-R), a considéré un terme singulier 'le déplacement de la table par Paul' se référant à un événement singulier. Toutefois, comme la phrase (1) laisse ouverte la référence à plusieurs actions de Paul, ce qui est le parti pris de Davidson avec (1-D), nous considérons plutôt l'expression (2-Rbis) comportant le prédicat 'DéplacementDeLaTableParPaul' se référant à un type d'événements.

(1-D) (∃e) Déplacer (Paul, Table, e)

(1-DP) (∃e) (Déplacer (e) ∧ Agent (e, Paul) ∧ Objet (e, Table))

(2-Rbis) (∃e) (DéplacementDeLaTableParPaul (e) ∧ Occurrer (e))

Plutôt que de dégager les mérites de telle ou telle forme, nous nous apprêtons à pointer du doigt un problème d'ordre inférentiel qui, à notre sens, leur est commun. Davidson [12] attire justement notre attention sur ce point. Selon Davidson, en effet, à partir d'une phrase comme « Paul vole avec son vaisseau spatial vers l'Étoile du Soir », nous devrions en déduire que « Paul vole avec son vaisseau spatial vers l'Étoile du Matin », compte tenu de l'identité extensionnelle : Étoile du Soir = Étoile du Matin. Toujours selon Davidson, cette inférence est permise par une formule comme (1-DP), là où (2-Rbis) présenterait un comportement aberrant[17].

De fait, nous nous inscrivons en faux vis-à-vis de la validité de l'inférence et nous y voyons là un signe évident de l'inadéquation de l'approche extensionnelle proposée par les deux philosophes (en considérant des événements concrets). Nous considérons ainsi qu'à partir de phrases comme « Paul a déplacé la table » ou « Paul a déchiré le morceau de papier trainant sur la table » (pour garder les pieds sur terre…), il n'est pas possible d'inférer que « Paul a déplacé le seul objet dont Marie a hérité de ses parents » ou que « Paul a déchiré la dernière facture téléphonique ». Si ces phrases sont équivalentes du point de vue de la référence, elles ne sont – *a priori* – pas équivalentes sémantiquement. Les connaissances de sujets sont clairement en jeu : ainsi, Paul pousse ce qu'il considère être une table ; par contre, s'il ne dispose pas de la connaissance du fait que cette table est le seul objet dont Marie a hérité de ses parents, il ne peut penser qu'il pousse cet objet unique (le même raisonnement vaut pour la facture téléphonique). En privilégiant une interprétation *de dicto*, et non *de re*, pour le sens de ces phrases, nous tenons compte de la nature conceptuelle des événements et nous considérons - a priori – comme distincts des événements ayant des constituants conceptuels distincts, par exemple : 'Le déplacement par Paul de la table de salon' et 'Le déplacement par Paul de la table dont Marie a hérité'. La précaution que nous prenons, en disant « a priori », se justifie par le fait que nous nous situons dans un cadre général en considérant des concepts sociaux et non singuliers. S'il s'avère par contre que Paul dispose des deux concepts co-référentiels de la table *Être la table de salon* et *Être la table dont Marie a hérité*, nous pourrions convenir que les deux événements sont identiques pour Paul[18].

Pour rendre justice au caractère abstrait de l'événement, nous proposons d'adopter la théorie conceptualiste de la forme logique proposée par Cocchiarella [9][10]. Comme nous l'avons vu en §3.1, selon l'ontologie formelle de Cocchiarella, une phrase prédicative comme « S est P » s'analyse comme la combinaison d'un concept-référentiel (exprimé par « S ») et d'un concept-prédicable (exprimé par « est P »). Par exemple, une affirmation comme « tous les corbeaux sont noirs » s'analyse comme la combinaison du concept-référentiel exprimé par « tous les corbeaux » et du concept-prédicable exprimé par « sont noirs ». En symbolisant le concept-référentiel par '(∀xCorbeau)' et le concept-prédicable par 'Noir(x)', nous obtenons la forme complète : '(∀xCorbeau)Noir(x)'. De même, nous représenterions la phrase « des cygnes sont noirs » par l'expression : '(∃xCygne)Noir(x)'. Rappelons que, selon le réalisme conceptuel naturel de Cocchiarella, un même prédicat linguistique tient pour (ou signifie) en premier lieu un concept et, de façon dérivative, une propriété ou relation concrète. Il en est de même pour ces expressions avec les prédicats logiques.

Cette théorie est a priori compatible avec l'analyse de Reichenbach, en considérant qu'une phrase comme « E Occurre » exprime la combinaison d'un concept-référentiel-événement '(∃xE)' et du concept-prédicable 'Occurrer(x)'. En guise d'analyse de la phrase (1), nous obtenons :

(1-R&C) (∃xDéplacement/Agent(x,Paul)/Objet(x,Table)) Occurrer(x)

Littéralement, (1-R&C) exprime qu'un événement de type 'Déplacement' – ayant pour 'Agent' 'Paul' et pour 'Objet' 'Table' – 'Occurre'. La description de l'événement est représentée à la Davidson, chaque clause introduite par '/' revenant à l'ajout d'un terme conjonctif : $(\exists xE/\varphi_1/\varphi_2/\ldots/\varphi_n)F(x) \leftrightarrow (\exists xE/\varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \ldots \varphi_n)F(x)$. Par ailleurs, suivant les règles logiques – $(\exists xE/\varphi_1/\varphi_2/\ldots/\varphi_n)F(x) \vdash (\exists xE)F(x)$; $\vdash (\exists xE/\varphi_i/\varphi_j/\ldots/\varphi_k)F(x)$ $i,j,k \in \{1,\ldots,n\}$ –, nous pouvons déduire les faits suivants : « un déplacement occurre » (1-R&C') ; « un événement ayant Paul pour agent occurre » (1-R&C'') ; et « un événement ayant Table pour Objet occurre » (1-R&C''').

(1-R&C') (∃xDéplacement)Occurrer(x)

(1-R&C'') (∃xÉvénement/Agent(x,Paul))Occurrer(x)

(1-R&C''') (∃xÉvénement/Objet(x,Table))Occurrer(x)

On notera que la forme logique conceptuelle que l'on obtient préserve les avantages recherchés par Davidson [12], à savoir : (i) rendre compte de la polyadicité des verbes d'action, grâce à l'ajout d'un nombre arbitraire de termes conjonctifs dans la description de l'événement ; et (ii) valider, comme nous venons de le montrer, des inférences autorisées par notre description de l'événement. On retiendra par contre que le quantificateur existentiel porte sur un domaine d'événements *abstraits*. La différence majeure avec le traitement de Davidson est que les événements abstraits existent par le fait d'être pensés. L'*existence* des événements, au sens de Davidson, se transforme pour nos événements abstraits en une propriété d'*occurrence*. Cette dernière, comme nous allons le voir en §4.2, dépend de l'existence de faits concrets.

[17] Dans [12], Davidson consacre deux pages à montrer l'inadéquation de (2-Rbis) sur ce point. Son argumentaire s'est toutefois révélé erroné, comme l'a montré Karl Pfeiffer [24].

[18] On trouve une analyse comparable chez Zalta [40].

4.2 Etats d'affaires occurrent-facteurs de l'événement

Nous venons d'identifier une classe de propositions consistant à prédiquer l'occurrence d'événements – dans notre nouvelle notation : '(∃xE)Occurrer(x)' – l'événement de type E existant pour un sujet *s* à un temps *t*. La proximité de la proposition et de l'événement fait que nous pouvons identifier les conditions de vérité de la proposition aux conditions d'occurrence de l'événement. En adoptant une théorie de la correspondance entre propositions/événements et états d'affaires, nous considérons ainsi que les états d'affaires « véri-facteurs », donnant à la proposition la valeur 'Vrai' ou 'Faux', sont ces mêmes états d'affaires « occurrent-facteurs » déterminant l'occurrence de l'événement. Rappelons que, concernant ces états d'affaires, nous comptons évaluer l'hypothèse de nous en tenir à des états d'affaires wittgensteiniens, plus précisément à des faits de la théorie 'at-at'. Dans la suite de cette section, nous utilisons le terme « fait » en ce sens.

Pour préciser notre notion d'*occurrence*, nous formulons une remarque complémentaire. En général c'est bien un ensemble de faits, et non un fait isolé, qui caractérisent l'occurrence d'un événement. Cet ensemble de faits détermine une région spatio-temporelle correspondant à la région spatiale occupée par les substances constituant les états d'affaires, couplée à la région temporelle couvrant les instants d'obtention des états d'affaires[19].

Dans la suite de cette section, nous envisageons des phrases exprimant l'occurrence de divers événements, des états et des changements. Pour chaque phrase, nous identifions les faits occurrent-facteurs.

Commençons par l'expression d'un état de qualité perceptive, par exemple (1a). Nous en rendons compte logiquement au moyen de la forme (1b) : dans cette expression, le prédicat 'ÊtreBlanc' représente un type d'événement qui se trouve être un concept-référentiel générique ; le prédicat 'Expr' représente la relation conceptuelle de participation d'une substance à un état[20]. Pour déterminer les faits occurrents-facteurs, nous faisons appel à la théorie classique des tropes stipulant l'existence d'une qualité particulière *inhérente* à l'objet 'Table' (dans une relation de dépendance spécifique mutuelle)[21]. Comme nous l'annoncions, nous considérons que plusieurs faits sont occurrent-facteurs, ce qui paraît nécessaire pour rendre compte d'une stabilité d'inhérence avec la même qualité '$\text{Blanc}_{\text{Table}}$'. L'identité et le nombre de ces faits dépendent du contexte d'interprétation de la véracité de la phrase (1a).

(1) a « La table est blanche »
b (∃xÊtreBlanc/Expr(x,Table))Occurrer(x)
c <Table, inhère, $\text{Blanc}_{\text{Table}}$,$I_1$>, <Table, inhère, $\text{Blanc}_{\text{Table}}$,$I_2$>, …

Profitons, puisque nous évoquons les tropes, pour signaler que nous identifions des sensations éprouvées par des sujets à des tropes. Nous proposons donc pour une phrase comme (2a) une interprétation analogue à celle de (1a). Les faits occurrent-facteurs sont des faits d'inhérence avec le trope '$\text{Inquiétude}_{\text{Paul}}$' (2c).

(2) a « Paul est inquiet »
b (∃xÊtreInquiet/Expr(x,Paul))Occurrer(x)
c <Paul, inhère, $\text{Inquiétude}_{\text{Paul}}$,$I_1$>, <Paul, inhère, $\text{Inquiétude}_{\text{Paul}}$,$I_2$>, …

Poursuivons avec l'expression d'un état de proximité spatiale entre deux objets, par exemple (3a), dont nous rendons compte logiquement au moyen de la forme logique (3b). Pour identifier les faits occurrent-facteurs (3c), nous adoptons l'analyse suivante. Tout d'abord, dans la suite logique des exemples précédents, nous posons l'existence de deux séries de faits de localisation, se rapportant respectivement à Paul et Marie (les crochets dénotent des séries homogènes de faits). Les faits en question sont des faits d'occupation (prédicat 'Loc') de positions spatiales (constantes 'Pos_i') à des instants (resp. 'I_i' et 'J_i'). Chacune de ces séries correspond, en quelque sorte, à un état de localisation d'une personne. Pour tenir compte du fait que ces états sont concomitants, nous avons ajouté comme condition que des instants I_i correspondent à des instants J_i. Le lecteur aura noté que, dans notre inventaire des faits occurrent-facteurs (3c), nous n'avons pas fait apparaître la distance entre les régions spatiales occupées par 'Paul' et 'Marie', laquelle intervient pourtant pour évaluer leur « proximité ». Notre inventaire est donc incomplet. Mais on notera à ce propos que cette distance préexiste au fait que 'Paul' et 'Marie' occupent les régions spatiales en question et ceci nous amène à conclure que les deux séries de faits recensées dans (3c) n'ajoutent rien de plus dans le monde spatio-temporel. En d'autres termes, nous en concluons que le prédicat 'ÊtreÀCôté' ne représente qu'une relation conceptuelle (il n'existe pas de relation ordinaire correspondante).

(3) a « Paul est à côté de Marie »
b (∃xÊtreÀCôté/Expr(x,Paul)/Objet(x,Marie))Occurrer(x)
c [<Paul, loc, Pos_{I1}, I_1>, <Paul, loc, Pos_{I2}, I_2>, …] ; [<Marie, loc, Pos_{J1}, J_1>, <Marie, loc, Pos_{J2}, J_2>, …] (*certains I_i coïncident avec des J_i ; l'immobilité de Paul et de Marie peut entraîner que des I_i (resp. J_i) soient identiques entre eux*)

Pour rester sur des états, mais des états impliquant des processus, considérons les expressions d'événements-processuels (4a) et (5a). De tels événements sont habituellement qualifiés de « faires » dans le sens où ils rendent compte de changements dans le monde attribuables à des substances. La signification que nous accordons à (4a) (resp. (5a)) est qu'un événement de type 'Marche' (resp. 'Déplacement') est en train d'occurrer (4b) (resp. (5b)). Le concept-référentiel 'Marche' (resp. 'Déplacement') tient

[19] Le lecteur notera qu'en faisant intervenir des régions spatio-temporelles et des états d'affaires, nous considérons des entités proches des *situations* dans la théorie de Jon Barwise et John Perry [2]. Les développements autour de cette théorie étant nombreux, et faute de place dans cet article, nous ne tenterons pas de comparaisons.

[20] Le lecteur notera que, en toute rigueur dans (1b), la constante 'Table' devrait être développée pour représenter un acte référentiel visant un objet physique *simpliciter*, celui-ci « comptant pour » (au sens de la construction sociale de Searle) une table. Nous devrions ainsi prendre en compte l'existence d'un fait social d'attribution d'une fonction. Par la suite, nous continuerons à user de telles simplifications.

[21] Pour une présentation récente de la théorie des tropes, le lecteur est invité à se référer à la synthèse d'Anthony Fisher [14].

pour un type d'événement. Les faits occurrent-facteurs sont des faits d'énaction de processus (4c) (resp. (5c)). Dans (4c), 'Marcher$_{\#i}$' est à considérer comme une instance du type de processus 'Marcher', à distinguer donc de l'instance du type d'événement 'Marche' (nous retrouvons la distinction entre 'Marche$_{Proc}$' et 'Marche$_{Event}$' discutée en Section 2). Dans (5c), nous avons représenté le fait que Paul énacte un processus 'Proc$_{\#i}$', dont le type n'est pas précisé, lequel *perpétue* le processus 'Déplacer$_{\#j}$' énacté par la table[22].

(4) a « Paul marche »
b (∃xMarche/Agent(x,Paul))Occurrer(x)
c [<Paul, énacte, Marcher$_{\#i}$, I_1>, <Paul, énacte, Marcher$_{\#i}$, I_2>, …]

(5) a « Paul déplace la table »
b (∃xDéplacement/Agent(x,Paul)/Patient(x,Table)) Occurrer(x)
c [<Paul, énacte, Proc$_{\#i}$,I_1>, <Paul, énacte, Proc$_{\#i}$,I_1>,…] ; [<Table, énacte, Déplacer$_{\#j}$, I_1>, <Table, énacte, Déplacer$_{\#j}$, I_1>,…] ; [<Proc$_{\#i}$, perpétue, Déplacer$_{\#j}$,I_1>, <Proc$_{\#i}$, perpétue, Déplacer$_{\#j}$,I_2>, …]

Arrêtons-nous sur le traitement de ces événements-processuels. Ces exemples nous montrent qu'il est possible de distinguer, côté sens, des événements abstraits conceptuels et, côté référence, des énactions de processus concrets. Nous pourrions aller plus loin en montrant comment des adverbes modifient le sens de tels énoncés. Dans un cas comme « Paul marche rapidement », l'adverbe qualifie la vitesse du processus. Au contraire, dans un cas comme « Paul s'est soudainement mis à marcher », l'adverbe « soudainement » qualifie l'événement en lui-même : il lui correspond un fait événementiel abstrait[23].

A ce stade, établissons un bilan. Comme nous l'avions envisagé, les seuls faits occurrent-facteurs auxquels nous avons eu recours au sein des séries de faits sont des faits wittgensteiniens. Les relations identifiées - « inhère », « localisation », « énacter », « perpétue » - peuvent être considérées comme des relations de fondation physiques. La preuve en est que ces relations ne sont pas exprimées par des termes de la langue naturelle. A contrario, ceci signifie que la catégorie des relations « ordinaires » devient sans objet et que nous devons considérer la grande majorité des relations comme des relations conceptuelles, comme nous l'avons fait avec la relation 'Être à côté'. Ce constat tient sur un échantillon de phrases et nécessitera d'être consolidé. Rappelons que le fait de considérer des processus physiques à côté des objets physiques, d'attribuer aux objets physiques des qualités particulières pouvant évoluer dans le temps, est un aspect déterminant pour le bilan que nous venons de dresser.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une défense du cadre ontologique que nous promouvons couramment, concernant notamment la nature abstraite des événements et la nature concrète des processus, en le positionnant vis-à-vis de théories contemporaines du sens et de la référence. Nous avons adopté à cette occasion un double réalisme ordinaire et conceptuel, qui s'est révélé déterminant pour analyser la nature des propriétés-relations et distinguer celles étant uniquement conceptuelles de celles qui représentent des propriétés-relations ordinaires.

En guise de propriétés-relations ordinaires, nous avons émis l'hypothèse de nous en tenir à des propriétés-relations dénommées par Mulligan *et al.* [27] « relations de fondation mutuelle », ce qui revient à ne considérer dans le monde physique que des faits wittgensteiniens constitués de particuliers. En considérant un petit échantillon de phrases assertant l'occurrence d'événements, correspondant à des états mais également des changements, nous avons pu montrer le bien-fondé de cette hypothèse.

Récemment, la philosophe Arianna Betti, dans son [6] *Against facts*, très critique quant à l'existence de faits armstrongiens comportant un universel comme constituant, est arrivée à un constat proche. En guise de « relation de fondation mutuelle », Betti a repris à son compte la notion russellienne de « relation reliante ». La clef de voûte de ces théories ontologique et sémantique réside très clairement dans la nature des relations que l'on considère. Nous considérons cette question de la nature des relations comme le principal chantier qui s'ouvre devant nous.

6 Références

[1] D.M. Armstrong, *A world of states of Affairs*, Cambridge University Press, 1997.

[2] J. Barwise & J. Perry, *Situations and Attitudes*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1983.

[3] J. Benoist (ed.), *Propositions et états de choses. Entre être et sens*, Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 2006.

[4] H. Bergson, *The creative Mind*, New York, Philosophical Library, 1946.

[5] A. Betti, Propositions et états de choses chez Twardowski, *Dialogue*, Vol. 14, pp. 469-92, 2005.

[6] A. Betti, *Against facts*, The MIT Press, 2015.

[7] R.M. Chisholm, Events and Propositions, *Noûs*, Vol. 4, pp. 15-24, 1970.

[8] C.E. Cleland, The Difference Between Real Change and Mere Cambridge Change, *Philosophical Studies*, Vol. 60, pp. 257-280, 1990.

[9] N.B. Cocchiarella, Conceptual Realism as a Formal Ontology, In R. Poli & P. Sirnor (eds.), *Formal Ontology*, Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1996.

[10] N.B. Cocchiarella, Logic and Ontology, *Axiomathes*, Vol. 12, pp. 117-150, 2001.

[11] D. Davidson, Truth and Meaning, *Synthese*, Vol. 17, N° 3, pp. 304-323, 1967.

[12] D. Davidson, The Logical Form of Action Sentences, In N. Rescher (ed.), *The Logic of Decision and Action*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 81-95, 1967.

[13] K. Fine, First-Order Modal Theories III – Facts, *Synthèse*, Vol. 53, pp. 43-122, 1982.

[14] A.R.J. Fisher, Abstracta and Abstraction in Trope Theory. *Philosophical Papers*, 2019 ;

[22] Nous empruntons ici à Galton [17] la relation de *perpétuation* entre processus. Cette relation est à entendre comme une propagation causale entre deux processus déjà existants : un premier processus actif entretient l'activité d'un second processus. Par exemple, tant que Paul pousse une table, celle-ci se déplace.

[23] Faute de place, nous ne pouvons détailler ici les traitements. Le lecteur intéressé peut se référer à [21].

©AFIA 2020

https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/05568641.2019.1571938.

[15] A. Galton, On What Goes On: The ontology of processes and events, In R. Ferrario & W. Kuhn (eds.), Proc. of *the Fourth International Conference on Formal Ontology in Information Systems* (FOIS2006), pp. 4-11, 2006.

[16] A. Galton, Experience and History: Processes and their Relation to Events, *Journal of Logic and Computation*, Vol. 18, N° 3, pp. 323-40, 2008.

[17] A. Galton, States, Processes and Events, and the Ontology of Causal Relations, In M. Donnelly & G. Guizzardi (eds.), Proc. of *the 7th Int. Conf. on Formal Ontology in Information Systems*, IOS Press, pp. 279-92, 2012.

[18] A. Galton & R. Mizoguchi, The water falls but the waterfall does not fall: New perspectives on objects, processes and events, *Applied Ontology*, Vol. 4, pp. 71-107, 2009.

[19] P. Geach, What actually Exists? In Proc. of *the Aristotelian Society, Supplementary Volumes*, Vol. 42, pp. 7-16, 1968.

[20] P. Hanks, Propositions, Synonymy, and Compositional Semantics. In F. Moltmann & M. Textor (eds.), *Act-Based Conceptions of Propositional Content: Contemporary and Historical Perspectives*, Oxford University Press, pp. 235-53, 2017.

[21] G. Kassel, Ontologie de l'action et formes logiques des phrases d'action : de nouvelles perspectives, In T. De Lima et S. Doutre (eds.), Actes des *12èmes Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale*, Amiens, 13-15 juin, 2018.

[22] G. Kassel, Processes Endure, Whereas Events Occur. In S. Borgo, R. Ferrario, C. Masolo & L. Vieu (eds.), *Ontology Makes Sense*, IOS Press, pp. 177-193, 2019.

[23] G. Kassel, Physical processes, their life and their history. *Applied Ontology*. Vol. 15, N° 2, pp. 109-133, 2020.

[24] W. Künne, Bolzano and (Early) Husserl on Intentionality. In G. Primiero & Sh. Rahman (eds.), *Acts of Knowledge: History, Philosophy and Logic, Essays Dedicated to Göran Sundholm*, London: College Publications, pp. 95-140, 2009.

[25] F. Moltmann, *Abstract Objects and the Semantics of Natural Language*, Oxford University Press, 2013.

[26] F. Moltmann & M. TEXTOR (eds.), *Act-Based Conceptions of Propositional Content: Contemporary and Historical Perspectives*, Oxford University Press, 2017.

[27] K. Mulligan, P. Simons & B. Smith, Truth-Makers. *Philosophy and Phenomenological Research*, Vol. 44, pp. 287-321, 1984.

[28] T. Parsons, *Events in the Semantics of English*, Cambridge (Mass.): MIT Press, 1990.

[29] K. Pfeifer, A short vindication of Reichenbach's "event-splitting", *Logique et Analyse*, Vol. 31, N° 121-122, pp. 143-152, 1988.

[30] H. Reichenbach, *Elements of Symbolic Logic*, New York: Macmillan, 1947.

[31] B. Russell, *Principles of Mathematics*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1903.

[32] B. Smith, *Austrian Philosophy, Brentano's Legacy*. Chicago, Open Court, 1995.

[33] S. Soames, Cognitive propositions. In J.C. King, S. Soames & J. Speaks (eds.), *New thinking about propositions*, Oxford: Oxford University Press, pp. 91-124, 2014.

[34] R. Stout, Processes, *Philosophy*, vol. 72, N° 279, pp. 19-27, 1997.

[35] R. Stout, The life of a process. In G. Debrock (ed.), *Process Pragmatism: Essays on a Quiet Philosophical Revolution*, Rodopi, pp. 145-57, 2003.

[36] W.F. Vallicella, Three Conceptions of States of Affairs, *Noûs*, Vol. 34, N° 2, pp. 237-259, 2000.

[37] N. Wilson, Facts, Events, and Their Conditions, *Philosophical Studies*, Vol. XXV, pp. 303-321, 1974.

[38] L. Wittgenstein, Tractatus Logico-Philosophicus. London, Routledge and Kegan Paul, 1922; trad. anglaise de Logisch-Philosophische Abhandlung, Wilhelm Ostwald (ed.), Annalen der Naturphilosophie, Vol. 14, 1921.

[39] E.N. Zalta, *Abstract Objects. An Introduction to Axiomatic Metaphysics*, D. Reidel Publishing Company, 1983.

[40] E.N. Zalta, Fregean Senses, Modes of Presentation, and Concepts, *Philosophical Perspectives*, *Noûs* Supplement, Vol. 15(2001), pp. 335-359, 2001.

Bandit et Semi-Bandit avec Retour Partiel : Une Stratégie d'Optimisation du Retour Utilisateur

A. LETARD[1, 2], T. AMGHAR[2], O. CAMP[3], N. GUTOWSKI[3]

[1] Dpt R&D, KARA TECHNOLOGY
[2] Université d'Angers, LERIA
[3] Groupe ESEO, ERIS

alexandre.letard@kara.technology

Résumé

Aujourd'hui, dans de nombreux secteurs d'activités, les entreprises renforcent leur numérisation et proposent de nouveaux services à leurs usagers. Ces dernières années, nombre de ces services ont reposé sur des techniques d'apprentissage automatique. Pour les algorithmes de bandits-manchots combinatoires, particulièrement employés pour la recommandation, le retour utilisateur joue un rôle crucial dans l'apprentissage en ligne. Cependant, les stratégies de prise en compte de ce retour reposent essentiellement sur l'observation d'un vecteur de récompenses complet. Celui-ci reste difficile à acquérir lorsque l'utilisateur doit être directement et trop fréquemment sollicité. Dans cet article, nous proposons une nouvelle approche permettant de pallier cette problématique et maintenant une précision globale proche de celles des méthodes classiques.

Mots-clés

Apprentissage par Renforcement, Bandits-Manchots Combinatoires, Retour Utilisateur, Systèmes de Recommandation, Vitesse d'Apprentissage

Abstract

Nowadays, in most fields of activities, companies are strengthening their digitization process and offer new services to their users. In recent years, many of these services have relied on machine learning techniques. Concerning combinatorial multi-armed bandit algorithms, which are particularly employed for recommendation, user feedbacks play a crucial role for online learning. However, strategies for considering those feedbacks are essentially based on the observation of a full rewards vector which can be hard to acquire when users must be directly and too frequently solicited. Herein, we propose a novel approach which overcomes these limitations, while providing a level of global accuracy similar to that obtained by classical competitive methods.

Keywords

Reinforcement Learning, Combinatorial Multi-Armed Bandits, User Feedbacks, Recommendations System, Learning Speed

1 Introduction

De nos jours, les systèmes de recommandations basés sur des méthodes d'apprentissage automatique sont devenus courants dans de nombreux domaines [12]. Parmi les techniques employées, celles reposant sur les bandits-manchots obtiennent de bons résultats en matière de précision globale [12, 6]. C'est le cas, plus particulièrement des bandits-manchots combinatoires [17]. Dans un cadre industriel, certains secteurs d'activités, comme la navigation de plaisance [7], amorcent une transition numérique afin de proposer des services similaires à leurs usagers. Dans le domaine de l'habitat mobile, auquel appartient la navigation de plaisance [7], on observe une concentration des problématiques inhérentes à un lieu de vie et à un véhicule. Il existe ainsi de multiples modes d'utilisation d'un véhicule habitable qui peut être une résidence, principale ou secondaire, ou un moyen de transport, ou encore un outil de dépassement de soi. Ces modes d'utilisation sont propres à chaque usager et à chaque contexte d'usage. Au cours des dernières années, des travaux ont été entrepris pour favoriser la transition numérique du nautisme [14, 22]. Ces travaux portent essentiellement sur l'automatisation des manoeuvres de navigation et ne traitent pas des autres aspects de l'habitat mobile. Or, afin d'apporter des recommandations pertinentes aux navigateurs et ainsi améliorer leurs expériences maritimes, il est nécessaire de prendre en considération l'ensemble de ces aspects. À terme, notre objectif est la mise en oeuvre d'un bateau intelligent, EVA [1], dont le comportement sera guidé par les besoins des utilisateurs, en regard de leur mode d'utilisation du bateau. Nous viserons à réduire les risques de pénuries d'énergie en mer et les impacts environnementaux en optimisant l'utilisation du bateau. Nous mettrons en oeuvre des techniques de bandits-manchots combinatoires afin d'identifier les fonctionnalités "juste nécessaires" parmi celles disponibles à bord, pour satisfaire les usagers.

Afin d'effectuer des recommandations personnalisées, les techniques de bandits-manchots combinatoires considèrent le retour utilisateur exprimé à chaque recommandation [10]. Dans la littérature, les stratégies de prise en compte

1. Entité de Voyages Automatisée

©AfIA 2020

du retour utilisateur les plus fréquemment exploitées reposent sur un vecteur de récompenses complet pour l'ensemble des recommandations effectuées [20, 10]. Ce vecteur peut se révéler difficile à acquérir, notamment lorsque les récompenses dépendent d'un retour explicite de l'utilisateur, p.ex sous la forme d'un score ou d'une évaluation. À ce titre, dans cet article nous expérimentons et évaluons une autre méthode permettant de favoriser l'application des techniques de bandits-manchots combinatoires au sein de systèmes interactifs, en vue de leur intégration dans des secteurs d'activités nouvellement connectés.

Nous proposons une approche appliquant à la fois des considérations de type bandit et semi-bandit sur un sous-ensemble d'éléments recommandés de taille variable. Nous nommons cette méthode "Partial Bandit with Semi-Bandit" (*P-BSB*). Nous proposons trois stratégies pour déterminer le sous-ensemble à observer : *Reinforce - RE*, *Optimal Exploration - OE* et *Randomized - RD*.

Au travers de nos expérimentations, nous appliquons une approche combinatoire à plusieurs algorithmes de bandits manchots à tirages simples. Nous observons que cette stratégie permet l'emploi des techniques de bandits-manchots combinatoires avec un retour utilisateur restreint. Aussi, nous constatons que les résultats de précision globale et d'itération de convergence obtenus pour un horizon supérieur à 10 000 itérations sont proches de ceux obtenus avec des méthodes classiques de bandit et semi-bandit.

En résumé, nos contributions visent à permettre : 1) l'application d'une méthode proposant un tirage multiple à des algorithmes de bandits manchots de l'état de l'art couramment utilisés en tirage simple, notamment *UCB2* [4], qui, à notre connaissance, n'a pas été employé dans un cadre combinatoire ; 2) l'évaluation et la comparaison de ces algorithmes en termes de précision globale et d'itération de convergence sur plusieurs jeux de données issus d'applications réelles ; 3) la formalisation et la proposition d'une nouvelle méthode de considération du retour utilisateur – "Partial Bandit with Semi-Bandit" – pour les algorithmes de bandits manchots que nous déclinons selon trois variantes, afin de réduire les contraintes liées à l'acquisition du retour utilisateur.

Cet article est organisé comme suit : la section 2 expose les notions fondamentales inhérentes aux techniques employées, quelques travaux connexes de la littérature, et nos motivations. La section 3 formalise notre problématique et l'approche que nous proposons pour y répondre. La section 4 analyse les résultats d'expérimentations effectuées avec des jeux de données issus d'applications réelles. Enfin, dans la section 5, nous concluons et exposons les futurs travaux envisagés.

2 Travaux Connexes et Motivations

Cet article traite des bandits-manchots combinatoires et notamment des stratégies de prise en compte du retour utilisateur dans le cadre de leur apprentissage. Ainsi, dans cette section, avant d'aborder les spécificités des bandits-manchots combinatoires [9] (*Combinatorial Multi-Armed Bandit* : *COM-MAB* et *Combinatorial Contextual Multi-Armed Bandit* : *COM-CMAB*) et des approches couramment employées pour exploiter le retour de l'utilisateur, nous rappellerons le problème du bandit-manchot [19] et le problème des bandits-manchots contextuels [15]. Enfin, nous évoquerons les travaux connexes de la littérature et présenterons nos motivations à envisager la combinaison de deux prises en compte partielles du retour utilisateur au sein d'applications réelles de bandits manchots combinatoires.

2.1 Les bandits manchots

Il existe une vaste littérature sur le problème de bandits-manchots (*MAB*) largement étudiés depuis leur première formulation par Robbins en 1952 [19]. Il en résulte aujourd'hui de nombreuses approches [12] : stochastiques [3], non stochastiques [5] ou bayésiennes [1]. Un problème de bandits-manchots est composé d'un ensemble $\mathcal{A} = \{a_1, ...a_m\}$ de *m* bras indépendants, où chaque bras $a \in \mathcal{A}$ correspond à un élément à recommander. Dans le cadre des systèmes de recommandation, à chaque itération $t \in [1,\ T]$, *T* étant l'horizon, un agent sélectionne, suivant une politique π, un bras $a_t \in \mathcal{A}$, correspondant à un élément à recommander et le propose à l'utilisateur. Une partie du vecteur de récompenses Y_t [2] associé à $\mathcal{A}$ est dévoilée à l'agent qui perçoit alors une unique récompense $r_{t,a}$ pour l'élément recommandé. Dans cet article, nous nous intéresserons plus particulièrement au problème de *MAB* de type Bernoulli où $r_{t,a} \in \{0, 1\}$ avec $r_{t,a} = 0$ si l'utilisateur ne valide pas la recommandation qui lui a été faite et $r_{t,a} = 1$ s'il la valide [12]. Dans le cadre d'une approche stochastique, où les récompenses sont considérées comme étant des variables indépendantes et identiquement distribuées entre les bras, l'objectif d'un algorithme de *MAB* est de minimiser le regret $\rho_T = T\mu^* - \sum_{t=1}^{T} r_{t,a}$, où μ^* désigne l'espérance de récompense associée au bras optimal, sans connaissance a priori de la distribution des probabilités de récompenses $\mu_a \in [0, 1]$ associées à chacun des bras a de $\mathcal{A}$. Chercher à minimiser le regret observé revient à maximiser la précision globale $Acc(T) = \frac{\sum_{t=1}^{T} r_{t,a}}{T}$, qui est également couramment exploitée comme critère d'évaluation au sein de la littérature [12].

Dans le cadre particulier des bandits-manchots contextuels (*CMAB*), le contexte de l'utilisateur doit être pris en considération. Il est traduit sous la forme d'un vecteur $x \in \mathcal{X}$, $x \subseteq \mathbb{R}^d$ encodant les *d* caractéristiques de l'utilisateur et de l'environnement dans lequel il évolue, p.ex., le profil (âge, sexe, métier), les préférences, l'environnement (localisation, quartier), ou encore l'activité qu'il réalise. Dans cette variante contextuelle, on considère qu'il existe une dépendance entre l'espérance de récompense d'un bras et le contexte observé. Dans les cas d'une dépendance linéaire, l'espérance s'exprime en fonction du contexte comme suit : $\mathbb{E}[r_{t,a}|x_t] = \hat{\theta}_{t,a}^{\top} x_t$, où $\hat{\theta}_{t,a}$ est un vecteur de coefficients, associé au bras *a*, initialement nul et estimé à l'itération *t*.

2. Y_t est supposé existant mais ne peut être, en réalité, observé qu'en partie ($r_{t,a}$ en cas de tirage simple, R_t dans un cadre combinatoire).

2.2 Les bandits-manchots combinatoires

Les problèmes de bandits manchots combinatoires correspondent à une généralisation des problèmes de *MAB* et *CMAB* où l'utilisateur se voit proposer un super-bras, S_t, constitué de *k* éléments, tels que $S_t = \cup_{i=1}^{k} a_i$, avec $a_i = argmax^{\pi}_{a \in \mathcal{A} \setminus \{S_t\}} \mathbb{E}[R_{t,a}|x_t]$. À notre connaissance,la principale approche combinatoire est le tirage multiple. Cette méthode constitue S_t dynamiquement en répétant l'action de recommandation d'une ou plusieurs instances à tirages simples pour sélectionner k bras [9, 17, 10] ensuite agrégés en S_t. Ainsi, l'apprentissage s'effectue toujours au travers des bras individuels $a \in \mathcal{A}$.

Ainsi, la valeur de récompense associée à la recommandation S_t, utilisée dans l'apprentissage de l'agent, est exprimée par $S_t^\top R_t = \sum_{i=1}^{k} S_{t,i} R_{t,i}$, où R_t est le vecteur de récompense observé, de dimension *k*. Nous nommons ϕ la stratégie de prise en compte du retour utilisateur déterminant : 1) la construction de R_t à partir de Y_t et S_t ; 2) la politique d'apprentissage de l'agent.

Cette évolution des techniques *MAB*/*CMAB* a été employée dans de nombreux secteurs d'activités tels que les systèmes de recommandation, la finance ou le domaine médical [6]. Ainsi, l'algorithme 1 [9, 17, 10] est utilisé dans les expérimentations présentées ici. Dans le cadre de cet article, une valeur de récompense globale, $r_t \in \{0, 1\}$, où $r_t = 1$ si au moins un des éléments de S_t est validé par l'utilisateur, 0 sinon, est employée pour le calcul de la précision globale de l'algorithme tel que défini dans la sous-section 2.1.

2.3 Prise en compte du retour utilisateur

Différentes stratégies de prise en compte du retour utilisateur ont été développées pour les bandits-manchots combinatoires. Ces variantes peuvent être majoritairement regroupées en deux approches principales : **bandit** [13] et **semi-bandit** [20, 10].

Dans l'approche **bandit**, l'agent observe uniquement une récompense cumulée pour le "super-bras" S_t, sans connaître la valeur de retour propre à chacun des *k* bras le constituant : $R_{t,\,\phi_B} = S_t^\top R_t$. L'approche **semi-bandit** permet l'observation de la récompense spécifique de chaque bras $a_{t,i}$ constituant S_t : $R_{t,\,\phi_{SB}} = \cup_i S_{t,i} R_{t,i}$. Dans les deux cas, l'ensemble du vecteur de récompense R_t, de dimension *k*, reste nécessaire à l'apprentissage.

Dans de récents travaux, il est remarqué que l'approche de type **semi-bandit** est prépondérante [20]. Il en existe également de nombreuses déclinaisons permettant son exploitation dans certains cadres applicatifs, p.ex., le modèle en cascade où le retour utilisateur est exprimé par un clic sur une recommandation et où la position de l'élément cliqué est exploitée pour déterminer implicitement les autres valeurs de retours [16].

2.4 Retours partiels

Une stratégie *partielle* de prise en compte des retours utilisateur correspond à une approche où le vecteur de récompenses observées R_t est seulement défini sur une partie $P_t \subseteq S_t$ de l'ensemble des éléments recommandés à l'utilisateur. Formellement, lors d'une considération non-partielle, la dimension du vecteur de récompenses observées s'exprime par $|R_t| = |S_t|$, tandis que pour les approches partielles elle s'exprime $|R_t| = l$ avec $l < |S_t|$. Parmi les exemples de la littérature [11, 18], l est considéré comme une constante. Ainsi, Grant et al. [11] emploie une approche de semi-bandit partiel reposant sur un filtrage par application d'une loi binomiale. Luedtke et al. [18] exploite aussi une approche de type semi-bandit partiel où un sous-ensemble de S_t, est sélectionné uniformément parmi tous les sous-ensembles de S_t de cardinalité *l*.

L'approche **P-BSB** se différencie par la détermination d'un sous-ensemble de taille variable. L'objectif applicatif de cette nuance est de permettre, à chaque itération, l'exploitation du nombre maximal de retours que l'usager est prêt à prodiguer sans l'excéder. Une autre distinction porte sur la stratégie employée pour construire R_t. Avec **P-BSB**, l'identification des retours à solliciter auprès de l'utilisateur est soit aléatoire (variante **RD**), soit basée sur l'apprentissage réalisé jusqu'à l'itération $t-1$ (variantes **RE** et **OE**). Enfin, notre méthode diffère par l'observation d'une récompense double (R_{t,ϕ_B} et $R_{t,\phi_{SB}}$) lorsqu'un bras a effectivement apporté satisfaction à l'utilisateur.

Algorithme 1 : Bandit à tirages multiples

Entrées : π : Une instance d'une politique de bandit à tirages simples et ses paramètres particuliers.
$\mathcal{A}$: L'ensemble des bras disponibles.
k : Le nombre d'éléments à recommander à chaque itération.
Y_t, Le vecteur de récompenses réelles.
T : L'horizon.
$x \in \mathcal{X}$: Le contexte utilisateur.
$\phi(S_t, Y_t)$: La stratégie de considération du retour utilisateur.

Initialisation : Initialiser l'instance conformément aux besoins de π

pour $t = 1$ *à T* **faire**
  Considérer $x_t \in X$: un utilisateur u et son contexte
  $S_t \leftarrow \emptyset$
  pour $i = 1$ *à k* **faire**
    Sélectionner l'élément $a_i \in \mathcal{A} \setminus \{S_t\}$ selon x_t et π
    $S_t \leftarrow S_t \cup a_i$
  fin
  Recommander S_t à l'utilisateur u
  Recevoir la récompense globale r_t de la recommandation $S_t, r_t \in \{0, 1\}$
  Déterminer R_t à partir de Y_t et S_t selon ϕ
  Mettre à jour la politique π avec R_t selon π et ϕ
fin

©AfIA 2020

2.5 Motivations

Les algorithmes de *MAB* ou de *CMAB* visent à maximiser leur précision globale [12]. À cette fin, la prise en compte du retour utilisateur joue un rôle majeur. Cependant, l'acquisition d'un vecteur de récompense R_t complet, nécessaire dans les considérations bandit et semi-bandit, peut s'avérer difficile voire impossible en situation réelle.

De nombreux secteurs d'activités, comme la navigation de plaisance, amorcent leur transition numérique et ne disposent donc aujourd'hui d'aucun jeu de données permettant l'entraînement hors ligne d'un agent. Dans ce cadre applicatif, les usagers risquent de se détourner d'une application s'ils ne sont pas satisfaits des recommandations proposées. Il est alors crucial pour le système de recommandation d'acquérir rapidement en ligne une connaissance suffisante. Ainsi, nous soutenons que l'itération de convergence de la précision globale, indicatrice de la vitesse d'apprentissage de l'agent, doit être prise en considération comme un critère d'évaluation à part entière des algorithmes étudiés.

Par ailleurs, des approches telles que celles en cascade [16] restent délicates à employer si le retour utilisateur doit être explicitement sollicité, p.ex., sous la forme d'un score pour déterminer les points de valeur parmi les étapes et activités - qui seraient les bras disponibles d'un algorithme de bandit manchot combinatoire - d'un voyage défini et recommandé par l'agent. Le nombre potentiellement important de retours demandés auprès de l'usager pour satisfaire une telle configuration pourrait en effet le détourner de la solution.

Ainsi, l'approche *Partial Bandit with Semi-Bandit* (*P-BSB*), proposée dans cet article, repose sur l'identification d'un sous-ensemble de R_t, P_t, de cardinalité ψ_t variable, correspondant au nombre de sollicitations auxquelles l'usager accepte de répondre. **P-BSB** emploie ensuite une approche de type bandit sur S_t et une approche de type semi-bandit sur P_t. Cette double attribution de récompense à certains bras vise à accroître la vitesse d'apprentissage en avantageant les bras pour lesquels une satisfaction de l'utilisateur est effectivement observée. Au travers de cette approche, l'objectif est de faciliter l'utilisation des techniques de bandits-manchots combinatoires sur un plus large spectre d'applications du monde réel en : 1) réduisant les sollicitations auprès des utilisateurs ; 2) conservant des performances similaires à celles observées avec les méthodes classiques.

3 Définition du problème et méthodes

Dans cette section, nous formulons notre problème et décrivons notre nouvelle méthode. Celle-ci porte sur la prise en compte du retour utilisateur et repose sur la combinaison des stratégies de "bandit" et "semi-bandit" couramment employées dans la littérature. Nous les appliquons avec un nombre restreint de retours utilisateur observés.

3.1 Énoncé du problème

Soit $\mathcal{X} \subseteq \{0,1\}^d$ l'ensemble des vecteurs de contexte de dimension d caractérisant un utilisateur et son environnement p.ex., $x \in \mathcal{X}$ est un vecteur binaire encodant les caractéristiques des utilisateurs demandant une recommandation p.ex., des activités à réaliser au cours d'un voyage, à l'instant *t* d'un horizon fini *T* déterminé à l'avance. Dans le cas non contextuel c.-à-d., en l'absence de contexte ou sans prise en compte du contexte par l'algorithme, alors $\forall t \in T, x_t = \vec{0}$, le vecteur x_t est alors limité à un simple identifiant.

Soit $\mathcal{A} = \{a_1, ..., a_m\}$ l'ensemble des éléments pouvant être recommandé par un algorithme de *MAB* ou *CMAB* donné de politique π et $\mu = \{\mu_1, ..., \mu_m\}$ la distribution des espérances de récompenses associées à chaque bras *a* de $\mathcal{A}$ selon π. Soit S_t le sous-ensemble constitué d'éléments de $\mathcal{A}$, de dimension $k < m$ à l'itération $t \in [1, T]$. À chaque pas de temps t on recommande un super-bras S_t, déterminé selon π et μ_t, à un utilisateur u_t se présentant avec son vecteur de contexte x_t. Enfin, soient $r_t \in \{0,1\}$ la récompense globale associée à S_t utilisée pour le calcul de la précision globale, $Acc^{\pi}(T)$ de l'agent, Y_t un vecteur associant une récompense réelle à chacun des bras $\{a_1, ..., a_m\}$ de $\mathcal{A}$ et $R_t \subseteq Y_t$ le vecteur de récompense exprimé par l'usager et effectivement observé par l'agent. Dans les cas des stratégies de type bandit et semi-bandit il est supposé que $R_t = Y_t$ pour les *k* bras de S_t. Or, dans plusieurs applications du monde réel, lorsque les récompenses observées ne peuvent être obtenues que par une sollicitation explicite de l'usager pour l'ensemble des bras constituant S_t, cette nécessité devient alors très difficile à satisfaire. Ce constat peut se révéler critique pour nombre d'applications du monde réel. Ainsi, une nouvelle approche visant à réduire les sollicitations des utilisateurs tout en maintenant un apprentissage efficace semble nécessaire. La sous-section suivante présente une nouvelle méthode exploitant une combinaison des stratégies de type bandit et semi-bandit sur un sous-ensemble restreint de S_t.

3.2 Partial Bandit with Semi-Bandit : P-BSB

Soit un cadre applicatif où le retour utilisateur doit être explicitement demandé à l'usager et où $|R_t| = \psi_t \leq k$ est donc une variable aléatoire représentative de la capacité de l'utilisateur à effectuer un retour à l'agent, pouvant dépendre p.ex., de sa disponibilité, de son intérêt à répondre, de son humeur. Dans cet article, cette capacité est désignée sous le terme de "patience" de l'utilisateur. L'approche *P-BSB* vise à construire R_t et à déterminer son utilisation pour l'apprentissage de l'agent. Cette méthode correspond à une application des lignes 10 et 11 de l'algorithme 1. La première étape de l'approche *P-BSB* consiste à identifier un sous-ensemble $P_t \subseteq \mathcal{S}_t$ de cardinalité ψ_t pour lequel des récompenses pourront effectivement être observées par l'agent, tel que $P_t = \cup_{i=1}^{\rho} a_i$. Pour ce faire, *P-BSB* est décliné selon trois variantes pour déterminer les bras a_i considérés :

— **Reinforce - RE** : sélectionne les ψ_t bras de S_t

ayant l'espérance de récompense $\mathbb{E}[R_{t,a}|x_t]$ la plus haute, c.-à-d. :

$$a_i = argmax^{\pi}_{a \in S_t \setminus \{P_t\}} \mathbb{E}[R_{t,a}|x_t] \quad (1)$$

— **Optimal-Exploration - OE** : sélectionne les ψ_t bras de S_t ayant été le moins fréquemment observés à l'itération *t*, c.-à-d. :

$$a_i = argmin_{a \in S_t \setminus \{P_t\}} obs_{a,t} \quad (2)$$

où $obs_{a,t}$ est le nombre de fois qu'une récompense a été observée pour le bras a à l'itération t.

— **Randomized - RD** : sélectionne aléatoirement ψ_t bras distincts de S_t, c.-à-d. :

$$a_i = random(S_t) \quad (3)$$

où $random(S_t)$ correspond à la sélection aléatoire d'un bras dans S_t n'ayant pas été précédemment choisi.

La seconde étape de *P-BSB* est commune à toutes ces variantes et consiste à acquérir le vecteur R_t de récompenses des ψ_t bras considérés à partir de Y_t, ou autrement dit, de l'utilisateur :

$$R_t = \cup_{i \in P_t} Y_{t,i}$$

Enfin, la troisième étape consiste à appliquer une stratégie de type bandit sur l'ensemble des *k* bras de S_t et une stratégie de type semi-bandit sur les ψ_t bras de P_t à partir de l'échantillon R_t observé [3] :

$$\forall a \in S_t, r_{t,a} = r_{t-1,a} + R_{t,B}$$

et si $a \in P_t$ alors $r_{t,a} = r_{t,a} + R_{t,SB_a}$

Où $r_{t,a}$ désigne l'ensemble des récompenses perçues pour le bras *a* à l'itération *t*, et avec :

$$R_{t,B} = P_t^{\top} R_t$$

et $\forall i \in P_t$:

$$R_{t,SB} = \cup_i P_{t,i} R_{t,i}$$

Cet article détaille la variante **RE** dans l'Algorithme 2. Les autres variantes suivent la même trame globale et ne diffèrent que par leur stratégie de constitution de P_t. Ainsi, pour employer ces variantes, il convient de remplacer la ligne 2 de l'Algorithme 2 par les éléments de l'Équation 2 pour **OE** et de l'Équation 3 pour **RD**.

L'objectif de **RE** est de favoriser une exploitabilité applicative rapide en favorisant une action optimiste de l'agent. **OE**, quant à lui, suit un objectif exploratoire et cherche donc à renforcer la connaissance de l'agent sur la distribution des espérances de récompenses $\mu_1, ..., \mu_k$ des bras recommandés. Enfin, **RD** applique une stratégie de sélection aléatoire permettant un comportement plus proche d'une prise en compte semi-bandit classique.

3. Lorsque $a \in P_t$, l'agent observe donc deux récompenses pour le bras a : $R_{t,B}$ et R_{t,SB_a}. Si $\psi_t = 0$, l'agent n'observe alors aucune récompense à l'itération *t*.

4 Expérimentations et résultats

Nous présentons dans cette section l'évaluation empirique hors ligne de notre méthode. Cette phase d'expérimentation est préliminaire à l'intégration en ligne de notre méthode dans notre système de recommandation en environnement marin.

Ainsi dans cette section, nous commençons par présenter les jeux de données et les algorithmes employés pour évaluer notre approche. Nous exposons ensuite le protocole expérimental. Enfin nous présentons et analysons les résultats obtenus.

Algorithme 2 : *P-BSB* - RE

Entrées : S_t, Le super-bras recommandé à l'utilisateur.
Y_t, Le vecteur de récompenses réelles.
ψ_t, Le nombre de bras de S_t dont les récompenses peuvent être observées.

1 **tant que** $|P_t| < \psi_t$ **faire**
2 Constituer P_t tel que $P_t = \cup_i argmax^{\pi}_{a \in S_t \setminus \{P_t\}} \mathbb{E}[R_{t,a}|x_t]$ (selon l'Équation 1)
3 **fin**
4 **pour** $i \in P_t$ **faire**
5 Construire R_t tel que $R_t = \cup_i Y_{t,i}$
6 Appliquer la stratégie semi-bandit à R_t : $R_{t,SB} = \cup_i P_{t,i} R_{t,i}$
7 **fin**
8 Appliquer la stratégie bandit à R_t : $R_{t,B} = P_t^{\top} R_t$
9 **pour** $a \in S_t$ **faire**
10 Mettre à jour la politique π avec $r_{t,a} = r_{t-1,a} + R_{t,B}$
11 **si** $a \in P_t$ **alors**
12 Mettre à jour la politique π avec $r_{t,a} = r_{t,a} + R_{t,SB_a}$
13 **fin**
14 **fin**

4.1 Jeux de données

Nous évaluons notre approche sur cinq jeux de données issus d'applications réelles (cf. Tableau 1) :

— **Covertype** [4] ainsi que **Poker Hand** [5] offrent un nombre important de contextes utilisateur et permettent ainsi de passer à l'échelle ;

4. https ://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/covertype
5. https ://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Poker+Hand
6. https ://www.kaggle.com/assopavic/recommendation-system-for-angers-smart-city
7. https ://www.kaggle.com/vikashrajluhaniwal/jester-17m-jokes-ratings-dataset
8. https ://grouplens.org/datasets/movielens/100k/

©AfIA 2020

Jeu de données	Instances	Bras	Variables contextuelles
Covertype [4]	581 012	7	54
Poker [5]	1 025 010	10	10
RS-ASM [6]	2 152	18	50
Jester [7]	59 132	150	0
MovieLens [8]	942	1682	23

Tableau 1 – Jeux de données employés dans nos expérimentations

— **RS-ASM** [6] est un jeu de données pour la recommandation de services dans la ville intelligente [12] ;
— **Jester** [7] est un jeu de données pour la recommandation de blague où aucune information de contexte n'est disponible ;
— **MoviesLens** [8] est un jeu de données spécifique pour la recommandation de films.

Jester et **MoviesLens** représentent les cas où le nombre de bras disponibles est important et où le retour utilisateur est exprimé sous la forme d'un score allant de 0 à 5. Pour cette expérience, nous définissons un seuil $s = 4$ où $R_{t,a} = 1$ si le score est supérieur ou égal à s, 0 sinon.

4.2 Algorithmes

La méthode évaluée porte sur la prise en compte du retour utilisateur. Ainsi, elle fonctionne indépendamment de la politique π suivie par l'agent c.-à-d., indépendamment de l'algorithme de *COM-MAB* / *COM-CMAB* employé. Nous mettons en oeuvre l'algorithme 1 avec plusieurs algorithmes à tirages simples connus de la littérature avant de les évaluer en termes de précision globale et d'itération de convergence.
Ainsi, dans cet article et à la lumière des précédentes évaluations effectuées dans la littérature sur les bandits-combinatoires [9, 17, 8], nous considérons les algorithmes suivants :

— **MAB** : *ε-greedy* [21] avec $\varepsilon = 0.0009$, *Thompson Sampling (TS)* [1], *UCB* [3] et *UCB2* [4] ;
— **CMAB** : *LinUCB* [15] et *LinTS* [2].

4.3 Protocole expérimental

Au cours de nos expériences et pour chaque algorithme, afin de simuler un flux de données d'utilisateurs se présentant dans un contexte donné pour recevoir une recommandation (voir ligne 2 de l'algorithme 1), une sélection aléatoire est réalisée séquentiellement parmi les contextes disponibles dans l'ensemble du jeu de données jusqu'à un horizon fixe $T = 10000$. L'itération de convergence t_c considérée dans cet article correspond à la première itération *t* à partir de laquelle la précision globale demeure équivalente à la précision globale finale $Acc(T)$ (voir calcul à la Sous-Section 2.1), à $\delta = 1\%$ près :

$\forall t \geq t_c$:

$$Acc(T) - \delta \leq Acc(t) \leq Acc(T) + \delta, \text{ avec } \delta = 0.01$$

Algorithme	**Stratégie**	$Acc(T)$	t_c
ε-greedy	Bandit	$0,833 \pm 0,002$	1461 ± 1746
	Semi-Bandit	$0,859 \pm 0,004$	840 ± 912
	P-BSB-RE	$0,840 \pm 0,005$	2476 ± 1359
	P-BSB-OE	$0,836 \pm 0,004$	411 ± 265
	P-BSB-RD	$0,838 \pm 0,002$	1288 ± 1113
TS	Bandit	$0,825 \pm 0,002$	928 ± 1472
	Semi-Bandit	$0,857 \pm 0,003$	1938 ± 1511
	P-BSB-RE	$0,845 \pm 0,004$	1206 ± 1211
	P-BSB-OE	$0,837 \pm 0,003$	545 ± 541
	P-BSB-RD	$0,839 \pm 0,007$	1079 ± 1396
UCB	Bandit	$0,832 \pm 0,005$	1171 ± 1304
	Semi-Bandit	$0,842 \pm 0,002$	4163 ± 1512
	P-BSB-RE	$0,830 \pm 0,004$	1530 ± 1566
	P-BSB-OE	$0,823 \pm 0,004$	774 ± 905
	P-BSB-RD	$0,826 \pm 0,002$	1580 ± 1542
UCB2	Bandit	$0,796 \pm 0,002$	948 ± 1041
	Semi-Bandit	$0,796 \pm 0,002$	886 ± 950
	P-BSB-RE	$0,790 \pm 0,002$	1554 ± 1611
	P-BSB-OE	$0,801 \pm 0,003$	889 ± 1213
	P-BSB-RD	$0,792 \pm 0,001$	1734 ± 2235

Tableau 2 – Résultats pour une application non-contextuelle avec $k = 10$ sur le jeu de données **Jester**.

Chacun des algorithmes *COM-MAB / COM-CMAB* est employé sur les cinq jeux de données pour réaliser des recommandations de 3 éléments ($k = 3$). Ces expériences sont réalisées en employant successivement les stratégies de considération du retour utilisateur **bandit**, **semi-bandit**, **RE**, **OE** et **RD**, afin de permettre une comparaison des approches.
Lorsque l'une des variantes de **P-BSB** est appliquée, la "patience" ψ_t de l'usager est simulée par une variable aléatoire comprise entre 0 et *k*, générée à chaque itération.
Le même procédé est employé pour effectuer des recommandations à 10 éléments ($k = 10$), en faisant varier ψ_t entre 0 et 4, sur les jeux de données **Jester** et **MoviesLens**, disposant d'un nombre de bras important, afin d'expérimenter des situations où $\psi_t \ll k \ll m$.
Ainsi, pour chacun des différents cas et pour chaque approche, 10 expériences de 10 000 itérations sont simulées.
Les tableaux 2 et 3 présentent les moyennes et écarts-type obtenus pour les critères de précision globale et d'itération de convergence dans les expérimentations où $k = 10$ avec $0 \leq \psi_t \leq 4$. Ce cas est particulièrement intéressant dans la mesure où le nombre de bras pour lesquels l'agent ne pourra pas observer de récompense à l'itération *t* est plus important, l'expérience est donc plus représentative des résultats pouvant être attendus pour l'application visée à terme.
À la sous-section suivante nous nous focaliserons sur l'interprétation et l'analyse de ces résultats et indiquerons si les tendances observées sont vérifiées au travers de nos autres expérimentations.

4.4 Analyse des résultats

Afin d'observer l'impact d'une approche dans l'apprentissage d'un agent dans un cadre applicatif spécifique indépendamment de l'algorithme *COM-MAB / COM-CMAB*

Algorithme	Stratégie	$Acc(T)$	t_c
LinTS	Bandit	$0,996 \pm 0,001$	330 ± 253
	Semi-Bandit	$0,995 \pm 0,001$	732 ± 472
	P-BSB-RE	$0,989 \pm 0,001$	627 ± 505
	P-BSB-OE	$0,986 \pm 0,001$	391 ± 417
	P-BSB-RD	$0,989 \pm 0,001$	491 ± 330
LinUCB	Bandit	$0,994 \pm 0,001$	944 ± 513
	Semi-Bandit	$0,992 \pm 0,001$	1582 ± 596
	P-BSB-RE	$0,982 \pm 0,001$	1034 ± 541
	P-BSB-OE	$0,979 \pm 0,001$	644 ± 399
	P-BSB-RD	$0,982 \pm 0,002$	1028 ± 662

Tableau 3 – Résultats pour une application contextuelle avec $k = 10$ sur le jeu de données **MoviesLens**.

choisi, nous considérons la moyenne des résultats obtenus par les algorithmes employés. Ainsi, les approches sont comparées à partir des résultats obtenus avec l'équation suivante :

$$\forall \pi \in \Pi : M_\phi = \sum_{\pi=1}^{|\Pi|} \frac{Acc_\phi^\pi(T)}{|\Pi|} \quad (4)$$

Ce procédé est également exploité pour les comparaisons d'itération de convergence : il suffit de remplacer les valeurs $Acc(T)$ par les valeurs correspondantes des colonnes t_c des tableaux de résultats 2 et 3.

4.4.1 Observations spécifiques - Jester et MoviesLens

Le tableau 4 présente les résultats de précision globale - $Acc(T)$ - et d'itération de convergence - t_c - observés en moyenne (selon l'équation 4) pour chacune des approches considérées sur les jeux de données Jester et MoviesLens :

	Jester		**MovieLens**	
Stratégie	$Acc(T)$	t_c	$Acc(T)$	t_c
Bandit	$0,822$	1127	$0,995$	637
Semi-Bandit	$0,839$	1957	$0,994$	1157
P-BSB-RE	$0,826$	1692	$0,986$	831
P-BSB-OE	$0,824$	655	$0,983$	517
P-BSB-RD	$0,824$	1420	$0,986$	759

Tableau 4 – Résultats observés en moyenne pour les approches considérées sur **Jester** et **MoviesLens**.

4.4.2 Tests statistiques

Nous réalisons en premier lieu des tests de *Kruskal-Wallis (KW)* afin de metre en évidence les inégalités entre les résultats obtenus par chacun des algorithmes, c.-à-.d., nous testons l'hypothèse nulle H_0 : « Il n'y a pas de différence significative entre les résultats des différentes approches (médianes) ». Si le test de *KW* indique qu'il existe des différences entre les résultats, il sera alors nécessaire de réaliser des tests de *Rang signés de Wilcoxon (RW)* deux à deux sur la précision globale et l'itération de convergence, c.-à-.d., nous testons l'hypothèse nulle H_0 : « Il n'y a pas de différence significative entre les résultats entre chaque paire d'approches appliquées à chaque algorithme ». Par la suite, nous indiquerons donc : si l'hypothèse nulle est rejetée ou non, et la valeur de *p* correspondante pour chaque comparaison que nous observerons.

4.4.3 Analyse des résultats

Itération de convergence : Même si nous observons un léger avantage à employer l'approche **P-BSB-OE**, cela reste en revanche statistiquement non significatif (Tests *KW* : $p > 0.05$) pour les cas contextuels comme non contextuels.

Précision globale : Les tests de *KW* nous indiquent qu'il existe une différence significative entre les mesures de précision globale obtenues par l'application de chacune des 5 approches considérées au travers d'un même algorithme, et cela pour chacun des algorithmes appliqués dans les cas contextuels comme non contextuels ($p < 0.01$). Dans le cas non-contextuel, les trois déclinaisons de **P-BSB** obtiennent une précision globale significativement supérieure à l'approche **bandit** (Tests *RW* : $p < 0.01$) et l'approche **Semi-Bandit** obtient une précision globale significativement supérieure aux autres approches (Tests *RW* : $p < 0.01$). Les approches **P-BSB-RD** et **P-BSB-OE** obtiennent des résultats équivalents et les tests de *RW* indiquent qu'ils ne présentent pas de différences significatives (Tests *RW* : $p > 0.05$). Dans le cas contextuel, l'approche **bandit** obtient une précision globale significativement supérieure aux autres approches (Tests *RW* : $p < 0.01$). L'approche **P-BSB-RE** obtient une précision globale non significativement supérieure à l'approche **P-BSB-RD** (Tests *RW* : $p > 0.05$). L'approche **P-BSB-RE** quant à elle obtient des résultats significativement supérieurs à l'approche **P-BSB-OE** (Tests *RW* : $p < 0.01$).

Observations : Ces résultats sont obtenus alors que dans les meilleurs cas, c-à-d lors des itérations ou ψ_t prend sa valeur maximale : 4, **P-BSB** n'emploie que 40% des retours utilisateurs considérés par les stratégies **bandit** et **semi-bandit** et que dans les pires cas, c-à-d lors des itérations ou ψ_t prend sa valeur minimale : 0, aucun retour utilisateur n'est exploitable pour l'apprentissage de l'agent. Nos résultats sur les jeux de données **RS-ASM**, **Poker Hand** et **Covertype** avec les algorithmes *COMMAB* confirment les tendances observées lorsque la part de récompenses non observée est moins importante ($k = 3$ et $0 \leq \psi_t \leq 3$) et nous permettent de confirmer l'adéquation de notre approche dans ce type d'application.

Conclusion : À la vue des résultats expérimentaux, l'objectif applicatif visé par notre approche - acquérir une précision globale proche de celles obtenues avec les approches classiques malgré un nombre de retours utilisateur restreint, voire inexistant à certaines itérations - est atteint par les variantes de **P-BSB** proposées.

5 Conclusions et Perspectives

Notre objectif final est d'intégrer un système de recommandations guidé par les besoins utilisateurs en environnement marin où un vecteur complet de récompenses R_t serait difficile à observer.

Ainsi, dans cet article, nous avons proposé et appliqué une approche combinatoire à plusieurs algorithmes de bandits-

©AfIA 2020

manchots à tirages simples issus de la littérature. Nous les avons évalués en termes de précision globale et d'itération de convergence sur plusieurs jeux de données du monde réel. Les résultats que nous avons obtenus sont en faveur d'une utilisation de l'approche combinatoire pour les systèmes de recommandation à choix multiples.

La principale contribution de cet article porte sur la mise au point et l'expérimentation d'une nouvelle méthode de prise en compte du retour utilisateur : **P-BSB**. Cette approche propose trois variantes : 1) **RE** qui observe les récompenses associées aux ψ_t bras de S_t de plus haute espérance de récompense ; 2) **OE** qui consulte les récompenses des bras de S_t ayant été le moins observés à l'itération t ; 3) **RD** qui emploie une sélection aléatoire de ψ_t bras parmi S_t. Dans les cadres contextuels comme non contextuels, l'approche partielle combinant les stratégies bandit et semi-bandit offre des performances proches des approches classiques, malgré un nombre restreint de retours utilisateur.

L'acquisition et la valorisation du retour utilisateur constitue un défi majeur dans le domaine de l'apprentissage automatisé et les résultats obtenus par *P-BSB* encouragent des perspectives d'une mise en application réelle pour un apprentissage en ligne. À ce titre, l'une des perspectives imminentes que nous envisageons est d'étudier une approche complémentaire où la stratégie de prise en compte du retour utilisateur serait déterminée dynamiquement par l'agent à chaque itération.

Remerciements

Ces travaux ont été menés par l'entreprise KARA TECHNOLOGY en collaboration avec les laboratoires du LERIA et ESEO-TECH et avec le soutien de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT).

Références

[1] Shipra Agrawal and Navin Goyal. Analysis of thompson sampling for the multi-armed bandit problem. In *COLT*, pages 39–1, 2012.

[2] Shipra Agrawal and Navin Goyal. Thompson sampling for contextual bandits with linear payoffs. In *ICML*, pages 127–135, 2013.

[3] Peter Auer. Using confidence bounds for exploitation-exploration trade-offs. *JMLR*, pages 397–422, 2002.

[4] Peter Auer, Nicolo Cesa-Bianchi, and Paul Fischer. Finite-time analysis of the multiarmed bandit problem. *Machine learning*, 47(2-3) :235–256, 2002.

[5] Peter Auer, Nicolo Cesa-Bianchi, Yoav Freund, and Robert E Schapire. The nonstochastic multiarmed bandit problem. *SICOMP*, 32(1) :48–77, 2002.

[6] Djallel Bouneffouf and Irina Rish. A survey on practical applications of multi-armed and contextual bandits. *ARXIV*, abs/1904.10040, 2019.

[7] Fondation Bénéteau. Les attentes des futurs plaisanciers. *Rapport FIN*, 2014.

[8] Lixing Chen, Jie Xu, and Zhuo Lu. Contextual combinatorial multi-armed bandits with volatile arms and submodular reward. In *NIPS*, pages 3247–3256. Curran Associates, Inc., 2018.

[9] Wei Chen, Yajun Wang, and Yang Yuan. Combinatorial multi-armed bandit : General framework and applications. In *ICML*, volume 28 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 151–159, Atlanta, Georgia, USA, 17–19 Jun 2013. PMLR.

[10] Richard Combes, Mohammad Sadegh Talebi Mazraeh Shahi, Alexandre Proutiere, and Marc Lelarge. Combinatorial bandits revisited. In *NIPS*, pages 2116–2124. Curran Associates, Inc., 2015.

[11] James A. Grant, David S. Leslie, Kevin Glazebrook, and Roberto Szechtman. Combinatorial multi-armed bandits with filtered feedback. *ARXIV*, 2017.

[12] Nicolas Gutowski. *Context-aware recommendation systems for cultural events recommendation in Smart Cities*. Theses, Université d'Angers, November 2019.

[13] Shinji Ito, Daisuke Hatano, Hanna Sumita, Kei Takemura, Takuro Fukunaga, Naonori Kakimura, and Ken-Ichi Kawarabayashi. Improved regret bounds for bandit combinatorial optimization. In *NIPS*, pages 12027–12036. Curran Associates, Inc., 2019.

[14] Luc Jaulin, Fabrice Bars, Benoit Clement, Yvon Gallou, Olivier Menage, Olivier Reynet, Jan Sliwka, and Benoit Zerr. Suivi de route pour un robot voilier. *CIFA*, 07 2012.

[15] Lihong Li, Wei Chu, John Langford, and Robert E Schapire. A contextual-bandit approach to personalized news article recommendation. In *WWW*, pages 661–670. ACM, 2010.

[16] Shuai Li, Baoxiang Wang, Shengyu Zhang, and Wei Chen. Contextual combinatorial cascading bandits. In *ICML*, volume 48 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 1245–1253, New York, New York, USA, 20–22 Jun 2016. PMLR.

[17] Jonathan Louedec. *Bandit strategies for recommender systems*. Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III, November 2016.

[18] Alexander Luedtke, Emilie Kaufmann, and Antoine Chambaz. Asymptotically optimal algorithms for multiple play bandits with partial feedback. *ARXIV*, 06 2016.

[19] H. Robbins. Some aspects of the sequential design of experiments. *Bull. of the AMS*, pages 527–535, 1952.

[20] Karthik Abinav Sankararaman. Semi-bandit feedback : A survey of results. , 2016.

[21] Richard S. Sutton and Andrew G. Barto. *Reinforcement learning : An introduction*, volume 1. MIT press Cambridge, 1998.

[22] M. van Aartrijk, C. Tagliola, and P. Adriaans. Ai on the ocean : the robosail project. *ECAI*, pages 653–657, 2002.

An incomplete knowledge compilation map for conditional preference statements-based languages

Jérôme Mengin
IRIT - Université de Toulouse 3 - France

Jerome.Mengin@irit.fr

Résumé

Les assertions de préférences conditionnelles (CP-statements) permettent de représenter de manière compacte les préférences sur des domaines combinatoires. Elles sont au cœur des CP-nets et de leurs généralisations, et des arbres de préférences lexicographiques. Plusieurs travaux ont abordé la complexité de certaines requêtes liées à ces formalismes (optimisation, dominance en particulier). Cet article étend certains de ces résultats, et s'intéresse à d'autres requêtes (comme l'équivalence), contribuant ainsi à une carte de compilation pour les langages basés sur ces assertions.

Abstract

Conditional preference statements have been used to compactly represent preferences over combinatorial domains. They are at the core of CP-nets and their generalizations, and lexicographic preference trees. Several works have addressed the complexity of some queries. We extend in this paper some of these results, and study other queries which have not been addressed so far, like equivalence, thereby contributing to a knowledge compilation map for languages based on these statements.

1 Introduction

Preference handling is a key component in several areas of Artificial Intelligence, notably for decision-aid systems. Research in Artificial Intelligence has led to the development of several languages that enable compact representation of preferences over complex, combinatorial domains. Some preference models rank alternatives according to their values given by some multivariate function; this is the case for instance with valued constraints [24], additive utilities and their generalizations [22, 9]. Ordinal models like CP nets and their generalisations [4, 27, 7], or lexicographic preferences and their generalisations [25, 28, 3, 10, 17] use sets of conditional preference statements to represent a pre-order over the set of alternatives.

Many problems of interest, like comparing alternatives or finding optimal alternatives, are at least NP-hard for some of these models, which makes these representations difficult to use in some decision-aid systems like configurators, where real-time interaction with a decision maker is needed. One approach to tackle this problem is Knowledge Compilation, whereby a model, or a part of it, is *compiled*, off-line, into another representation which enables fast query answering, even if the compiled representation has a much bigger size. This approach has first been studied in propositional logic: [13, 14] compare how various subsets of propositional logic can succinctly, or not, express some propositional knowledge bases, and the complexity of queries of interest. [12] follow a similar approach to compare extensions of propositional logic which associate real values to models of a knowledge base; [18] provide such a map for value function-based models.

The aim of this paper is to initiate such a compilation map for ordinal models of preferences. We compare the expressiveness and succinctness of various languages based on conditional preference statements, and the complexity of several queries of interest for these languages.

The next section recalls some basic definitions about combinatorial domains and pre-orders, and introduces notations that will be used throughout. Section 3 gives an overview of various languages based on conditional preference statements that have been studied in the literature. Section 4 and 5 respectively study expressiveness and succinctness for languages based on conditional preference statements . Sections 6 study the complexity of queries for these languages. Proofs are omitted due to lack of space.

2 Preliminaries

2.1 Combinatorial domain

We consider languages that can be used to represent the preferences of a decision maker over a combinatorial space $\underline{\mathcal{X}}$: here $\mathcal{X}$ is a set of attributes that characterise the possible alternatives, each attribute $X \in \mathcal{X}$ having a finite set of possible values $\underline{X}$; then $\underline{\mathcal{X}}$ denotes the cartesian product of the domains of the attributes in $\mathcal{X}$, its elements are called alternatives. For binary attribute X, we will often denote by $x, \bar{x}$ its two possible values.

For a subset U of $\mathcal{X}$, we will denote by $\underline{U}$ the cartesian product of the domains of the attributes in U, called instantiations of U, or partial instantiations (of $\mathcal{X}$). If v is an instantiation of some $V \subseteq \mathcal{X}$, $v[U]$ denotes the restriction of v to the attributes in $V \cap U$; we say that instantiation $u \in \underline{U}$ and v are compatible if $v[U \cap V] = u[U \cap V]$; if $U \subseteq V$ and $v[U] = u$, we say that v extends u.

Sets of partial instantiations can often be conveniently,

©AfIA 2020

and compactly, specified with propositional formulas: the propositions are $X = x$ for every $X \in \mathcal{X}$ and $x \in \underline{X}$, and we use the standard connectives $\wedge$ (conjunction), $\vee$ (disjunction), and $\neg$ (negation). Implicitly, this propositional logic is equipped with a theory that enforces that every attribute has precisely one value from its domain; so, for two distinct values x, x' of attribute X, the formula $X = x \wedge X = x'$ is a contradiction; also, the interpretations are thus in one-to-one correspondence with $\underline{\mathcal{X}}$. If α is such a propositional formula over $\mathcal{X}$ and $o \in \underline{\mathcal{X}}$, we will write $o \models \alpha$ when o satisfies α, that is when, assigning to every literal $X = x$ that appears in α the value true if $o[X] = x$, and the value false otherwise, makes α true.

We assume that the domains of the attributes in $\mathcal{X}$ are disjoint, so that, given a formula α, or a partial instantiation u, we can unambiguously define $\mathsf{Var}(\alpha)$ and $\mathsf{Var}(u)$ as the set of variables, the values of which appear in α and u. When it is not ambiguous, we will use x as a shorthand for the literal $X = x$; also, for a conjunction of such literals, we will omit the $\wedge$ symbol, thus $X = x \wedge Y = \bar{y}$ for instance will be denoted $x\bar{y}$.

2.2 Preference relations

2.2.1 Preorders

Depending on the knowledge that we have about a decision maker's preferences, given any pair of distinct alternatives $o, o' \in \underline{\mathcal{X}}$, one of the following situations must hold: one may be strictly preferred over the other, or o and o' may be equally preferred, or o and o' may be incomparable.

Assuming that preferences are transitive, such a state of knowledge about the DM's preferences can be characterised by a preorder $\succeq$ over $\underline{\mathcal{X}}$: $\succeq$ is a binary, reflexive and transitive relation; for alternatives o, o', we then write $o \succeq o'$ when $(o, o') \in \succeq$; $o \succ o'$ when $(o, o') \in \succeq$ and $(o', o) \notin \succeq$; $o \sim o'$ when $(o, o') \in \succeq$ and $(o', o) \in \succeq$; $o \bowtie o'$ when $(o, o') \notin \succeq$ and $(o', o) \notin \succeq$. Note that for any pair of alternatives $o, o' \in \underline{\mathcal{X}}$ either $o \succ o'$, or $o' \succ o$, or $o \sim o'$ or $o \bowtie o'$. The relation $\sim$ defined in this way is the *symmetric part* of $\succeq$, it is reflexive and transitive, $\bowtie$ is irreflexive, they are both symmetric. The relation $\succ$ is the *irreflexive part* of $\succeq$, it is what is usually called a strict partial order: it is irreflexive and transitive.

Terminology and notations We say that alternative o *dominates* alternative o' (w.r.t. $\succeq$) if and only if $o \succeq o'$; if $o \succ o'$, then we say that o *strictly dominates* o'. We use standard notations for the complements of $\succ$ and $\succeq$: we write $o \not\succeq o'$ when it is not the case that $o \succeq o'$, and $o \not\succ o'$ when it is not the case that $o \succ$. We will denote by $\preceq$ (respectively $\prec$) the dual of $\succeq$ (resp. of $\succ$), also called its converse or transpose: $o \preceq o'$ if and only if $o' \succeq o$, and $o \prec o'$ iff $o' \succ o$. Note that since $\bowtie$ and $\sim$ are symmetric, they are equal to their dual.

Following [21] we say that alternative o is undominated (respectively weakly undominated) if there is no $o' \in \underline{\mathcal{X}}$, $o' \neq o$, such that $o' \succeq_\varphi o$ (resp. $o' \succ o$); we say that o is dominating (respectively strongly dominating) if for every $o' \in \underline{\mathcal{X}}$, $o \succeq_\varphi o'$ (resp. $o' \neq o$ implies $o \succ_\varphi o'$). Note that o is strongly dominating if and only if it is dominating and undominated; and that if o is dominating or undominated, then it is weakly undominated.

3 Languages

3.1 Conditional preference statements

Let us call *conditional preference statement*, or CP statements, over $\mathcal{X}$ any expression of the form $\alpha \,|\, V : w \geq w'$, where α is a propositional formula over $U \subseteq \mathcal{X}$, $w, w' \in \underline{W}$, $w \neq w'$, and U, V, W are disjoint subsets of $\mathcal{X}$. Informally, such a statement represents the piece of knowledge that, when comparing alternatives o, o' that both satisfy α, the one that has values w for W is preferred to the one that has values w' for W, irrespective of the values of the attributes in V, every other attribute being fixed. We call α the conditioning part of the statement; we call W the swapped attributes, and V the free part.

Conditional preference statements have been studied in many works, under various language restrictions that we will make explicit in the sequel. They are the basis for CP-nets [6, 4] and their extensions, and have been studied in a more logic-based fashion by e.g. [21] and [27, 26, 29]. [1]

The semantics of a set φ of conditional preference statements can be defined as follows: consider a pair of alternatives (o, o') such that there is a statement $\alpha \,|\, V : w \geq w' \in \varphi$ with $o[U] = o'[U] \models \alpha$, $o[W] = w$ and $o'[W] = w'$, and such that for every attribute $Y \notin U \cup V \cup W$ it holds that $o[Y] = o'[Y]$; following [29] we say that (o, o') is a *worsening swap*. We also say that the statement $\alpha \,|\, V : w \geq w' \in \varphi$ *sanctions* (o, o'). Let φ^* be the set of all worsening swaps that φ sanctions, and define $\succeq_\varphi$ to be the reflexive and transitive closure of φ^*. [29] proves that $o \succeq_\varphi o'$ if and only $o = o'$ or φ^* contains a finite sequence of worsening swaps $(o_i, o_{i+1})_{0 \leq i \leq k-1}$ with $o_0 = o$ and $o_k = o'$.[2]

The language of the above statements is very expressive: in fact, by considering a set $W = \mathcal{X}$, and $\alpha = \top$ and $V = \emptyset$, it is possible to represent any preorder "in extension" with preference statements of the form $o \geq o'$. Let us call:

- CP the language where formulas are sets of statements of the general form $\alpha \,|\, V : w \geq w'$;

Note that formulas in CP are not required to verify any form of consistency or completeness; such conditions, as well other restrictions, will be imposed for some sublanguages defined below. Table 1 gives an overview of these restrictions, as well as some complexity results that will be detailed in section 6.

Although the original definition of CP-nets by [6] does not impose it, many works on CP-nets, especially following [4], consider that they are intended to represent a strict partial order, that is, that $\succeq_\varphi$ should be antisymmetric; equivalently, this means that φ^* can be extended to a linear order.

[1] The formula $u \,|\, V : x \geq x'$ is written $u : x > x'[V]$ by [29].

[2] Actually, [29] proves that (o, o') is in the transitive closure of φ^* if and only there is such a worsening sequence from o to o', but adding the reflexive closure to this transitive closure does not change the result, since we can add any pair (o, o) to, or remove it from, any sequence of worsening swaps without changing the validity of the sequence.

We say that a set φ of CP-statements is *linearisable* if φ^* can be extended to a linear order;[3]

Notations We write $\alpha : w \geq w'$ when V is empty, and $w \geq w'$ when V is empty and $\alpha = \top$, the formula always true. Note that we reserve the symbol $\geq$ for conditional preference statements, whereas "curly" symbols $\succ$, $\not\succ$, $\succeq$, $\not\succeq$ are used to represent relations over the set of alternatives.

3.2 Statement-wise restrictions

Some restrictions apply on the syntactical form of statements allowed; they bear on the size of the set of free variables, or on the size of the set of swapped variables, or on the type of conditioning formulas allowed. Given some language $\mathcal{L} \subseteq \mathsf{CP}$, we define the following restrictions:

- $\mathcal{L}\not\triangleright$ is the restriction of $\mathcal{L}$ to formulas with empty free parts ($V = \emptyset$) for every statement;[4]
- $\mathcal{L}\wedge$ is the restriction of $\mathcal{L}$ to formulas where the condition α of every statement is a conjunction of literals;
- $\mathcal{L}\mathsf{k}$ is the restriction of $\mathcal{L}$ to formulas where the set of swapped attributes contains no more than k attributes ($|W| \leq k$) for every statement; in particular, we call elements of $\mathsf{CP1}$ *unary* statements.

In particular, $\mathsf{CP1}\wedge$ corresponds to the language studied by [29], and $\mathsf{CP1}\not\triangleright$ to generalized CP-nets [21].

3.3 Graphical restrictions

CP-statements describe some interactions between attributes. Many tractability results on CP-statements based languages require that the graph of these interactions has some "good" properties. In their seminal work, [4] consider that these interaction can be elicited first from a decision-maker, and that this structure can be used to render easier the elicitation of $\mathsf{CP1}$ statements that represent her preferences. However, these interactions can also be extracted *a posteriori*, for any set of CP statements.

The graph defined by [4] is restricted to the case where all CP statements are unary and have no free variables. This definition has been extended by [7, 29] to cover the case of statements with free variables. The following definition is inspired by [29, Def. 15]. Given $\varphi \in \mathsf{CP}$ over set of attributes $\mathcal{X}$, we define the following graphs with sets of vertices $\mathcal{X}$: given $X, Y \in \mathcal{X}$

- $(X,Y) \in D_\varphi^{\mathsf{uncond}}$ if there is $\alpha\,|\,V : w \geq w' \in \varphi$ such that $X \in \mathsf{Var}(\alpha)$ and $Y \in \mathsf{Var}(w) \cup V$;
- for every o, $(X,Y) \in D_\varphi^{\mathsf{cond}}(o)$ if there$\alpha\,|\,V : w \geq w' \in \varphi$ s.t. $o \models \alpha$, $X \in \mathsf{Var}(w)$, $Y \in V$;
- $D_\varphi = D_\varphi^{\mathsf{uncond}} \cup \bigcup_{o \in \underline{\mathcal{X}}} D_\varphi^{\mathsf{cond}}(o)$.

Given some language $\mathcal{L} \subseteq \mathsf{CP}$, we define:

- $\mathcal{L}\not\circlearrowleft$ the restriction of $\mathcal{L}$ to *acyclic* formulas, which are those φ such that D_φ is acyclic;[5];
- $\mathcal{L}\not\circlearrowleft^{\mathsf{cuc}}$ the restriction of $\mathcal{L}$ to cuc-acyclic formulas, which are those φ such that for every alternative o, $D_\varphi^{\mathsf{uncond}} \cup D_\varphi^{\mathsf{cond}}(o)$ is acyclic.[6]

Note that D_φ can be computed in polynomial time. Moreover, in the case of $\mathsf{CP1}\not\triangleright$, the $D_\varphi^{\mathsf{cond}}(o)$'s are all empty, so cuc-acyclicity reduces to D_φ being acyclic, and D_φ is the set of all (X,Y) such φ contains some statement $u : y > y'$ with $X \in \mathsf{Var}(u)$ – which is the definition used by [4].

In the more general case of $\mathsf{CP1}$, checking cuc-acyclicity can be hard [7, Th. 3], [29, Prop. 24].

3.4 Attribute-wise restrictions

It is possible, especially with $\mathsf{CP1}$ statements, to consider restrictions that guarantee some form of completeness and consistency on the conditions that sanction swaps on a given variable X. In other words, the idea is that for every pair of alternatives $o, o' \in \underline{\mathcal{X}}$ such that o and o' are equal except for their value for one attribute, there must be exactly one statement in a CP-net that orders o and o'. These conditions are implicit in CP-nets defined by [4], and have been formally defined by [21] in a slightly more restrictive context (binary attributes) and, in part, by [29].

Definition 1 (Local completeness and local consistency [21, 29]). Let $\varphi \in \mathsf{CP1}$. For every attribute $X \in \mathcal{X}$ and every partial instantiation u, define $\geq_\varphi^{X,u}$ to be the reflexive and transitive closure of the set of all pairs $(x,x') \in \underline{\mathcal{X}}^2$ such that there exists some $\alpha\,|\,V : x \geq x' \in \varphi$ with $u \models \alpha$; then φ is *locally consistent* if $\geq_\varphi^{X,o}$ is antisymmetric for every attribute $X \in \mathcal{X}$ and every alternative $o \in \underline{\mathcal{X}}$; and φ is *locally complete* if $\geq_\varphi^{X,o}$ is a total preorder for every attribute X and every alternative $o \in \underline{\mathcal{X}}$.

Given some language $\mathcal{L} \subseteq \mathsf{CP}$, we define:

- $\mathcal{L}\not\perp^{\mathsf{loc}}$ is the restriction of $\mathcal{L}$ to those formulas that are locally consistent;
- $\mathcal{L}\top^{\mathsf{loc}}$ is the restriction of $\mathcal{L}$ to those formulas that are locally complete.

Note that the problem of checking if a formula of $\mathsf{CP1}\wedge$ is locally consistent is coNP complete [29, Prop. 11]. Locally complete and locally consistent formulas of $\mathsf{CP1}\not\triangleright$, that is, formulas of $\mathsf{CP1}\not\triangleright\not\perp^{\mathsf{loc}}\top^{\mathsf{loc}}$, are called *CP-nets* by [21]. However, we recall next the original definition of CP-nets, which is slightly different.

Note that, if φ is linearisable, then it is locally consistent.

3.5 CP-nets

In their seminal work, [4] define a CP-net over a set of attributes $\mathcal{X}$ to be composed of two elements:

[3] Such sets of CP-statements are often called *consistent* in the standard terminology on CP-nets, but we prefer to depart from this definition which only makes sense when one asserts that φ should indeed represent a strict partial order.

[4] In the literature, the symbol $\triangleright$ is sometimes used to represent an *importance* relation between attributes; and, as explained by [29], statement $\alpha\,|\,V : w \geq w'$ is a way to express that attributes in $\mathsf{Var}(w)$ have more importance those in V (when α is true).

[5] This is *full acyclicity* in [29].

[6] This definition is weaker than the one given by [29], who also imposes local consistency as will be defined shortly; it corresponds to the definition of *conditional acyclicity* as given by [7].

©AfIA 2020

Properties/Restrictions									
Base language				CPnet		CPnet	CPnet	LPT	LTP
Unary swaps / nodes		1	1	(1)	1	(1)	(1)		1
No free variable		$\not\rhd$	$\not\rhd$	($\not\rhd$)		($\not\rhd$)	($\not\rhd$)		
Condition in conjunctive form		$\wedge$		($\wedge$)	$\wedge$	($\wedge$)	($\wedge$)		
Local consistency			$\not\perp^{\mathsf{loc}}$	($\not\perp^{\mathsf{loc}}$)	$\not\perp^{\mathsf{loc}}$	($\not\perp^{\mathsf{loc}}$)	($\not\perp^{\mathsf{loc}}$)		
Local completeness			$\top^{\mathsf{loc}}$	($\top^{\mathsf{loc}}$)		($\top^{\mathsf{loc}}$)	($\top^{\mathsf{loc}}$)		
Acyclicity					cuc	full	polytree		
Queries									
LINEARISABILITY	✘!	✘!	✘!		$\top$	$\top$	$\top$	$\top$	$\top$
EQUIVALENCE	✘!	✘!		✓	✘!	✓	✓	✓	✓
R-COMPARISON, $R \in \{\succeq, \succ, \bowtie\}$	✘!	✘!	✘!	✘!	✘!	✘!	✓	✓	✓
$\sim$-COMPARISON	✘!	✘!	✘!		✓	✓	✓	✓	✓
2-ORDERING					✓	✓	✓	✓	✓
UNDOMINATED CHECK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
S. DOM., DOM., W. UNDOM. CHECK	✘!	✘!	✘!			✓	✓	✓	✓
S. DOM. $\exists$, DOM. $\exists$	✘!		✘!			$\top$	$\top$	✓	✓
UNDOMINATED $\exists$	✘!	✘!			$\top$	$\top$	$\top$	$\top$	$\top$

Table 1: Language restrictions and complexity of queries: ✓ = indicates that the query can be solved in time polynomial in $|\varphi| + |\mathsf{result}|$; ✘! = no such algorithm unless P= NP, or PSPACE= P; $\top$ = always true for the language.

1. a directed graph over $\mathcal{X}$, which should represent *preferential dependencies* between attributes;[7]
2. a set of conditional preference tables, one for every attribute X: if U is the set of parents of X in the graph, the conditional preference table for X contains exactly $|\underline{U}|$ rules $u:\geq$, for every $u \in \underline{U}$, where the $\geq$'s are linear orders over $\underline{X}$.

Therefore, as shown by [29], CP-nets can be seen as sets of unary CP statements in conjunctive form with no free attribute. Specifically, given a CP-net $\mathcal{N}$ over $\mathcal{X}$, define $\varphi_{\mathcal{N}}$ to be the set of all CP statements $u:x \geq x'$, for every attribute X, every $u \in \mathsf{Pa}(X)$, every $x, x' \in \underline{X}$ such that x are consecutive values in the linear order $\geq$ specified by the rule $u:\geq$ of $\mathcal{N}$. $\mathcal{N}$ being a CP-net enforces a very strong form of local consistency and completeness: it must the case that, for every attribute X with parents U, for every $u \in \underline{U}$, for every $x, x' \in$, the CP-net must explicitly, and uniquely, order ux and ux'.

Thus we call CPnet the language that contains all $\varphi_{\mathcal{N}}$, for every CP-net $\mathcal{N}$. Note that CPnet $\subseteq$ CP1$\not\rhd\wedge$ $\not\perp^{\mathsf{loc}}$ $\top^{\mathsf{loc}}$. [7] define TCP-nets as an extension of CP-nets where it is possible to represent tradeoffs, by stating that, under some condition, some attribute is more important than another one. [29] describes how TCP-nets can be transformed, in polynomial times, into equivalent sets of CP1$\wedge$ statements.

3.6 Lexicographic preference trees

LP-trees generalise lexicographic orders. As an inference mechanism, they are equivalent to search trees used by [5], and formalised by [26, 29]. As a preference representation, and elicitation, language, slightly different definitions for LP-trees have been proposed by [3, 10, 17]. We use here a definition which subsumes the others.

An LP-tree over $\mathcal{X}$ is a rooted tree with labelled nodes and edges, and a set of preference tables; specifically every node N is labelled with a set $W \subseteq \mathcal{X}$; we denote by $\mathsf{Anc}(N)$ the set of attributes that appear in the nodes above N (excluding those at N), and by $\mathsf{NonInst}(N)$ the set of attributes that appear in the nodes above N that have only one child; if N is not a leaf, it can have one child, or $|\underline{W}|$ children; in the latter case, the edges that connect N to its children are labelled with the instantiations in $\underline{W}$; if N has one child only, the edge that connect N to its child is not labelled; a conditional preference table $\mathsf{CPT}(N)$ is associated with N: it contains local preference rules of the form $\alpha:\geq$, where $\geq$ is a preorder over $\underline{W}$, and α is a propositional formula over some attributes in $U \subseteq \mathsf{NonInst}(N)$.

We assume that the rules in $\mathsf{CPT}(N)$ define their preorder in extension. Additionally, two constraints guarantee that an LP-tree φ defines a unique preorder over $\underline{\mathcal{X}}$:

- no attribute can appear at more than one node on any branch of φ; and,
- at every node N of φ, for every $u \in \underline{\mathsf{NonInst}(N)}$, $\mathsf{CPT}(N)$ must contain exactly one rule $\alpha:\geq$ such that $u \models \alpha$.

Given an LP-tree φ and an alternative $o \in \underline{\mathcal{X}}$, there is a unique way to traverse the tree, starting at the root, and along edges that are either not labelled, or labelled with instantiations that agree with o, until a leaf is reached. Now, given two distinct alternatives o, o', it is possible to traverse the tree along the same edges as long as o and o' agree, until a node N is reached which is labelled with some W such that $o[W] \neq o'[W]$: we say that N decides $\{o, o'\}$.

[7] Given some pre-order $\succeq$ over $\mathcal{X}$, attribute X is said to be preferentially dependent on attribute Y if there exist $x, x' \in \underline{X}$, $y, y' \in \underline{Y}$, $z \in \underline{\mathcal{X}\ (\{X, Y\})}$ such that $xyz \succeq_\varphi x'yz$ but $xy'z \not\succeq_\varphi xy'z$.

In order to define $\succeq_\varphi$ for some LP-tree φ, we define φ^* to be the set of all pairs of distinct alternatives (o, o') such that there is a node N that decides $\{o, o'\}$ and the only rule $\alpha : \geq \in \mathsf{CPT}(N)$ with $o[\mathsf{NonInst}(N)] = o'[\mathsf{NonInst}(N)] \models \alpha$ is such that $o[W] \geq o'[W]$. Then $\succeq_\varphi$ is the reflexive closure of φ^*.

Proposition 1 ([2]). *Let φ be an LP-tree over $\mathcal{X}$, then $\succeq_\varphi$ as defined above is a preorder.*

An LP-tree is said to be complete if every attribute appears on every branch, and if every preference rule specifies a linear order; $\succeq_\varphi$ is then a linear order too.
From a semantic point of view, an LP-tree φ is equivalent to the set that contains, for every node N of φ labelled with W , and every rule $\alpha : \geq$ in $\mathsf{CPT}(N)$, all CP statements of the form $\alpha \wedge u \,|\, V : w \geq w'$, where u is the combination of values given to the attributes in $\mathsf{Anc}(N) - \mathsf{NonInst}(N)$ along the edges between the root and N, and $w, w' \in \underline{W}$ such that $w \geq w'$, and $V = [\mathcal{X} - (\mathsf{Anc}(N) \cup W)]$.
We define the following languages:

- LPT is the language of LP-trees as defined above; we consider that $\mathsf{LPT}$is a subset of CP.[8]

LP-trees as defined by [26, 3, 23] are sublanguages of $\mathsf{LPT1}\wedge$; those of [17] and [10] are sublanguages of $\mathsf{LPT}\wedge$.

4 Expressiveness

Definition 2. Let $\mathcal{L}$ and $\mathcal{L}'$ be two languages for representing preorders. We say that:

- $\mathcal{L}'$ is a sublanguage of $\mathcal{L}$ if $\mathcal{L} \supseteq \mathcal{L}'$; it is a proper sublanguage if $\mathcal{L} \supset \mathcal{L}'$, that is, if $\mathcal{L} \supseteq \mathcal{L}'$ and $\mathcal{L}' \not\supseteq \mathcal{L}$;
- $\mathcal{L}$ is *at least as expressive as* $\mathcal{L}'$, written $\mathcal{L} \sqsupseteq \mathcal{L}'$, if every preorder that can be represented with a formula of $\mathcal{L}'$ can also be represented with a formula of $\mathcal{L}$; we write $\mathcal{L} \sqsupset \mathcal{L}'$ if $\mathcal{L} \sqsupseteq \mathcal{L}'$ but $\mathcal{L}' \sqsupseteq \mathcal{L}$ does not hold, and say in this case that $\mathcal{L}$ is strictly more expressive than $\mathcal{L}'$.

Note that $\sqsupseteq$ is a preorder, and obviously $\mathcal{L} \supseteq \mathcal{L}'$ implies $\mathcal{L} \sqsupseteq \mathcal{L}'$, but the converse does not hold in general.
Clearly, $\mathsf{CP}\not\triangleright \subseteq \mathsf{CP}$ and $\mathsf{CP}\wedge \subseteq \mathsf{CP}$; however, these three language have the same expressiveness:

Proposition 2. *CP, CP$\wedge$ and CP$\not\triangleright$ can all three represent every preorder, thus CP $\sqsupseteq$ CP$\not\triangleright$ $\sqsupseteq$ CP$\wedge$ $\sqsupseteq$ CP.*

A large body of works on CP-statements since the seminal paper by [5] concentrate on various subsets of $\mathsf{CP1}$. With this strong restriction on the number of swapped variables, CP-theories have a reduced expressiveness.

Example 1 ($\mathsf{CP1} \not\sqsupseteq \mathsf{CP}$ even if restricted to linear orders). Consider two binary attributes A and B, with respective domains $\{a, \bar{a}\}$ and $\{b, \bar{b}\}$. Define preorder $\succeq$ such that $ab \succ \bar{a}\bar{b} \succ a\bar{b} \succ \bar{a}b$. This can be represented in CP with $\varphi = \{ab \geq \bar{a}\bar{b}, \bar{a}\bar{b} \geq a\bar{b}, a\bar{b} \geq \bar{a}b\}$. But it cannot be represented in $\mathsf{CP1}$: $\{b : a \geq \bar{a}, \bar{b} : \bar{a} \geq a, a : b \geq \bar{b}, \bar{a} : \bar{b} \geq b\}^* \subseteq \varphi^*$, but this is not sufficient to compare $a\bar{b}$ with $\bar{a}b$. The four remaining formulas of $\mathsf{CP1}$ over these two attributes are $B : a \geq \bar{a}$, $B : \bar{a} \geq a$, $A : b \geq \bar{b}$, $A : \bar{b} \geq b$, adding any of them to φ yields a preorder which would not be antisymmetric.

Forbidding free parts incurs an additional loss in expressiveness:

Example 2 ($\mathsf{CP1}\not\triangleright \not\sqsupseteq \mathsf{CP1}$). Consider two binary attributes A and B, with respective domains $\{a, \bar{a}\}$ and $\{b, \bar{b}\}$. Define preorder $\succeq$ such that $ab \succ a\bar{b} \succ \bar{a}b \succ \bar{a}\bar{b}$. This can be represented in $\mathsf{CP1}$ with $\varphi = \{B : a \geq \bar{a}, b \geq \bar{b}\}$. But it cannot be represented in $\mathsf{CP1}\not\triangleright$, and it cannot be obtained by transitivity from the comparisons that can be expressed in $\mathsf{CP1}\not\triangleright$.

However, restricting to conjunctive statements does not incur a loss in expressiveness.

Proposition 3. *CP $\sqsupset$ CP1 $\sqsupset$ CP1$\not\triangleright$, CP1$\wedge$ $\sqsupset$ CP1$\wedge\not\triangleright$, but CP1$\wedge$ $\sqsupseteq$ CP1 and CP1$\wedge\not\triangleright$ $\sqsupseteq$ CP1$\not\triangleright$.*

LP trees Because an LP-tree can be a single node labelled with $\mathcal{X}$, and a single preference rule $\top : \geq$ where $\geq$ can be any preorder, LPT can represent any preorder, but limiting the number of attributes per node reduces expressiveness:

Proposition 4. *LPT $\sqsupseteq$ CP $\supset$ LPT, but LPT $\supset$ LPT$\wedge$ $\sqsupseteq$ LPT, LPT $\sqsupset$ LPTk $\supset$ LPTk$\wedge$ $\sqsupseteq$ LPTk.*

5 Succinctness

Another criterium is the relative sizes of formulas that can represent the same preorder in different languages. An often used definition of succinctness makes it a particular case of expressiveness:

Definition 3 ([20, 14]). Let $\mathcal{L}$ and $\mathcal{L}'$ be two languages for representing preorders. We say that $\mathcal{L}$ is *at least as succinct as* $\mathcal{L}'$, written $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$, if there exists a polynomial p such that for every formula $\varphi' \in \mathcal{L}'$, there exists a formula $\varphi \in \mathcal{L}$ that represent the same preorder as φ' and such that $|\varphi| < p(|\varphi'|)$.

With this definition, if $\mathcal{L}' \subseteq \mathcal{L}$ then $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$; and if $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$ then $\mathcal{L} \sqsupseteq \mathcal{L}'$. In particular, if we have two languages such that $\mathcal{L} \supset \mathcal{L}'$ and $\mathcal{L}' \not\supseteq \mathcal{L}$, then $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$ and $\mathcal{L}' \not\leqq \mathcal{L}$, even if there is no *real* succinctness hierarchy between the two, it is just that one is strictly more expressive than the other. Therefore, we introduce the following definition for strict succinctness, more restrictive than taking the strict partial order induced by $\leqq$.

Definition 4. Let $\mathcal{L}$ and $\mathcal{L}'$ be two languages for representing preorders. We say that $\mathcal{L}$ is *strictly more succinct than* $\mathcal{L}'$, written $\mathcal{L} \ll \mathcal{L}'$, if $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$ and for every polynomial p, there exists $\varphi \in \mathcal{L}$ such that there exists $\varphi' \in \mathcal{L}'$ such that $\succeq_\varphi = \succeq_{\varphi'}$, but for every $\varphi' \in \mathcal{L}'$ such that $\succeq_\varphi = \succeq_{\varphi'}$, $|\varphi'| > p(|\varphi|)$.

With this definition, $\mathcal{L} \ll \mathcal{L}'$ if every formula $\varphi \in \mathcal{L}'$ has an equivalent formula in $\mathcal{L}$ which is "no bigger"[9], and there

[8] Strictly speaking, for $\mathsf{LPT} \subseteq \mathsf{CP}$ to hold, we can add the possibility to augment every formula in CP with a tree structure.

[9] up to some polynomial transformation of the size of φ

©AfIA 2020

is at least one sequence of formulas[10] in $\mathcal{L}$ that have equivalent formulas in $\mathcal{L}'$ but necessarily "exponentially bigger". Note that $\mathcal{L} \ll \mathcal{L}'$ implies that $\mathcal{L} \leqq \mathcal{L}'$ and $\mathcal{L}' \not\leqq \mathcal{L}$.
Restricting the conditioning part of the statements to be conjunctions of literals does induce a loss in succinctness, because propositional logic is strictly more succinct than the language of DNFs.

Example 3. Consider $2n+1$ binary attributes $X_1, X_2, \ldots, X_n, Y_1, Y_2, \ldots, Y_n, Z$, and let φ contain $2n+2$ unary CP-statements with no free attribute: $(x_1 \vee y_1) \wedge (x_2 \vee y_2) \wedge \ldots \wedge (x_n \vee y_n) : z \geq \bar{z}$, $\neg[(x_1 \vee y_1) \wedge (x_2 \vee y_2) \wedge \ldots \wedge (x_n \vee y_n)] : \bar{z} \geq z$ and $\bar{x}_i \geq x_i$ and $\bar{y}_i \geq y_i$ for every $i \in \{1, \ldots, n\}$. Then $\varphi \in \mathsf{CP1}\not\triangleright \not\perp^{\mathsf{loc}} \top^{\mathsf{loc}}$, but φ is not in conjunctive form. A set of conjunctive CP-statements equivalent to φ has to contain all 2^n statements of the form $\mu_1 \mu_2 \ldots \mu_n : z \geq \bar{z}$ with $\mu_i = x_i$ or $\mu_i = x_i$ for every i.

Restricting to CP-nets induces a further loss in succinctness, as the next example shows:

Example 4. Consider $n+1$ binary attributes $X_1, X_2, \ldots, X_n, Y$, and let φ be the $\mathsf{CP1}\not\triangleright\wedge$ formula that contains the following statements: $x_i \geq \bar{x}_i$ for $i = 1, \ldots, n$; $x_1 x_2 \ldots x_n : y \geq \bar{y}$; $\bar{x}_i : \bar{y} \geq y$ for $i = 1, \ldots, n$. The size of φ is linear in n. Because preferences for Y depend on all X_i's, a CP-net equivalent to φ will contain, in the table for Y, 2^n CP statements.

Proposition 5. *For every language such that* $\mathsf{CP1}\not\triangleright \not\perp^{\mathsf{loc}} \top^{\mathsf{loc}} \subseteq \mathcal{L} \subseteq \mathsf{CP}$, $\mathcal{L} \ll \mathsf{CP}\wedge \cap \mathcal{L}$. *Moreover,* $\mathsf{CP1}\not\triangleright\wedge \not\perp^{\mathsf{loc}} \top^{\mathsf{loc}} \ll \mathsf{CP\text{-}net}$.

6 Queries

Linearisability The following query has been addressed in many works on CP statements:[11]

LINEARISABILITY Given φ, is φ linearisable?

[4] prove that when its dependency graph D_φ is acyclic, then a CP-net φ is linearisable. This result has been extended by [15, 7, 29], who give weaker graphical conditions that guarantee that a locally consistent set of unary, conjunctive CP statements, that is, a formula of $\mathsf{CP1}\wedge \not\perp^{\mathsf{loc}}$ is linearisable: specifically, every formula of $\mathsf{CP1}\wedge \not\perp^{\mathsf{loc}} \not\emptyset^{\mathsf{cuc}}$ is linearisable. However, checking these conditions is a hard problem. [21, Theorem 3 and 4] prove that LINEARISABILITY is PSPACE-complete for $\mathsf{CP1}\not\triangleright\wedge$, $\mathsf{CP1}\not\triangleright \not\perp^{\mathsf{loc}} \top^{\mathsf{loc}}$.

Comparing theories We say that two formulas φ and φ' are equivalent if they represent the same preorder, that is, if $\succeq_\varphi$ and $\succeq_{\varphi'}$ are identical; we then write $\varphi \equiv \varphi'$.

EQUIVALENCE Given two formulas φ and φ', are they equivalent?

[10] one formula for every polynomial p
[11] This query is often called *consistency*

Consider a formula $\varphi \in \mathsf{CP}$, two alternatives o, o', and let $\varphi' = \varphi \cup \{o \geq o'\}$: clearly $o \succeq_{\varphi'} o'$, thus $\varphi \equiv \varphi'$ if and only if $o \succeq_\varphi o'$. Therefore, if language $\mathcal{L}$ is such that adding CP statement $o \geq o'$ to any of its formulas yields a formula that is still in $\mathcal{L}$, then EQUIVALENCE has to be at least as hard as $\succeq$-COMPARISON for $\mathcal{L}$. This is the case of CP. The problem remains hard for $\mathsf{CP1}\not\triangleright$, because it is hard to check the equivalence, in propositional logic, of the conditions of statements that entail a particular swap $x \geq x'$. In general, given a propositional language $\mathcal{P}$ we define $\mathcal{P}^\vee$ to be the set of finite disjunctions of formulas in $\mathcal{P}$, and:

- $\mathsf{CP1}\not\triangleright\mathcal{P}$ is $\mathsf{CP1}\not\triangleright$ restricted to those statements such that the condition is in $\mathcal{P}$.

Proposition 6. *Given a propositional language* $\mathcal{P}$ *closed for conjunction,* EQUIVALENCE *for* $\mathcal{P}^\vee$ *(in the sense of propositional logic), restricted to consistent formulas, reduces to* EQUIVALENCE *for* $\mathsf{CP1}\not\triangleright\mathcal{P}$ *restricted to fully acyclic, locally consistent formulas.*

In particular, EQUIVALENCE is NP-hard for $\mathsf{CP1}\not\triangleright\wedge\not\emptyset \not\perp^{\mathsf{loc}}$ restricted to binary attributes, because checking if two propositional, consistent DNFs are equivalent is NP-hard.
However, equivalence is not hard to check for CP-nets, thanks to the existence of a canonical, minimal form: given a CP-net with attributes X and Y such that $X \in \mathsf{Pa}(Y)$, it is easy to check if the preferences that appear in the conditional preference table for Y truly depend on X: if not, the table can be simplified and the edge (X, Y) can be removed. This can be done in polynomial time for all edges (X, Y) of the dependency graph of the CP-net.
For LP-trees too, EQUIVALENCE is easy to check because of the existence of a canonical form: given a node of an LP-tree φ labelled with set of variables S, it is possible to check if it can be split into a "root" node and one or more several children, using an approach like that proposed by [17] for learning an LP-tree from positive examples; this can be done in time polynomial w.r.t. to $|\underline{S}|$, which is itself polynomially bounded by the size of the preference table at S, since we assume that the pre-orders over $\underline{S}$ are given in extension in this table. This procedure can be iterated until no node of the tree can be split. Moreover, if all subtrees of a node are identical, they can be merged into one subtree; applying this in a bottom-up fashion, one obtains the canonical form of the tree; two LP-trees are then equivalent if and only if they have the same canonical form.

Comparing alternatives A basic question, given a formula φ and two alternatives o, o' is: how do o and o' compare, according to φ? Is it the case that $o \succ_\varphi o'$, or $o' \succ_\varphi o$, or $o \bowtie_\varphi o'$, or $o \sim_\varphi o'$? We define the following query, for any relation $R \in \{\succ, \succeq, \sim, \bowtie\}$:

R-COMPARISON Given formula φ, alternatives o, o', is it the case that $o R_\varphi o'$?

For LP-trees, in order to compare alternatives o and o', one only has to traverse the tree from the root downwards until

a node that decides the pair is reached, or up to a leaf if no such node is encountered: in this case o and o' are incomparable. Note that checking if a node decides the pair, and checking if a rule at that nodes applies to order them, can both be done in polynomial time. Thus R-COMPARISON is in P for LPT for every $R \in \{\succ, \succeq, \sim, \bowtie\}$.
The complexity of comparisons has been studied by [4] for CP nets, by [21] for CP1$\not\triangleright$ and by [29] for CP1$\wedge$. [21] propose a simple non-deterministic algorithm to prove membership in PSPACE of $\succeq$-COMPARISON; we rewrite the algorithm here for our more general preference statements:

Algorithm : $\succeq$-comparison. Input: o, o', φ

1. Repeat:
   (a) guess o'', $\alpha \,|\, V : w \geq w' \in \varphi$; $Y \leftarrow \mathcal{X} - (U \cup V \cup W)$;
   (b) if $\alpha \,|\, V : w \geq w' \in \varphi$ sanctions (o, o''): $o \leftarrow o''$;
   until $o'' = o'$.

This algorithm only needs space to store two outcomes at any iteration, and checks sanctioning w.r.t. one rule at every iteration. Repeated applications of this algorithm can answer R-COMPARISON queries for $R \in \{\succ, \sim, \bowtie\}$; for instance, to check if $o \bowtie_\varphi o'$, we check that $o \succeq_\varphi o'$ does not hold and that $o' \succeq_\varphi o$ does not hold either. [12]
Tractability of comparisons, except in some trivial cases, comes at a heavy price in terms of expressiveness: the only positive result for $\succeq$-COMPARISON is about CP-nets when the dependency graph is a polytree [4, Theorem 14]; clearly, this entails a positive results for the other comparison queries for this language.

Proposition 7 (follows from results by [4] and [21])**.** R-COMPARISON *for* $R \in \{\succ, \succeq, \bowtie\}$ *is NP hard for the language of fully acyclic CP-nets.* $\sim$-COMPARISON *is trivial for linearisable CP formulas, but hard for CP1*$\not\triangleright\wedge$*, and for the language of linearisable (hence locally consistent) and locally complete CP1*$\not\triangleright$ *formulas.*

Optimisation Comparison queries can be used to compute, in a given set $S \subseteq \underline{\mathcal{X}}$, an alternative that is not dominated by any other alternative in S: this can be achieved by asking at most $|S|(|S|-1)/2$ dominance queries (such query can return failure when S contains no such alternative). More generally, given some integer k, we may be interested in finding a subset S' of S that contains k "best" alternatives of S, in the following sense: we say that $S' \subseteq S$ is *weakly undominated* in S if for every $o \in S'$, for every $o' \in S \setminus S'$ it is not the case that $o' \succ_\varphi o$. Note that such a set must exist, because $\succ_\varphi$ is acyclic. [29] proposes a stronger query:

ORDERING Given k, $S \subseteq \underline{\mathcal{X}}$ and φ, find $o_1, o_2, \ldots, o_k \in S$ such that for every $i \in 1, \ldots, k$, for every $o' \in S$, if $o' \succ_\varphi o$ then $o' \in \{o_1, \ldots, o_i\}$.

Note that if $o_1, o_2, \ldots, o_k$ is the answer to such query, if $1 \leq i < j \leq k$, then it can be the case that $o_i \bowtie o_j$, but it is guaranteed that $o_j \not\succ o_i$: in the context of a recommender system for instance, where one would expect alternatives to be presented in order of non-increasing preference, o_i could be safely presented before o_j.
[4] consider a specific case of the above query, when $|S| = 2$: note that given two alternatives $o, o' \in \underline{\mathcal{X}}$ it must be the case that at least one of $o \succ_\varphi o'$ or $o' \succ_\varphi o$ must be false, since $\succ_\varphi$ is irreflexive and transitive.

2-ORDERING Given $o, o' \in \underline{\mathcal{X}}$, return a pair $(o_1, o_2) \in \{(o, o'), (o', o)\}$ such that $o_2 \not\succ_\varphi o_1$.

Proposition 8 (Generalisation of Theorem 5 in [4])**.** 2-ORDERING *and* ORDERING *can be answered in time which is polynomial in the size of* φ *and the size of* S *for cuc-acyclic, locally consistent formulas of CP1*$\wedge$*; and for LPT.*

Based on the notions of (weakly) undominated / (strongly) dominating alternatives (defined in section 2.2.1), [21] define two types of queries: 1) given φ and o, is o (weakly) undominated, or is it (strongly) dominated? 2) given φ, is there a (weakly) undominated, or a (strongly) dominated, alternative? We call these queries W-UNDOMINATED CHECK, UNDOMINATED CHECK, and so on, for queries of type 1); and W-UNDOMINATED-$\exists$, and so on, for queries of type 2). Note also that there is always at least one weakly undominated alternative (because $\underline{\mathcal{X}}$ is finite), so WEAKLY UNDOMINATED-$\exists$ is trivial (always true).
All these queries are easily shown to be tractable for LPT. The problem UNDOMINATED CHECK is tractable for CP; in fact, the proof, originally given by [4] for CP-nets, and generalised to CP1$\not\triangleright$ by [21], can be generalised further to CP.

Proposition 9. UNDOMINATED CHECK *is in P for CP.*

That all other, dominance related, queries are in PSPACE for CP can be proved using again the algorithm for checking $\succeq$-comparison. Checking for instance that o is *not* undominated can be done by guessing some o' and checking if $o' \succeq_\varphi o$. [21] prove several hardness results:

Proposition 10. *[21] The problems* W. UNDOMINATED CHECK, DOMINATING CHECK, S. DOMINATING CHECK *are PSPACE complete for CP1*$\not\triangleright\wedge$*. These problems, as well as* DOMINATING $\exists$, S. DOMINATING $\exists$*, are PSPACE complete for CP1*$\not\triangleright$*, even if restricted to locally consistent and locally complete formulas.* UNDOMINATED $\exists$ *is NP complete for CP1*$\not\triangleright\wedge$.

For CP-nets, [4] give a polytime algorithm that computes the only dominating alternative when the dependency graph is acyclic; in this case, this alternative is also the only strongly dominating one, the only undominated, and the only weakly undominated one, since the CP-net is linearisable.

7 Conclusion

We have not studied here transformations, like conditioning or other forms of projection for instance. Some initial results on projections can be found in [1]. Note that the

[12] Recall that NPSPACE = co-NPSPACE = PSPACE .

©AfIA 2020

result of transformations like conditionning for CP1 formulas if often not expressible in CP1. However, this preliminary study shows that, for conditional preference statements, gains in terms of query complexity is not only at the cost of a loss in succinctness, but often at the cost of big losses in expressiveness. This may indicate that the language of conditional preference statement is not an adequate target language for compilation, but that other languages may be more suitable for that. However, existing real-valued languages in general force a complete ordering of the alternatives, thus a target language for the compact representation of possibly incomplete preorders has yet to be defined, possibly using combinations of real-valued formulas, or languages "between" CP and CP1.

Acknowledgments We thank Hélène Fargier for fruitful discussions, anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions. This work has benefitted from the AI Interdisciplinary Institute ANITI. ANITI is funded by the French "Investing for the Future – PIA3" program under grant agreement n° ANR-19-PI3A-0004. Itk has also been supported by the PING/ACK project of the French National Agency for Research, ANR-18-CE40-0011.

References

[1] P. Besnard, J. Lang, and P. Marquis. Variable forgetting in preference relations over combinatorial domains. In *Proc. IJCAI Multidisciplinary Workshop on Advances in Preference Handling*, 2005.

[2] R. Booth, Y. Chevaleyre, J. Lang, J. Mengin, and Chattrakul Sombattheera. Learning various classes of models of lexicographic orderings. Tech. report IRIT/RR–2009-21–FR, IRIT, Toulouse, 2009.

[3] R. Booth, Y. Chevaleyre, J. Lang, J. Mengin, and C. Sombattheera. Learning conditionally lexicographic preference relations. ECAI'10, pages 269–274. 2010.

[4] C. Boutilier, R. I. Brafman, C. Domshlak, H. H. Hoos, and D. Poole. CP-nets: a tool for representing and reasoning with conditional ceteris paribus preference statements. *JAIR*, 21:135–191, 2004.

[5] C. Boutilier, R. I. Brafman, C. Domshlak, H. H. Hoos, and D. Poole. Preference-based constrained optimization with cp-nets. *Computational Intelligence*, 20(2):137–157, 2004.

[6] C. Boutilier, R. I. Brafman, H. H. Hoos, and D. Poole. Reasoning with conditional ceteris paribus preference statements. In Proc. UAI 99, pages 71–80. 1999.

[7] R. I. Brafman, C. Domshlak, and S. E. Shimony. On graphical modeling of preference and importance. *JAIR*, 25:389–424, 2006.

[8] R. I. Brafman, F. Rossi, D. Salvagnin, K. B. Venable, and Toby Walsh. Finding the next solution in constraint- and preference-based knowledge representation formalisms. In Proc. KR'10. 2010.

[9] D. Braziunas and C. Boutilier. Local utility elicitation in gai models. In Proc. UAI'05, pages 42–49. 2005.

[10] M. Bräuning and E. Hüllermeyer. Learning conditional lexicographic preference trees. ECAI 2012 workshop on Preference Learning, pp. 11–15, 2012.

[11] M. Cadoli, F. M. Donini, P. Liberatore, and M. Schaerf. Space efficiency of propositional knowledge representation formalisms. *JAIR*, 13:1–31, 2000.

[12] S. Coste-Marquis, J. Lang, P. Liberatore, and P. Marquis. Expressive power and succinctness of propositional languages for preference representation. In Proc. KR'04, pages 203–212. AAAI Press, 2004.

[13] A. Darwiche. Compiling knowledge into decomposable negation normal form. In Proc. IJCAI 99, pages 284–289. Morgan Kaufmann, 1999.

[14] A. Darwiche and P. Marquis. A knowledge compilation map. *JAIR*, 17:229–264, 2002.

[15] C. Domshlak and R. I. Brafman. CP-nets: Reasoning and consistency testing. KR'02, pp.s 121–132. 2002.

[16] Domshlak, C. , Prestwich, S. , Rossi, F. , Venable, K. , Walsh, T. Hard and soft constraints for reasoning about qualitative conditional preferences J. Heuristics 12(4-5), 2006, 263–285

[17] H. Fargier, P. F. Gimenez, and J. Mengin. Learning lexicographic preference trees from positive examples. In Proc. AAAI'18, pages 2959–2966. 2018.

[18] H. Fargier, P. Marquis, A. Niveau, and N. Schmidt. A knowledge compilation map for ordered real-valued decision diagrams. AAAI'14, pp. 1049–1055. 2014.

[19] E. C. Freuder, R. Heffernan, R. J. Wallace, and N. Wilson. Lexicographically-ordered constraint satisfaction problems. *Constraints*, 15(1):1–28, 2010.

[20] G. Gogic, H. A. Kautz, C. H. Papadimitriou, and B. Selman. The comparative linguistics of knowledge representation. IJCAI'95, pp. 862–869. 1995.

[21] J., Jérôme Lang, M. Truszczynski, and N. Wilson. The computational complexity of dominance and consistency in CP-nets. *JAIR*, 33:403–432, 2008.

[22] C. Gonzales and P. Perny. GAI networks for utility elicitation. KR'04, pp. 224–233. AAAI Press, 2004.

[23] J. Lang, J. Mengin, and L. Xia. Voting on multiissue domains with conditionally lexicographic preferences. *Artificial Intelligence*, 265:18–44, 2018.

[24] T. Schiex, H. Fargier, and G. Verfaillie. Valued constraint satisfaction problems: Hard and easy problems. IJCAI'95, pp. 631–639. 1995.

[25] M. Schmitt and L. Martignon. On the complexity of learning lexicographic strategies. *Journal of Machine Learning Research*, 7:55–83, 2006.

[26] N. Wilson. Consistency and constrained optimisation for conditional preferences. ECAI 2004, p. 888–892.

[27] N. Wilson. Extending cp-nets with stronger conditional preference statements. In Proc. AAAI'04, pages 735–741. AAAI Press / The MIT Press, 2004.

[28] N. Wilson. An effcient upper approximation for conditional preference. Proc. ECAI'06. IOS Press, 2006.

[29] N. Wilson. Computational techniques for a simple theory of conditional preferences. *Artificial Intelligence*, 175:1053–1091, 2011.

Propagation contextuelle des propriétés pour les graphes de connaissances : une approche fondée sur les plongements de phrases

Pierre-Henri Paris, Fayçal Hamdi, Samira Si-said Cherfi

Conservatoire National des Arts et Métiers, CEDRIC

pierre-henri.paris@upmc.fr, faycal.hamdi@cnam.fr, samira.cherfi@cnam.fr

Résumé

Comme plusieurs travaux l'ont démontré, l'identité définie par la sémantique de owl:sameAs est peut-être trop rigide dans de nombreux cas, et elle devrait être considérée comme dépendante du contexte. Contrairement à l'identité classique, avec l'identité contextuelle, seules certaines propriétés peuvent être propagées entre des entités contextuellement identiques. Dans la continuité de ces travaux sur l'identité contextuelle, nous proposons une approche, fondée sur les plongements de phrases, pour trouver semi-automatiquement un ensemble de propriétés, pour un contexte d'identité donné, qui peuvent être propagées entre des entités contextuellement identiques.

Mots-clés

RDF, identité contextuelle, graphe de connaissances, données liées, plongement de phrases.

Abstract

As several studies have shown, the identity defined by owl:sameAs semantics may be too rigid in many cases, and should be considered context-dependent. Contrary to classical identity, with contextual identity, only certain properties can be propagated between contextually identical entities. In the continuity of this work on contextual identity, we propose an approach, based on sentence embedding, to find semi-automatically a set of properties, for a given identity context, that can be propagated between contextually identical entities.

Keywords

RDF, contextual identity, knowledge graph, linked data, sentence embedding.

1 Introduction

Les graphes de connaissances RDF tels que Wikidata [1] ou DBpedia [2] sont en croissance constante en matière de nombre et d'usage. Cette croissance va de pair avec une augmentation du nombre d'entités décrites dans ces graphes et entraîne un problème pour les éditeurs de données et leurs utilisateurs : **comment savoir si deux entités sont les mêmes ou pas ?** Pour interconnecter les graphes de connaissances, la propriété *owl:sameAs* a été définie par le W3C [3] en 2004 pour relier des entités qui sont les mêmes. En effet, un objet (du monde réel) peut être décrit parmi plusieurs graphes de connaissances, et ces descriptions sont liées entre elles grâce à la propriété *owl:sameAs*. Cependant, la définition sémantique de *owl:sameAs* est très stricte. Elle est fondée sur la définition de l'identité de Leibniz, c'est-à-dire l'identité des indiscernables :

$$\forall x, \forall y(\forall p, \forall o, (\langle x, p, o\rangle \; et \; \langle y, p, o\rangle) \rightarrow x = y) \qquad (1)$$

Et sa réciproque, l'indiscernabilité des identiques :

$$\forall x, \forall y(x = y \rightarrow \forall p, \forall o, (\langle x, p, o\rangle \rightarrow \langle y, p, o\rangle)) \qquad (2)$$

C'est pourquoi deux entités sont considérées comme identiques si et seulement si elles partagent tous leurs couples ⟨*propriété, valeur*⟩ dans tous les contextes possibles et imaginables. En d'autres termes, deux identités sont identiques si **toutes leurs propriétés sont indiscernables** pour chaque valeur. Une fois qu'un lien d'identité est établi entre deux entités, il est possible d'utiliser les couples ⟨*propriété, valeur*⟩ de l'une sur l'autre et inversement. C'est ce que l'on nomme "propagation" dans cet article. Cependant, il faut noter que c'est une affirmation très forte que d'établir que deux objets sont identiques quel que soit le contexte. D'un point de vue philosophique, il y a de multiples contre-arguments à la définition de l'identité selon Leibniz. Par exemple, si nous considérons deux verres d'un même ensemble, ils sont indiscernables dans leurs fonctions et apparences, mais ils n'en sont pas moins deux objets physiques distincts. Ou encore, un bateau dont on changerait toutes les pièces au cours du temps sera-t-il toujours le même au cours du temps ?
Il s'agit aussi d'un problème technique à cause de l'hypothèse du monde ouvert ([7]) d'une part, et de l'intention de l'éditeur de données d'autre part. En effet, l'éditeur pourra avoir en tête une intention d'utilisation différente de celle de l'utilisateur. En outre, lorsque les données sont

1. https://www.wikidata.org
2. https://wiki.dbpedia.org/
3. https://www.w3.org/TR/owl-ref/

©AfIA 2020

publiées, il est presque impossible de connaître le **consensus** qui sous-tend la décision de créer un tel lien. Plusieurs travaux ([11] ou [6]) ont démontré que, dans certains cas, l'utilisation de *owl:sameAs* était inadéquate. En effet, les liens établis ne peuvent être considérés comme vrais que dans des contextes spécifiques. De nos jours, le problème de l'identité reste l'un des plus importants pour l'industrie travaillant avec des graphes de connaissances ([18]).
En première approximation, une identité contextuelle entre deux entités pourrait être considérée comme un sous-ensemble Π des propriétés de ces entités pour lesquelles les entités partagent les mêmes valeurs pour chaque $p \in \Pi$. Π est l'ensemble d'indiscernabilité.

Exemple 1 *Deux médicaments génériques différents Drug1 et Drug2 peuvent être identiques en ce qui concerne leur principe actif. Si un graphe de connaissances contient les triplets ⟨ Drug1 activeIngredient Molecule1 ⟩ et ⟨ Drug2 activeIngredient Molecule1 ⟩, alors* $Drug1 \equiv_{activeIngredient} Drug2$ *lorsque l'ensemble d'indiscernabilité est*
$\Pi = \{activeIngredient\}$.

L'une des principales caractéristiques de *owl:sameAs* est de pouvoir **propager toutes les propriétés** d'une entité vers d'autres entités identiques. Si $A = B$, alors toutes les caractéristiques de A sont aussi valables pour B, et inversement. Ainsi, *owl:sameAs* permet de découvrir plus de connaissances et d'accroître la complétude. De la même manière, l'identité contextuelle doit aider à découvrir **plus de connaissances et à accroître la complétude**, mais seulement dans des circonstances spécifiques. Pour être utile, une identité contextuelle doit préciser ce qui se passe avec les propriétés qui ne font pas partie de l'ensemble d'indiscernabilité. En d'autres termes, **une identité contextuelle** doit aussi pouvoir permettre de **propager certaines propriétés**.

Exemple 2 *En reprenant l'exemple 1, établir seulement* $Drug1 \equiv_{activeIngredient} Drug2$ *est d'un intérêt limité, puisqu'en dehors de* $activeIngredient$*, nous ne savons pas quoi faire des autres propriétés des médicaments. En considérant que* $activeIngredient$ *est l'ensemble d'indiscernabilité, nous savons, en tant qu'être humains, que la propriété* $targetDisease$ *est propageable, et nous pouvons conclure que si la déclaration ⟨ Drug1 targetDisease Disease1 ⟩ existe alors* $\langle Drug2\ targetDisease\ Disease1 \rangle$ *aussi. A l'inverse, nous savons que la propriété* $excipient$ *n'est pas nécessairement propageable.*

De plus, la capacité à propager une propriété entre entités dépend du contexte, c'est-à-dire que la même propriété peut se propager dans un contexte C_1 et ne pas se propager dans un autre contexte C_2. Par exemple, la propriété "maladie ciblée" se propage entre deux médicaments si le contexte est la propriété "principe actif". Mais si le contexte est "produit par", alors "maladie ciblée" ne sera très certainement pas propageable entre deux médicaments.

Plusieurs travaux ont tenté de proposer une solution à l'identité contextuelle. [2], [14] et [20] ont défini trois façons différentes de traiter l'identité dans un contexte donné. Mais aucun de ces travaux ne propose de solutions pour découvrir des propriétés qui peuvent être propagées dans un contexte spécifique.
Questions de recherche : Avec un contexte d'identité donné entre deux entités, comment trouver les propriétés qui peuvent être propagées ? Est-il possible de trouver ces propriétés propageables (semi-)automatiquement ?
Dans cet article, en reprenant la définition de [14], nous proposons une approche pour **trouver les propriétés propageables** afin de faciliter la découverte de connaissances pour les utilisateurs de graphes de connaissances. Nous utilisons une méthode de plongement de phrases existante fondée sur les réseaux de neurones pour découvrir des propriétés propageables pour un contexte donné. Nous avons validé notre approche avec des expériences qualitatives.
Le reste du document est organisé comme suit. Dans la section suivante, nous présentons les travaux connexes. Dans la section 4, nous présentons notre approche. Dans la section 5, nous présentons les expériences qualitatives que nous avons menées. Enfin, nous concluons et définissons les prochaines orientations de nos travaux futurs.

2 Travaux connexes

Dans la première partie de cette section, nous décrivons les articles qui ont souligné les problèmes soulevés par l'usage de *owl:sameAs*. La deuxième partie concerne les propositions qui s'attaquent à ces problèmes.

2.1 Crise de l'identité

Comme décrit dans [13], le but de la propriété *owl:sameAs* est de relier deux entités qui sont strictement identiques, c'est-à-dire que les deux entités sont identiques dans tous les contextes possibles. *owl:sameAs* a une sémantique stricte permettant de déduire de nouvelles informations. De nombreux outils existants produisent de tels liens *owl:sameAs* ([9]), et plusieurs enquêtes sont disponibles (voir [9], [1] et [17]).
Toutefois, aucune de ces approches ne tient compte des liens d'identité contextuels. Leur but est de découvrir des liens d'identité qui seraient toujours valables. Ceci est, d'un point de vue philosophique, difficile à obtenir comme le souligne la définition de l'identité de Leibnitz.
Dès 2002, [10] a soulevé la question de l'identité pour les ontologies. Surtout lorsque le temps est impliqué, affirmer que deux choses sont identiques devient un problème philosophique. Les auteurs ont proposé de n'impliquer dans l'identité que les propriétés essentielles, c'est-à-dire les propriétés qui ne peuvent pas changer. Comme indiqué par exemple dans [11] ou [6], en raison de la sémantique stricte de *owl:sameAs*, la charge des éditeurs de données pourrait être trop lourde. En fait, ces liens ne sont pas souvent utilisés de manière adéquate. Certains peuvent être simplement erronés et, plus insidieusement, certains peuvent dépendre du contexte, c'est-à-dire que le lien ne tient pas dans tous les contextes possibles parce qu'il est difficile d'obte-

nir un consensus sur la validité d'une déclaration. Le sens donné par un modélisateur de données peut ne pas correspondre à ce qu'attend un utilisateur de données. Cette utilisation abusive de *owl:sameAs* est souvent appelée "crise de l'identité" ([11]).

2.2 Identité contextuelle

[2] ont abordé cette question en construisant un treillis de contextes d'identité où les contextes sont définis comme des ensembles de propriétés. Cela correspond à la première approximation proposée dans la Section 1. Toutes les entités identiques dans un contexte partagent les mêmes valeurs pour chaque propriété de ce contexte. Ainsi, un contexte est un ensemble de propriétés indiscernables pour une entité. Cependant, les auteurs ne donnent pas d'indications sur l'utilisation de propriétés n'appartenant pas à de tels contextes. [20] ont proposé un algorithme appelé DECIDE pour calculer les contextes, où les contextes d'identité sont définis comme des sous-ontologies. Mais comme dans le précédent article, les propriétés des entités qui ne sont pas dans la sous-ontologie sont ignorées. Ainsi, dans les deux travaux précédents, il y a une limitation concernant les propriétés qui n'appartiennent pas à un contexte. Cette limitation réduit l'intérêt d'utiliser de telles approches. En effet, l'un des objectifs d'un contexte d'identité est de définir une relation d'identité entre deux entités afin d'utiliser les informations de l'une à l'autre. La solution de [14] implique une telle propagation des propriétés, et donc, augmente la complétude d'une entité selon un contexte. Toutefois, cette proposition exige que l'utilisateur donne en entrée les propriétés de propagation et les propriétés indiscernables. Elle laisse donc à l'utilisateur la charge d'identifier et de fournir le contexte et les propriétés. L'utilisateur doit fournir les deux ensembles de propriétés indiscernables et propageables.

Dans ce travail, nous proposons d'enlever partiellement cette charge à l'utilisateur, c'est-à-dire de **calculer semi-automatiquement l'ensemble de propagation des propriétés étant donné un ensemble de propriétés indiscernables**. Pour cela, nous utiliserons une approche de plongement de phrases (présentée dans la section 4.3) pour calculer les plongements des (descriptions des) propriétés afin de découvrir les **propriétés propageables** pour un contexte d'identité donné (tel que défini dans [14]).

3 Motivation

Parfois, les entités du monde réel peuvent être proches quant à leurs propriétés, mais pas exactement les mêmes. Par exemple, la capitale française, Paris, est à la fois une ville et un département. Tout en considérant que la ville et le département sont les mêmes en ce qui concerne leur géographie, ils sont deux entités distinctes sur le plan administratif (ou juridique). Maintenant, supposons que les deux Paris soient représentés dans un graphe de connaissances en tant qu'entités distinctes, et que les deux soient liés à des cinémas (éventuellement distincts). Si l'on veut récupérer les salles de cinéma situées dans la ville de Paris, les résultats ne seront pas complets si certains d'entre eux

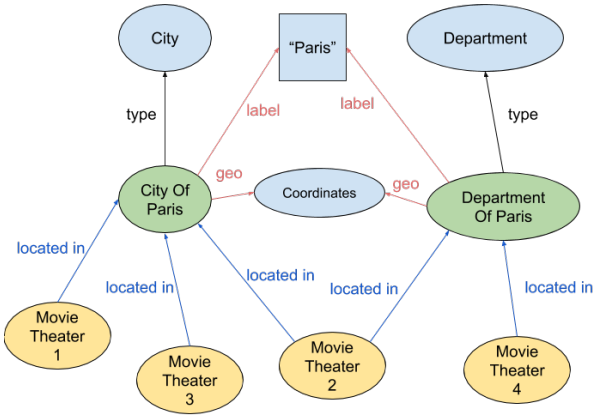


FIGURE 1 – Extrait d'un graphe de connaissances sur Paris. Les propriétés en rouge sont indiscernables pour la ville et le département. Les propriétés en bleu se propagent tant que les propriétés en rouge sont indiscernables.

sont liés au département (voir Figure 1).

Un citoyen français peut connaître cette vérité, mais comment permettre à un agent automatisé de découvrir ce fait ? L'identité contextuelle est une réponse possible à cette question, c'est-à-dire un ensemble de propriétés pour lesquelles les valeurs sont les mêmes pour les deux entités. Dans le présent exemple, les deux Paris (ville et département) sont géographiquement identiques et certaines propriétés liées à la géographie pourraient être **propagées**. Dans la figure 1, les propriétés rouges (*geo* et *label*) sont indiscernables (ont les mêmes valeurs) et les propriétés bleues (*located in*) se propagent. Dans le monde réel, les cinémas situés dans la ville ou le département selon le graphe de connaissances sont en fait situés au même endroit. Malgré le fait que les deux entités ne partagent pas les mêmes valeurs pour la propriété *located in*, celle-ci est liée au contexte géographique. En effet, pour un agent humain, la propriété *located in* pourrait être évidemment propagée entre les deux entités.

Alors que nous savons que les quatre cinémas sont situés à Paris, la requête dans Listing 1 ne donnera que les cinémas 1, 2 et 3 (voir Figure 1).

```
SELECT DISTINCT ?movieTheater WHERE {
    ?movieTheater :locatedIn
    :CityOfParis . }
```

Listing 1 – Requête SPARQL récupérant tous les cinémas de Paris.

Ainsi, la découverte de tels contextes d'identité entre entités pourrait améliorer les résultats des requêtes. Notre intuition est inspirée par la première loi de Tobler ([24]), c'est-à-dire :

> "*Tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chances de le faire que deux objets éloignés.*"

Par conséquent, **nous émettons l'hypothèse que, d'un point de vue sémantique, plus une propriété est proche**

©AfIA 2020

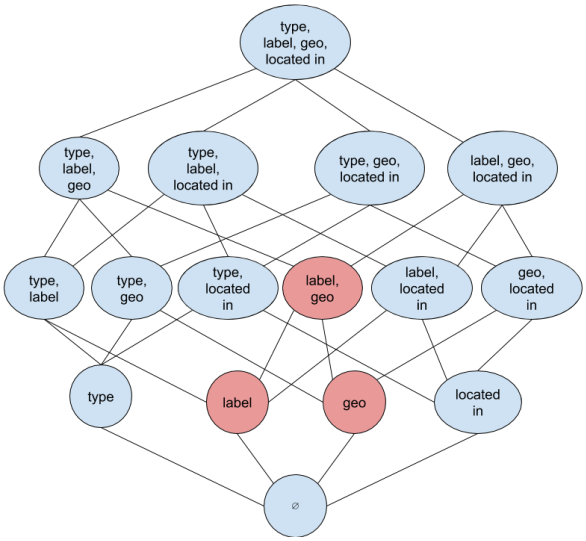


FIGURE 2 – Treillis d'identité simplifié de la figure 1 : chaque nœud est un ensemble de propriétés. Seuls les nœuds rouges ont des entités similaires.

du contexte d'identité, plus elle est susceptible d'être une bonne candidate à la propagation. Dans l'exemple précédent, *located in* fait clairement référence à la géographie, et le contexte d'identité concerne la géographie puisqu'il est composé de coordonnées géographiques. L'idée est donc de **calculer une distance entre les propriétés indiscernables** et **les propriétés candidates à la propagation**. Par conséquent, les nombres, et dans notre cas les vecteurs numériques sont les mieux adaptés pour calculer cette distance. Une représentation numérique de la description textuelle de chaque propriété grâce à la valeur donnée par $rdfs{:}comment$ ou $schema{:}description$ peut fournir une base pour obtenir ce vecteur. En effet, le plongement des descriptions des propriétés nous donne des vecteurs numériques dont la distribution dans l'espace vectoriel respecte la similarité sémantique des phrases.
Dans ce qui suit, nous décrirons notre approche avec plus de détails.

4 Approche

Dans cette section, avant de plonger plus avant dans l'approche de base, nous donnons quelques définitions nécessaires par la suite pour décrire l'approche.

4.1 Préliminaires

Comme nous l'avons vu dans la section 2, plusieurs propositions ont été faites pour définir un contexte d'identité. Nous avons choisi celle de [14] (Définition 1) car elle est la seule à prendre en compte la propagation des propriétés. Ils donnent la définition suivante du contexte d'identité :

Définition 1 ***(Contexte d'identité)*** *Un contexte d'identité $\mathcal{C} = (\Pi, \Psi, \approx)$ est défini par deux ensembles de propriétés (Π et Ψ) et une **procédure d'alignement** ($\approx$). Π est l'**ensemble d'indiscernabilité** des propriétés (équation 3) et Ψ est l'**ensemble de propagation** des propriétés (equation 4). Dans la suite, x et y sont des entités.*

$$x =_{(\Pi,\Psi,\approx)} y \leftrightarrow \forall (p_1, p_2) \in \Pi^2 \text{ avec } p_1 \approx p_2 \\ \text{et } \forall v_1, v_2 \text{ avec } v_1 \approx v_2 : \langle x, p_1, v_1 \rangle \leftrightarrow \langle y, p_2, v_2 \rangle \quad (3)$$

$$x =_{(\Pi,\Psi,\approx)} y \rightarrow \forall (p_1, p_2) \in \Psi^2 \text{ avec } p_1 \approx p_2 \\ \text{et } \forall v_1, v_2 \text{ avec } v_1 \approx v_2 : \langle x, p_1, v_1 \rangle \leftrightarrow \langle y, p_2, v_2 \rangle \quad (4)$$

*De plus, nous définissons le **niveau d'un contexte** $|\Pi_{\mathcal{C}}|$ comme étant le nombre de propriétés indiscernables (dans Π).*

Dans le cas où des entités similaires selon un contexte d'identité appartiennent au même graphe de connaissances, il n'est pas nécessaire d'avoir une procédure d'alignement. Une entité peut avoir plusieurs contextes d'identité, en fonction des propriétés de l'ensemble d'indiscernabilité Π. En effet, deux combinaisons différentes de propriétés peuvent donner des ensembles différents d'entités similaires. Par exemple, si l'on choisit comme ensemble d'indiscernabilité la propriété "principe actif", pour un médicament donné med, on aura tous les médicaments qui ont le même principe actif que med. A contrario, si l'on choisit comme ensemble d'indiscernabilité la propriété "produit par" pour la graine med, on aura tous les médicaments produits par la société qui produit med. Dans les deux cas, la graine est la même (med), mais les entitiés similaires des deux ensembles d'indiscernabilités ont de grandes chances d'être différentes. Pour finir, l'ensemble d'indiscernabilité composé des deux propriétés "principe actif" et "produit par" donnera comme entités similaires celles qui sont produites par l'entreprise fabriquant med et qui ont le même principe actif. Il se peut bien entendu qu'il n'existe pas de médicament correspondant à ce cas.
Le treillis d'identité de tous les contextes d'identité d'une entité e est défini comme suit (voir Figure 2) :

Définition 2 ***(Treillis d'identité)*** *Un treillis d'identité $\mathcal{L}$ est un treillis dont chaque élément est un contexte d'identité. L'inclusion ensembliste entre les ensembles d'indiscernabilités de chaque contexte est la relation binaire responsable de l'ordre partiel.*

La dernière notion est la graine d'un treillis ou d'un contexte que nous définissons comme suit :

Définition 3 ***(Graine d'un treillis ou d'un contexte)*** *Chaque contexte d'identité d'un treillis d'identité est construit à partir de la **même entité** e. Cette entité e est appelée la graine du treillis d'identité.*

En effet, pour construire un treillis d'identité, nous devons partir d'une graine, même si le treillis pourrait potentiellement être valide avec une autre graine, c'est-à-dire que deux graines peuvent donner le même treillis d'identité.
Maintenant que nous avons défini les concepts nécessaires, nous allons expliquer le cœur de notre approche.

4.2 Calcul des contextes

Dans cette section, nous expliquons comment calculer un treillis et ses contextes.

Nous présentons l'Algorithme 1 qui permet le calcul du treillis d'identité. Il prend en entrée l'entité graine, le graphe de connaissances source auquel la graine appartient, le graphe de connaissances cible (éventuellement le même que le graphe de connaissances source) et une procédure d'alignement si les deux graphes de connaissances sont distincts. L'idée principale est de commencer par calculer les ensembles d'indiscernabilité de bas niveau avec chaque propriété de la graine et enfin de combiner ces ensembles pour obtenir des ensembles d'indiscernabilité de plus haut niveau. **Lorsqu'on construit un contexte, le premier élément est son ensemble d'indiscernabilité, à partir duquel on obtient ensuite des entités similaires, pour finalement obtenir des propriétés candidates à la propagation et, en conclusion, des propriétés de propagation.**

La première étape, ligne 3, consiste à calculer tous les contextes d'identité de niveau 1 (voir Définition 1). En effet, pour chaque propriété p de la graine, il existe exactement un contexte d'identité (son ensemble d'indiscernabilité est $\Pi = \{p\}$). Par la suite, les contextes d'identité n'ayant qu'une seule propriété d'indiscernabilité seront fusionnés pour donner des contextes d'identité de niveau 2, puis de niveau 3, etc. Ensuite, nous récupérons l'ensemble $entities_p$ des entités similaires à la graine qui ont la (les) même(s) valeur(s) pour la propriété donnée p. Si p est multi-valué (plusieurs o pour p), alors les entités dans $entities_p$ sont similaires à la graine pour toutes les valeurs o de sorte que $\langle seed\ p\ o\rangle$, c'est-à-dire $\forall p, (\forall o, \langle seed, p, o\rangle \rightarrow \forall e \in entities_p, \langle e, p, o\rangle)$. Il est à noter que, lors du remplissage de $entities_p$, nous ne recherchons que les entités qui ont le(s) même(s) type(s) que la graine. C'est parce que nous voulons éviter les résultats absurdes, par exemple comparer une personne avec un avion. Elle présente également l'avantage de réduire considérablement le nombre de contextes d'identité possibles à calculer. Enfin, sur la base de $entities_p$, nous calculons l'ensemble de propagation Ψ (ligne 12) comme expliqué dans la section suivante.

La deuxième étape (voir Algo. 2) consiste à calculer les contextes d'identité de niveau supérieur en se basant sur ceux du niveau 1. La boucle (ligne 2) de l'algorithme calcule ces niveaux supérieurs en combinant des contextes de même niveau, et s'arrête lorsqu'il ne peut pas construire de nouveaux contextes d'identité de niveau supérieur. Ce calcul est basé sur un opérateur de treillis d'identité qui est l'ensemble d'inclusion sur les ensembles d'indiscernabilité. Par exemple, un contexte de niveau 2 (deux propriétés dans Π) est construit sur deux contextes de niveau 1 (chacun une propriété dans Π). Là encore, pour réduire le nombre de contextes d'identité possibles à calculer, s'il n'y a pas d'entité similaire à la semence pour un contexte donné C_i, il n'est pas nécessaire de calculer des contextes de niveau supérieur basés sur C_i.

Data : $\mathcal{KG}_1$: the source KG, $\mathcal{KG}_2$: the target KG, $seed$: an entity of $\mathcal{KG}_1$, $\approx$: an alignment procedure between $\mathcal{KG}_1$ and $\mathcal{KG}_2$
Result : $\mathcal{L}$: a lattice of identity contexts between the seed and entities in the target KG

1 $\mathcal{L} = \emptyset$;
/* Get all explicit and implicit types of the seed */
2 $\mathcal{T}_{seed} = \{t : \langle seed\ rdf{:}type\ t\rangle \in \mathcal{KG}_1\}$;
/* the following will create all contexts of the lower level (with only one indiscernible property) */
3 **for** *each property p of seed* **do**
4 $candidateEntities = \emptyset$;
5 **for** *each value o such as* $\langle seed\ p\ o\rangle \in \mathcal{KG}_1$ **do**
/* $entities_{p,o}$ is the set of indiscernible entities with $seed$ with respect to the p, o couple */
6 $entities_{p,o} = \{e : (\exists (p', o'), p' \approx p, o' \approx o, \langle e\ p'\ o'\rangle \in \mathcal{KG}_2) \wedge (\exists t \in \mathcal{T}_{seed}, t' \approx t, \langle e\ rdf{:}type\ t'\rangle \in \mathcal{KG}_2)\}$;
7 **if** $entities_{p,o} \neq \emptyset$ **then**
8 $candidateEntities = candidateEntities \cup \{entities_{p,o}\}$;
9 **end**
10 **end**
/* $entities_p$ is the set of indiscernible entities with $seed$ with respect to the property p */
/* intersection of all sets in $candidateEntities$ */
11 $entities_p = \bigcap candidateEntities$;
12 $\Psi = getPropagationSet(seed, entities_p, \{p\})$;
13 **if** $\Psi \neq \emptyset$ **then**
14 $\Pi = \{p\}$;
15 $\mathcal{C} = (\Pi, \Psi, \approx)$;
16 $\mathcal{L} = \mathcal{L} \cup \mathcal{C}$;
17 **end**
18 **end**
/* Now we can combine contexts of the same level */
19 **return** $constructUpperLevels(\mathcal{L})$

Algorithme 1 : createLattice : calculer le treillis d'identité d'une entité.

4.3 Plongement de phrase

Notre approche étant fondée sur le plongement de phrases ("*sentence embedding*"), nous donnons dans cette section plus de détails sur cette notion. En effet, lors du calcul d'un contexte d'identité, nous calculons son ensemble de propagation correspondant à l'aide de l'algorithme 3.

Le plongement de phrases est une technique qui permet de faire correspondre une phrase à un vecteur numérique.

©AfIA 2020

Data : $\mathcal{KG}_1$: the source KG, $\mathcal{KG}_2$: the target KG, $seed$: an entity of $\mathcal{KG}_1$, $\approx$: an alignment procedure between $\mathcal{KG}_1$ and $\mathcal{KG}_2$
Result : $\mathcal{L}$: a lattice of identity contexts between the seed and entities in the target KG

```
/* lvl is the current level in the
   lattice                                  */
lvl = 1;
while ∅ ∉ L do
    contexts = ∅;
    for (C1, C2) ∈ {(Ci, Cj) ∈ L^2 : |ΠCi| = |ΠCj| = lvl, i > j} do
        Π = ΠC1 ∪ ΠC2;
        /* getEntities function gives the
           set of entities that are
           similar under the given
           identity context in the
           given KG                         */
        entities = getEntities(C1, KG2) ∩ getEntities(C2, KG2);
        if entities ≠ ∅ and Π ∉ L then
            Ψ = getPropagationSet(seed, entities, Π);
            /* see Algo. 3                  */
            if Ψ ≠ ∅ then
                C = (Π, Ψ, ≈);
                contexts = contexts ∪ C;
            end
        end
    end
    L = L ∪ contexts;
    lvl = lvl + 1;
end
return L
```

Algorithme 2 : constructUpperLevels : calculer les niveaux supérieurs du treillis d'identité d'une entité.

Idéalement, les phrases sémantiquement proches sont représentées par des vecteurs proches dans l'espace vectoriel considéré.

Exemple 3 *"Un match de football auquel participent plusieurs hommes" et "Certains hommes pratiquent un sport" sont proches sémantiquement, donc leurs vecteurs devraient être proches en ce qui concerne la distance.*

Réciproquement, deux phrases qui ne sont pas apparentées sémantiquement doivent avoir des vecteurs éloignés.

Exemple 4 *"Un homme inspecte l'uniforme d'un personnage dans un pays d'Asie de l'Est" et "L'homme dort" doivent avoir des vecteurs éloignés.*

Ces vecteurs permettent d'utiliser divers opérateurs mathématiques qui ne sont évidemment pas disponibles avec des chaînes de caractères. L'un des premiers travaux importants dans ce domaine est *Word2Vec* ([16]) qui capture la cooccurrence des mots. Chaque mot est traité de manière atomique et fournit un plongement grâce à deux approches distinctes, à savoir *Skip-Gram* et *Continuous Bag of Words* (CBOW). Alors que l'objectif de CBOW est de prédire un mot en fonction de sa fenêtre (c'est-à-dire les mots précédents et suivants dans une phrase), Skip-Gram essaiera de prédire les mots avec lesquels un mot est habituellement vu. De même, *GloVe* ([19]) fournit des plongements pour des mots uniques et peut utiliser Skip-Gram ou CBOW. Mais *GloVe*, au lieu de capturer la cooccurrence, se concentre (à la fin) sur le nombre d'apparitions parmi les fenêtres (c'est-à-dire les mots précédents et suivants dans une phrase). Ensuite, *fastText* ([3]) est une extension de *Word2Vec* qui traite les mots comme n-grammes de caractères plutôt que comme entité atomique. La taille des N-grammes dépend des paramètres d'entrée. L'utilisation de N-grammes permet une meilleure compréhension des petits mots. Chaque n-gramme est mis en correspondance avec un vecteur et la somme de ces vecteurs est la représentation du mot. Un autre avantage du *fastText* est sa capacité à fournir un plongement même pour les mots inconnus, grâce à l'utilisation de n-grammes. Alors que les trois travaux précédents sont les mieux adaptés pour travailler avec des mots atomiques, le suivant calcule le plongement pour une phrase entière.

Les raisons pour lesquelles on utilise le plongement de phrases plutôt qu'une distance plus classique, par exemple la distance d'édition, le plongement de graphe RDF comme RDF2Vec ([21]), ou une technique d'alignement ontologique sont les suivantes : *(i)* les distances de chaînes de caractères classiques ignorent la sémantique des phrases, *(ii)* les techniques de plongement de graphes RDF ne sont pas encore adaptées à une telle tâche, et *(iii)* les techniques d'alignement ontologique alignent des propriétés par paires et non des ensembles de propriétés.

Une grande attention a été accordée aux plongements de phrases ces derniers temps. Des approches telles que *Universal Sentence Encoder* ([4]), *GenSen* ([23]) et *InferSent* ([5]) font partie des encodeurs de référence pour le plongement de phrases. Nous choisissons d'utiliser ce dernier, mais notre approche pourrait bénéficier de n'importe laquelle de ces approches. *InferSent*, proposé par [5], est un encodeur de pointe qui s'est révélé efficace pour le plongement de phrases. Pour entraîner leur modèle supervisé de plongement de phrases, les auteurs ont utilisé l'ensemble de données SNLI (Stanford Natural Language Inference) qui consiste en plus de 500K paires de phrases anglaises étiquetées manuellement avec l'une des trois catégories : implication, contradiction et neutre. Ils ont testé plusieurs architectures et ont découvert qu'un réseau BiLSTM avec un *max pooling* offrait les meilleurs résultats. Un réseau BiLSTM est un LSTM bidirectionnel souvent utilisé pour les données séquentielles, c'est-à-dire un réseau de neurones récurrent (avec des boucles). Le *max pooling* est une technique qui permet de réduire le nombre de paramètres du modèle en sélectionnant la valeur maximale d'une "fenêtre" mobile. De plus, le modèle pré-entraîné est basé sur fastText, ce qui permet de calculer des représentations significatives même pour des mots hors vocabulaire, c'est-

Data : $seed$: the entity that generated Π,
$entities$: set of entities similar to $seed$ with respect to Π,
Π : an indiscernibility set
Result : Ψ : a propagation set
/* computation of the embeddings of each property in Π by using one of the encoder */
1 $indiscernibilityEmbeddings \leftarrow getEmbeddings(\Pi)$;
2 $meanVector \leftarrow mean(indiscernibilityEmbeddings)$;
/* $getCandidateProperties$ function returns the set of all candidate properties for propagation */
3 $candidates \leftarrow getCandidateProperties(\Pi, \{seed\} \cup entities)$;
/* then compute their embeddings */
4 $candidatesEmbeddings \leftarrow getEmbeddings(candidates)$;
5 $\Psi \leftarrow \emptyset$;
6 **for** $candidate$ *in* $candidatesEmbeddings$ **do**
7 $\quad similarity \leftarrow cosineSimilarity(candidate, meanVector)$;
8 $\quad$ **if** $similarity \geq threshold$ **then**
9 $\quad\quad \Psi \leftarrow \Psi \cup \{candidate\}$;
10 $\quad$ **end**
11 **end**
12 **return** Ψ

Algorithme 3 : getPropagationSet : calculer l'ensemble de propagation.

à-dire des mots qui n'apparaissent pas dans les données d'entraînement. *GenSen* ([23]) et *Universal Sentence Encoder* ([4]) sont tous deux basés sur l'apprentissage multitâche (MTL). Le but de MTL est d'apprendre de multiples aspects d'une phrase en alternant entre différentes tâches comme la traduction ou l'inférence en langage naturel. Les premiers utilisent un GRU (Gated Recurrent Units) bidirectionnel, c'est-à-dire un réseau de neurones récurrent comme le LSTM mais avec moins de paramètres. Ce dernier utilise l'architecture *transformer* qui transforme une séquence en une autre, mais sans réseau de neurones récurrent (contrairement à *InferSent* et *GenSen*).

Comme présenté dans la section 1, notre intuition, basée sur la première loi de Tobler, est qu'un ensemble de propriétés de propagation peut être trouvé étant donné un ensemble d'indiscernabilité, si les vecteurs de description de ces deux ensembles sont suffisamment proches. Dans ce travail, **nous proposons d'utiliser les descriptions textuelles longues en langage naturel des propriétés (par exemple** $rdfs{:}comment$ **ou** $schema{:}description$**) pour trouver des propriétés qui sont sémantiquement liées** et par conséquent de bonnes candidates à la propagation pour un ensemble d'indiscernabilité donné Π. Pour le calcul du plongement, n'importe lequel des encodeurs décrits précédemment peut être utilisé.

L'algorithme 3 présente notre proposition de calculer Ψ étant donné un Π. Il prend comme entrée trois paramètres : une graine (une entité), un ensemble de propriétés construites à partir de la graine (ensemble d'indiscernabilité Π), et un ensemble d'entités qui sont similaires à la graine en ce qui concerne Π. Le calcul de Π est présenté dans la section précédente (voir algorithme 1).

Tout d'abord, pour chaque propriété de l'ensemble d'indiscernabilité Π, nous calculons son vecteur de représentation (voir ligne 1). Ensuite, nous calculons le vecteur moyen qui représente l'ensemble d'indiscernabilité (ligne 2). De même, nous considérons chaque propriété de la graine ou de ses entités similaires, et calculons leurs vecteurs de représentation. Par conséquent, d'une part, nous avons un vecteur qui représente l'ensemble d'indiscernabilité et, d'autre part, nous avons des vecteurs pour les propriétés qui sont candidates à la propagation. Les entités similaires (en ce qui concerne l'ensemble d'indiscernabilité Π) sont également considérées pour obtenir des propriétés candidates, puisque l'une d'entre elles peut éventuellement avoir une propriété de propagation que la graine n'a pas (voir ligne 3).

Ensuite, nous effectuons une boucle sur chaque propriété candidate (ligne 6) pour calculer une similarité cosinus ([22]) entre chaque vecteur candidat et le vecteur moyen représentant l'ensemble d'indiscernabilité Π. Si la similarité cosinus est suffisamment élevée (au-dessus d'un seuil spécifié, comme expliqué dans la section suivante), la propriété candidate est considérée comme une propriété de propagation (voir ligne 8).

Notre approche ayant été présentée, nous allons introduire les expériences pour valider notre travail.

5 Résultats expérimentaux

Nous présentons plusieurs requêtes SPARQL qui bénéficient de notre approche pour évaluer cette dernière. Mais tout d'abord, nous présentons succinctement notre implémentation. Il n'est pour l'instant pas possible d'évaluer quantitativement notre approche, puisque notre approche est la première à travailler sur cette problématique d'une part, et, d'autre part, il n'existe pas encore d'étalon d'or auquel nous comparer.

5.1 Implémentation et mise en place

Nous avons implémenté notre approche avec le langage Python. Dans un souci de reproductibilité, le code est mis à disposition sur un dépôt GitHub [4]. Comme mentionné précédemment, nous avons utilisé trois approches de plongement de phrases, à savoir *InferSent* [5], *GenSen* [6] et *Universal Sentence Encoder* [7]. Nous avons utilisé un fichier HDT (voir [15] et [8]) qui contient un dump de la dernière

4. https://github.com/PHParis/ConProKnow
5. https://github.com/facebookresearch/InferSent
6. https://github.com/Maluuba/gensen
7. https://tfhub.dev/google/universal-sentence-encoder/2

©AfIA 2020

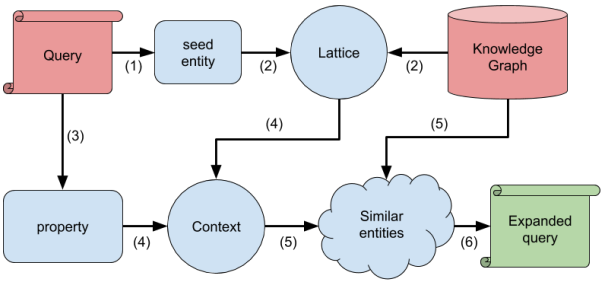


FIGURE 3 – Flux de travail de l'expérience qualitative : les éléments en rouge sont les entrées et l'élément en vert est la sortie. Pour simplifier le diagramme, nous ne considérons qu'une seule entité instanciée liée à une propriété instanciée dans la requête.

version de Wikidata [8]. HDT est un format de sérialisation compressé pour les graphes RDF qui permet une meilleure reproductibilité qu'un *endpoint* SPARQL. Contrairement à Turtle ou N-Triples, grâce à la compression, HDT facilite les manipulations nécessaires pour reproduire les expériences. L'ordinateur que nous avons utilisé est doté d'un processeur i7 et de 32 Go de mémoire vive. À titre indicatif, le calcul complet du treillis d'identité pour une entité telle que la ville de Paris prend environ 1 396 ms. Cette entité compte plus de 1 000 couples propriété-valeur et, dans Wikidata, le nombre moyen de couples propriété-valeur est d'environ 60. Il s'agit donc d'une entité assez importante et cette approche semble pouvoir être utilisée à grande échelle.

5.2 Étude qualitative

Dans cette section, nous introduisons trois requêtes différentes qui pourraient bénéficier de notre approche en étendant leurs résultats. Pour atteindre notre objectif, nous avons utilisé *InferSent* et une valeur de seuil égale à 0,9. Toutes ces requêtes sont des requêtes simplifiées testées sur Wikidata (pour la lecture humaine, nous avons adapté les noms d'entités et de propriétés). Les requêtes originales peuvent être trouvées sur le dépôt GitHub.

5.2.1 Objectif de la tâche

Pour chaque requête, l'objectif est de trouver un contexte d'identité qui permettra d'étendre la requête à des entités similaires. De cette façon, les utilisateurs peuvent bénéficier de résultats plus complets. Le flux de travail est le suivant (voir Figure 3) : dans un premier temps, à partir de la requête, nous extrayons l'entité (ou les entités) instanciée(s) qui sera (seront) la (les) graine(s) (étape 1). Ensuite, pour chaque graine, nous calculons son treillis d'identité (étape 2) qui contiendra dans chacun de ses nœuds un ensemble de propriétés indiscernables et de propagation (cf. algorithmes 1 et 3). Troisièmement, avec la propriété (ou l'ensemble de propriétés) instanciée liée à la graine dans la requête, nous sélectionnons dans le treillis le nœud ayant cette propriété dans son ensemble de propagation (étape 4). Ce nœud sera considéré comme le contexte d'identité de la requête. En effet, si plusieurs contextes d'identité sont possibles, l'utilisateur doit choisir celui qui convient le mieux à l'objet de sa tâche. Enfin, sur la base du contexte d'identité sélectionné, nous pouvons obtenir des entités similaires (étape 5) et réécrire la requête avec la graine et les entités similaires (étape 6).

8. http://gaia.infor.uva.es/hdt/wikidata/wikidata2018_09_11.hdt.gz

Requête	**Listing 2**	**Listing 4**	**Listing 5**
Graine	Paracetamol	France	Les Républicains
Ψ	research intervention	head of	member of political party
Π	condition treated, interacts with, legal status	capital, head of	country, political ideology
Entités similaires	Ibuprofen Aspirin	July Monarchy, French 3rd Republic, …	UMP, RPR, …
# résultats sans notre approche	586	12	2
# résultats avec notre approche	**860**	**99** (77)	**13**

TABLE 1 – Contribution du contexte d'identité sur les trois requêtes.

5.2.2 Requêtes

La première requête dans le Listing 2 concerne le médicament "Paracétamol". L'objectif de la requête est de récupérer tous les essais cliniques de ce médicament. Une extension intéressante de cette requête pourrait être de trouver tous les essais de médicaments légaux similaires en termes de conditions médicales traitées et d'interactions physiques.

```
SELECT DISTINCT ?clinicalTrial WHERE {
  ?clinicalTrial :researchIntervention
      :Paracetamol . }
```

Listing 2 – Requête SPARQL récupérant toutes les études sur l'analgésique nommé Paracétamol.

Le tableau 1 montre ce que notre approche peut apporter comme résultats supplémentaires. Les deuxième, troisième et quatrième colonnes correspondent respectivement aux Listing 2, 4 et 5. Pour la première requête (et aussi pour les suivantes), il n'y a qu'une seule graine "Paracétamol" (respectivement "France" et "les Républicains") car c'est la seule entité instanciée dans la requête. Pour remplir ce tableau, nous avons d'abord calculé le treillis de la graine, puis, sélectionné un contexte contenant la propriété "research intervention" dans son Ψ. Nous avons choisi comme contexte des médicaments légaux ayant les mêmes conditions médicales et les mêmes interactions physiques (évidemment, tout autre contexte pourrait être choisi en fonction des besoins des utilisateurs). Enfin, la requête est étendue avec des entités similaires comme indiqué dans Listing 3. Les résultats montrent une augmentation de 47 % du nombre d'essais cliniques pour le contexte considéré.

```
SELECT DISTINCT ?clinicalTrial WHERE {
  VALUES (?drug) {
    (:Paracetamol) (:Ibuprofen)
      (:Aspirin) }
  ?clinicalTrial :researchIntervention
      ?drug . }
```

Listing 3 – Expansion de la requête SPARQL en récupérant toutes les études sur les entités similaires au paracétamol dans le context d'identité choisi.

La deuxième requête, dans Listing 4, vise à retrouver les personnes qui ont autrefois dirigé la France. Cependant, la France a une histoire complexe et a changé de régime politique à plusieurs reprises (par exemple, pendant la Seconde Guerre mondiale, ou pendant la période napoléonienne). Ainsi, même si le territoire français a été presque toujours le même au cours des siècles passés, chaque régime politique a sa propre entité dans Wikidata. Il se peut donc que la requête ne donne pas tous les résultats escomptés. Mais si l'utilisateur choisit le bon contexte d'identité, c'est-à-dire $\mathcal{C}_{(\{capital,officialLanguage\},\{headOf\},\approx)}$ alors toutes les personnes attendues seront récupérées.

```
SELECT DISTINCT ?headOfState WHERE {
  ?headOfState :headOf :France . }
```

Listing 4 – Requête SPARQL récupérant toutes les personnes qui ont été à la tête de l'État français moderne.

Comme pour la requête sur "Paracétamol", nous avons calculé le treillis et cherché le contexte avec *headOf* dans les propriétés de propagation. Les résultats sont indiqués dans la troisième colonne de Table 1. L'expansion de la requête est réalisée comme pour la précédente. Il est à noter que parmi les 99 résultats, 22 personnes n'étaient pas à la tête de la France. 14 étaient en réalité à la tête du conseil municipal de Paris et 8 étaient Grand Maître d'une obédience maçonnique en France. Cela est dû au fait que le conseil et l'obéissance sont mal placés dans l'ontologie de Wikidata. Ces erreurs ne peuvent donc pas être attribuées à notre approche. Les résultats montrent une augmentation de 542 % du nombre de dirigeants français pour le contexte considéré.
Enfin, dans Listing 5, nous présentons une requête sur les politiciens français du parti Les Républicains qui ont été condamnés. La particularité ici est que cet important parti politique a changé plusieurs fois de nom, soit à cause de scandales politiques, soit à cause de défaites humiliantes. Par conséquent, si le graphe de connaissances n'est pas à jour ou n'est pas complet, certaines personnes qui ont été membres de plusieurs versions de ce parti dans le monde réel pourraient ne pas être effectivement liées à chacune de ces versions dans le graphe de connaissances. C'est le cas de Wikidata qui renvoie, pour la requête de Listing 5, seulement deux politiciens. Cependant, il y a plus d'une douzaine de politiciens de ce parti qui ont été condamnés pour divers crimes. En utilisant notre approche, il est possible de sélectionner un contexte composé de l'alignement politique et du pays pour lequel la propriété *memberOf* se propage, et, par conséquent, d'obtenir un résultat plus complet (bien sûr en fonction de l'exhaustivité des données sur les hommes politiques dans Wikidata).

```
SELECT DISTINCT ?politician ?crime
WHERE { ?politician :memberOf
      :TheRepublicans ;
      :convictedOf ?crime . }
```

Listing 5 – La requête SPARQL récupère tous les politiciens membres du parti français Les Républicains qui ont été condamnés.

Les mêmes étapes que pour les requêtes concernant le "Paracétamol" et la "France" ont été reproduites. Les résultats sont présentés dans la quatrième colonne de Table 1. Les résultats montrent une augmentation de 550 % du nombre de politiciens condamnés pour le contexte considéré.

5.3 Discussion

Comme nous l'avons vu, notre approche permet de découvrir des propriétés de propagation pour un ensemble donné de propriétés indiscernables Π. Un contexte d'identité avec ses ensembles d'indiscernabilité et de propagation peut fournir des réponses plus complètes aux requêtes grâce à l'expansion des requêtes. Les résultats sont très prometteurs, mais il faut les confronter à d'autres types de graphes de connaissances et à des combinaisons de graphes de connaissances distincts. En outre, notre approche ne fonctionne pas bien lorsque la propriété d'une entité manque de propriété la décrivant en langage naturel (comme *rdfs :comment* ou *schema :description*). Il s'agit d'une limitation puisque de nombreuses ontologies ne fournissent pas de descriptions textuelles de leurs propriétés. Par conséquent, une première étape pour les travaux futurs consiste à contourner cette faille par une approche à multiples composantes. De plus, dans une description textuelle, certains mots peuvent ne pas être pertinents (comme un identifiant Wikidata) et dégrader la qualité des résultats.

6 Conclusion et travaux futurs

Dans ce papier, nous avons proposé une approche fondée sur le plongement de phrases pour découvrir les propriétés propageables pour un ensemble de propriétés indiscernables données. Notre approche calcule, pour une entité, un treillis d'identité qui représente tous les contextes d'identité possibles de l'entité, c'est-à-dire les ensembles d'indiscernabilité et leurs ensembles de propagation respectifs.
Quelques limitations de notre approche nécessitent des investigations supplémentaires. En effet, seules les propriétés ayant une description textuelle peuvent être traitées. Utiliser d'autres caractéristiques, par exemple la valeur des propriétés, le nombre d'utilisations des propriétés ou leurs caractéristiques sémantiques, est donc essentiel pour améliorer les résultats. Cependant, capturer les informations ontologiques d'une propriété lors d'un plongement reste un problème ouvert. De plus, utiliser seulement une technique de plongement de phrases combinée avec l'intuition de la première loi de Tobler est peut-être trop naïf dans certains

©AfIA 2020

cas. Par conséquent, il est aussi nécessaire de remettre en question notre travail en combinant aussi des graphes de connaissances distincts. Pour l'instant, nous ne considérons dans le treillis que le cas où l'entité est le sujet d'un triplet, il nous faudrait donc essayer aussi de traiter les triplets dans l'autre sens. Pour finir, nous souhaitons proposer un prototype plus complet, automatisant au maximum ce qui peut l'être, pour permettre à l'utilisateur de sélectionner facilement le contexte lui permettant d'obtenir de meilleurs résultats de requête. Par exemple, l'expansion de la requête est réalisée manuellement après le calcul automatique du contexte d'identité. Il serait aussi intéressant d'utiliser RDF* et SPARQL* ([12]) pour représenter le contexte d'identité tel que défini dans ce papier.

Références

[1] Manel Achichi, Zohra Bellahsene, and Konstantin Todorov. A survey on web data linking. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information-Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, 2015.

[2] Wouter Beek, Stefan Schlobach, and Frank van Harmelen. A contextualised semantics for owl : sameas. In *ESWC*, 2016.

[3] Piotr Bojanowski, Edouard Grave, Armand Joulin, and Tomas Mikolov. Enriching word vectors with subword information. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 5 :135–146, 2017.

[4] Daniel Cer, Yinfei Yang, Sheng-yi Kong, Nan Hua, Nicole Limtiaco, Rhomni St. John, Noah Constant, Mario Guajardo-Cespedes, Steve Yuan, Chris Tar, Yun-Hsuan Sung, Brian Strope, and Ray Kurzweil. Universal sentence encoder. *CoRR*, abs/1803.11175, 2018.

[5] Alexis Conneau, Douwe Kiela, Holger Schwenk, Loïc Barrault, and Antoine Bordes. Supervised learning of universal sentence representations from natural language inference data. In *EMNLP*, pages 670–680. Association for Computational Linguistics, 2017.

[6] Li Ding, Joshua Shinavier, Tim Finin, and Deborah L McGuinness. owl : sameas and linked data : An empirical study. 2010.

[7] Nick Drummond and Rob Shearer. The open world assumption. In *eSI Workshop : The Closed World of Databases meets the Open World of the Semantic Web*, volume 15, 2006.

[8] Javier D. Fernández, Miguel A. Martínez-Prieto, Claudio Gutiérrez, Axel Polleres, and Mario Arias. Binary rdf representation for publication and exchange (hdt). *Web Semantics : Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 19 :22–41, 2013.

[9] Alfio Ferrara, Andriy Nikolov, and François Scharffe. Data linking for the semantic web. *International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS)*, 7(3) :46–76, 2011.

[10] Nicola Guarino and Christopher A. Welty. Evaluating ontological decisions with ontoclean. *Commun. ACM*, 45(2) :61–65, 2002.

[11] Harry Halpin, Patrick J Hayes, James P McCusker, Deborah L McGuinness, and Henry S Thompson. When owl : sameas isn't the same : An analysis of identity in linked data. In *International Semantic Web Conference*, pages 305–320. Springer, 2010.

[12] Olaf Hartig and Bryan Thompson. Foundations of an alternative approach to reification in rdf. *ArXiv*, abs/1406.3399, 2014.

[13] Ian Horrocks, Oliver Kutz, and Ulrike Sattler. The even more irresistible sroiq. *Kr*, 6 :57–67, 2006.

[14] Al Koudous Idrissou, Rinke Hoekstra, Frank van Harmelen, Ali Khalili, and Peter Van den Besselaar. Is my : sameas the same as your : sameas ? : Lenticular lenses for context-specific identity. In *K-CAP*, 2017.

[15] Miguel A. Martínez-Prieto, Mario Arias, and Javier D. Fernández. Exchange and consumption of huge rdf data. In *The Semantic Web : Research and Applications*, pages 437–452. Springer, 2012.

[16] Tomas Mikolov, Kai Chen, Gregory S. Corrado, and Jeffrey Dean. Efficient estimation of word representations in vector space. *CoRR*, abs/1301.3781, 2013.

[17] Markus Nentwig, Michael Hartung, Axel-Cyrille Ngonga Ngomo, and Erhard Rahm. A survey of current link discovery frameworks. *Semantic Web*, 8(3) :419–436, 2017.

[18] Natalya Fridman Noy, Yuqing Gao, Anshu Jain, Anant Narayanan, Alan Patterson, and Jamie Taylor. Industry-scale knowledge graphs : lessons and challenges. *Commun. ACM*, 62(8) :36–43, 2019.

[19] Jeffrey Pennington, Richard Socher, and Christopher D. Manning. Glove : Global vectors for word representation. In *EMNLP*, 2014.

[20] Joe Raad, Nathalie Pernelle, and Fatiha Saïs. Detection of contextual identity links in a knowledge base. In *K-CAP*, 2017.

[21] Petar Ristoski and Heiko Paulheim. Rdf2vec : Rdf graph embeddings for data mining. In *International Semantic Web Conference*, 2016.

[22] Amit Singhal. Modern information retrieval : A brief overview. *IEEE Data Eng. Bull.*, 24(4) :35–43, 2001.

[23] Sandeep Subramanian, Adam Trischler, Yoshua Bengio, and Christopher J. Pal. Learning general purpose distributed sentence representations via large scale multi-task learning. *CoRR*, abs/1804.00079, 2018.

[24] Waldo R Tobler. A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic geography*, 46(sup1) :234–240, 1970.

Analyse des performances d'algorithmes DCOP pour l'association d'utilisateurs de réseaux HetNets

G. Picard[1,2] P. Rust[3]

[1] Institut Henri Fayol, MINES Saint-Etienne, France
[2] Univ Lyon, CNRS, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, Saint Etienne, France
[3] Orange Labs, France

picard@emse.fr
pierre.rust@orange.com

Résumé

Cet article étudie l'applicabilité des techniques d'optimisation sous contraintes distribuée (DCOP) dans le cadre des réseaux radios hétérogènes (HetNets). Nous nous intéressons plus particulièrement au problème de l'association des terminaux utilisateurs aux stations de base, dont l'objectif est de déterminer quel utilisateur (e.g. téléphone mobile) est associé à quelle station de base pour créer un canal de communication. Toutes les stations ne garantissent pas les mêmes qualités de service et d'expérience aux utilisateurs, et la qualité de l'allocation finale (e.g. le débit total obtenu) est un critère à maximiser. Nous présentons ici un modèle DCOP de ce problème d'association, qui se base sur une agentification des stations de base se coordonnant pour obtenir une allocation efficace. Nous évaluons les performances d'algorithmes légers (MGM, MGM-2, DSA) sur un environnement simulé réaliste. Leurs performances sont comparées à celles d'une solution optimale, ainsi qu'à celle de la politique d'association actuellement utilisée dans ces réseaux, à savoir maxSINR.

Mots-clés

DCOP, HetNet, Allocation de ressources, SINR

Abstract

We studiy the applicability of distributed constrained optimization techniques (DCOP) to heterogeneous radio networks (HetNets). We are interested in the problem of associating user terminals to base stations. The objective is to determine which user (e.g. mobile phone) is associated to which base station to create a communication channel. Not all stations guarantee the same quality of service and experience to users, and the quality of the final allocation (e.g. the total throughput obtained) is a criterion to be maximized. We present here a DCOP model of this association problem, which is based on an agentification of base stations coordinating to obtain an efficient allocation. We evaluate the performance of lightweight algorithms (MGM, MGM-2, DSA) on a realistic simulated environment. Their performances are compared to those of an optimal solution, as well as to those of the association policy currently used in these network.

Keywords

DCOP, HetNet, Resource allocation, SINR

1 Introduction

Dans le contexte des réseaux de communication 5G, l'infrastructure sans fil est constituée de multiples stations de base (antennes émettrices et réceptrices) auxquels les utilisateurs du réseau sont associés pour obtenir un canal de communication et ainsi se connecter au réseau et à Internet. Les stations de base ayant des propriétés différentes (puissance, gain, portée, etc.), on parle alors de réseaux hétérogènes, ou *HetNet*. La plupart des infrastructures cibles considèrent des réseaux à plusieurs tiers –e.g. 3 tiers, avec des stations *macro* à longue portée, des station *pico* à moyenne portée, et des stations *femto* à courte portée, comme illustré dans la Figure 1. Associer les utilisateurs à des stations de base est un problème d'allocation difficile, dont les objectifs peuvent être de maximiser le signal reçu par chaque utilisateur (pour maximiser sa qualité d'expérience), et de répartir la charge sur les stations de base afin de ne pas réduire le débit par station. Compte tenu de la mobilité des usagers, et donc de la nécessité de fournir des solutions de manière réactive, les approches par optimisation centralisée sont presque inapplicables dans ce contexte.

Nous proposons ici d'évaluer les performances des algorithmes d'optimisation sous contraintes distribuée (DCOP) à ce problème, naturellement distribuable et modélisable comme un système multi-agent. Ici, les stations de base se coordonnent via un algorithme d'optimisation sous contraintes distribuée, pour déterminer quels utilisateurs elles vont servir. L'objectif ici est de maximiser globalement le débit total fourni aux usagers. L'approche classique pour résoudre de tels problèmes d'allocation, pour évaluer la qualité des autres approches, est de suivre une approche par programmation mathématique et optimisation en nombres entiers [11]. Du point de vue applicatif, compte tenu de la difficulté à résoudre de tels problèmes en temps réel, des approches heuristiques sont utilisées, et principalement l'approche gloutonne maxSINR [12] qui consiste à associer le terminal à la station exhibant le meilleur rapport signal sur interférence plus bruit (SINR). Cependant, cette approche à le désavantage d'associer les usagers en priorité aux stations de hauts tiers (e.g. macro), et ainsi les surcharger, provoquant éventuellement des problèmes de connexion. A notre connaissance, seul [8] propose une approche par DCOP pour s'attaquer à ce problème d'allocation, mais fait le choix

©AfIA 2020

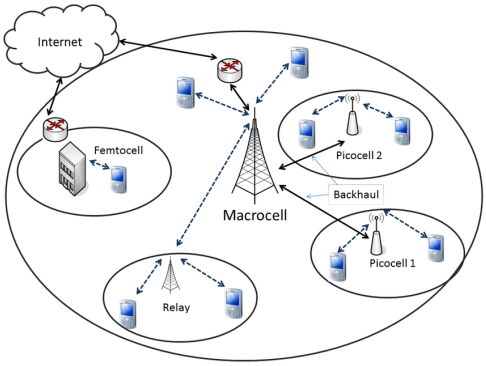


FIGURE 1 – Architecture d'un réseau radio hétérogène à trois tiers (macro, pico, femto) [4]

d'un algorithme complet, BnB-ADOPT, sans évaluer les performances d'algorithmes plus légers, comme MGM ou DSA. Nous proposons ainsi, dans cette étude, d'élargir nos connaissances sur l'applicabilité des DCOPs à ce problème.
Cet article est structuré comme suit. Le modèle et les algorithmes DCOP principalement utilisés dans la suite sont brièvement introduits en Section 2. Le problème d'association d'utilisateurs dans les HetNets, ainsi que le modèle du système sont présentés en Section 3. La modélisation de ce problèmes dans le formalisme DCOP y est également détaillé. La section 4 expose le protocole expérimental ainsi qu'une analyse des résultats obtenus sur un environnement simulé réaliste suivant les scénarios proposés dans la littérature du domaine [8, 2]. Enfin, l'article se conclut autour des perspectives offertes par cette investigation en Section 5.

2 Optimisation sous contraintes distribuée

Cette section introduit brièvement le cadre des DCOPs, ainsi que les algorithmes que nous allons utiliser.

2.1 Modèle canonique

Une façon de modéliser un problème distribué d'allocation de ressources est de le formaliser comme un problème d'optimisation distribuée sous contraintes (DCOP) [18].

Définition 1. *Un* problème d'optimisation sous contraintes distribué *(ou DCOP pour* Distributed Constraint Optimization Problem*) est un tuple* $P = \langle \mathcal{A}, \mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{C}, \mu, f \rangle$*, où :* $\mathcal{A} = \{a_1,...,a_m\}$ *est l'ensemble d'agents ;* $\mathcal{X} = \{x_1,...,x_n\}$ *sont les variables appartenant aux agents ;* $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}_{x_1},...,\mathcal{D}_{x_n}\}$ *est un ensemble de domaines finis tels que la variable* x_i *prend ses valeurs dans* $\mathcal{D}_{x_i} = \{v_1,...,v_{|\mathcal{D}_{x_i}|}\}$*;* $\mathcal{C} = \{c_1,...,c_k\}$ *est un ensemble de contraintes souples, où chaque* c_i *définit une utilité* $\in \mathbb{R} \cup \{-\infty\}$ *pour chaque combinaison d'affectation de valeurs au sous-ensemble de variables impliquées ;* $\mu : \mathcal{X} \to \mathcal{A}$ *est une application associant les variables à leur agent.* $f : \prod \mathcal{D}_{x_i} \to \mathbb{R}$ *est une fonction objectif, représentant le coût global d'une affectation de valeurs aux variables.*

L'objectif d'optimisation est représenté par la fonction f, qui peut être de différente nature. En général, cette fonction est une somme des coûts des contraintes : $f = \sum_i c_i$.

Définition 2. *Une* solution *à un DCOP* P *est une affectation de valeurs à toutes les variables. Une solution est dite* optimale *si elle maximise* f.

Notons que la notion d'utilité peut être substituée par la notion de coût $\in \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$. Dans ce cas, résoudre un DCOP consiste à minimiser la somme totale des coûts. De plus, il est possible d'intégrer des contraintes dures (comme dans le cas de la satisfaction) en leur attribuant un coût infini en cas de violation.
Comme souligné par [10], les DCOP ont été largement étudiés et appliqués à de nombreux domaines de référence. Ils présentent de nombreuses propriétés intéressantes : (i) focus sur des approches décentralisées où les agents négocient une solution jointe au travers d'échanges locaux de messages ; (ii) exploitation de la structure du domaine (en l'encodant dans des contraintes) pour s'attaquer à des problèmes computationnels difficiles ; (iii) grande variété de méthodes de résolution allant de méthodes exactes à des techniques heuristiques et approchées ; comme, par exemple, ADOPT [17], DPOP [18], MaxSum [9], DSA [24] ou MGM [15], pour ne citer que les plus connus.

2.2 Algorithmes

De nombreux algorithmes de résolution de DCOP existent et se distinguent par leur type de processus de résolution (recherche/inférence), leur complétude (optimal/approché), ou leur parallélisme (synchrone/asynchrone) [10]. De plus, certains algorithmes vont être capables de gérer mieux que d'autres certains types de contrainte ; e.g. les algorithmes par inférence, comme MaxSum et DPOP, nécessitent une mémoire exponentielle dans l'arité des contraintes, donc seront peu adaptés à des problèmes présentant des contraintes qui impliquent un grand nombre de variables. Nous allons utiliser dans cet article deux algorithmes approchés classiques, et très légers (en charge de calcul et en quantité d'information échangée), à savoir DSA [24] et MGM [15].
DSA. Plus qu'un simple algorithme, DSA (*Distributed Stochastic Algorithm*) est une famille d'algorithmes incomplets de recherche locale, très légers, basée sur une idée assez simple : les agents partent d'une valeur aléatoire de leur domaine et évaluent régulièrement si la qualité de leur propre affectation partielle, définie comme la sommes des contraintes dans lesquelles elle est impliquée, pourrait être améliorée en sélectionnant une nouvelle valeur [24]. Cette évaluation est basée sur la connaissance des valeurs actuellement sélectionnées par leurs voisins. Si cette qualité peut être améliorée, l'agent décide aléatoirement, avec une probabilité d'activation p, de sélectionner la valeur correspondante et d'envoyer son état actualisé à ses voisins. Ce processus de recherche est local, car les agents ne fondent leur décision que sur leur connaissance des valeurs de leurs voisins directs. Bien sûr, cet algorithme de recherche locale peut être piégé dans un minimum local (même si la stochasticité de DSA l'aide parfois à échapper à ce minimum local) et ne garantit pas de trouver la solution optimale. Bien que ce ne soit pas strictement le cas, la DSA est un algorithme itératif et peut être utilisée pour obtenir une affectation complète à tout moment, en temps réel, avec une qualité de solution s'améliorant, en moyenne, au fil du temps. Cependant, dans le cas général, DSA ne fournit aucune garantie de monotonie : comme il n'y a pas de coordination

dans le processus de décision et que les connaissances locales d'un agent peuvent être dépassées, deux agents peuvent prendre simultanément des décisions contradictoires, ce qui entraîne une diminution de la qualité du résultat global.
Cinq variantes – à savoir DSA-A, DSA-B, DSA-C, DSA-D et DSA-E – de ce principe de base ont été étudiées [24], en fonction de la stratégie utilisée pour le changement de valeurs. Un agent peut sélectionner une nouvelle valeur de manière plus ou moins agressive, lorsque la qualité de son état peut être améliorée, strictement ou non, et lorsque des conflits subsistent même si la qualité ne peut être améliorée. Ces variantes présentent divers degrés de parallélisme et d'exploration de l'espace des solutions. L'approche DSA-B est considérée comme la plus efficace dans le cas général, mais nécessité une pré-exploration de l'espace des solutions. Il a également été démontré dans [24] que la valeur utilisée pour la probabilité d'activation p a une influence considérable sur l'efficacité et la qualité de DSA et présente une propriété de transition de phase. Lorsque la bonne variante et la bonne probabilité d'activation ont été sélectionnées pour une classe de problèmes donnée, DSA fournit des résultats de très bonne qualité, avec une charge de réseau et de calcul minimale, ce qui la rend très évolutive. Il convient de noter que la DSA est capable de travailler avec des contraintes n-aires sans aucune modification.
MGM. MGM (*Maximum Gain Message*) est une modification de l'algorithme DBA qui se concentre sur la transmission du message à gain maximal [15, 14]. Comme le DSA, MGM est un algorithme de recherche locale incomplète qui peut gérer des contraintes n-aires. MGM est un algorithme synchrone : à chaque tour, les agents calculent le changement maximal de qualité, appelé *gain*, qu'ils pourraient obtenir en sélectionnant une nouvelle valeur et envoient ce gain à leurs voisins. Un agent n'est alors autorisé à changer sa valeur que si son gain est supérieur à celui reçu de tous ses voisins. Ce mécanisme garantit que deux variables impliquées dans la même contrainte ne changeront jamais leur valeur dans le même cycle. Ce processus se répète jusqu'à ce qu'une condition de terminaison soit remplie. Bien qu'il ne fournisse aucune limite à la qualité de la solution, MGM est en mesure de garantir la monotonie ; l'élimination de l'aspect stochastique de la DSA garantit que la qualité de la solution ne s'améliore qu'avec le temps. La monotonie est une qualité très intéressante dans de nombreux domaines d'application, cependant, cette qualité est garantie au détriment d'une tendance plus élevée à se retrouver piégée dans un minima local. Pour atténuer ce problème, [15] propose une version coordonnée de MGM (généralement MGM-2, mais elle peut être étendue à MGM-k), où k agents peuvent coordonner un changement simultané (c'est-à-dire dans le même cycle) de valeurs. Cela permet d'éviter certains minima locaux tout en préservant la monotonie de l'algorithme.

3 Modèle du problème d'association

Cette section introduit le problème d'association dans les HetNet et détaille le modèle du système ainsi que sa physique. Une formulation DCOP est alors proposée pour ce problème.
Le problème d'association d'utilisateurs peut être formulé comme un problème d'allocation de ressources distribuées dans lequel une ressource unitaire se réfère à un bloc de ressources (RB) qui couvre une certaine plage de fréquence et une

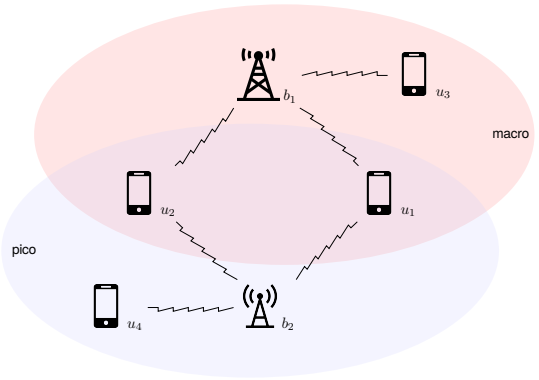


FIGURE 2 – Exemple de configuration de HetNet, avec 4 utilisateurs et 2 stations de base sur 2 tiers

certaine durée [25]. Pour obtenir une bonne qualité de service, un utilisateur devra réserver plusieurs blocs sur une station, dans la limite disponible. En effet, la qualité de service est proportionnelle au nombre de blocs réservés. Le nombre de blocs à réserver dépend de la puissance de la station et de la position de l'utilisateur par rapport à la station, à cause des pertes de signal.
Ces dernières années, des efforts de recherche importants ont été consacrés au développement de méthodes distribuées, en particulier des méthodes fondées sur la théorie des jeux et des méthodes d'optimisation combinatoire [3, 13, 11, 23]. Ici, la formulation du modèle de système s'inscrit dans le cadre de la programmation mixte non convexe en nombres entiers [11], qui est toujours NP-difficile. La manière d'obtenir la solution est souvent très coûteuse. Les résultats de simulation dans [3] et [23] montrent que la performance des méthodes dans les schémas basés sur la théorie des jeux et l'optimisation combinatoire est meilleure que certaines méthodes géométriques, par exemple maxSINR. Cependant, ces deux approches – théorie des jeux, et optimisation combinatoire – sont limitées par le fait qu'un HetNet est un système dynamique dans lequel le nombre d'utilisateurs et la configuration de la ressource varient fréquemment dans les stations de base.

3.1 Modèle du système

Reprenant le modèle de [8], un tier dans le HetNet indique une macrocellule, une picocellule ou une femtocellule où chaque niveau contient un ensemble de stations de base ayant les mêmes configurations (puissance d'émission et ressource). La ressource configurée au niveau d'une station de base fait référence à un ensemble de blocs de ressources (RB) où chaque RB est constitué d'une certaine durée et d'une certaine largeur de bande [7]. Considérons un HetNet à k tiers comprenant des stations de base $\mathcal{B}=\{b_1,...,b_{|\mathcal{B}|}\}$ et des utilisateurs $\mathcal{U}=\{u_1,...,u_{|\mathcal{U}|}\}$, comme illustré en Figure 2. Notons N_i le nombre de blocs maximal sur b_i. En supposant que les informations sur l'état du canal soient disponibles au niveau des stations de base, les stations de base de différents niveaux se partagent également la largeur de bande totale, de sorte qu'il y a des brouillages à la fois intra- et inter-niveaux lorsque les stations de base attribuent instantanément des blocs aux utilisateurs. Le rapport signal sur bruit plus interférence (SINR) vécu par l'utilisateur u_j servi par b_i dans

©AfIA 2020

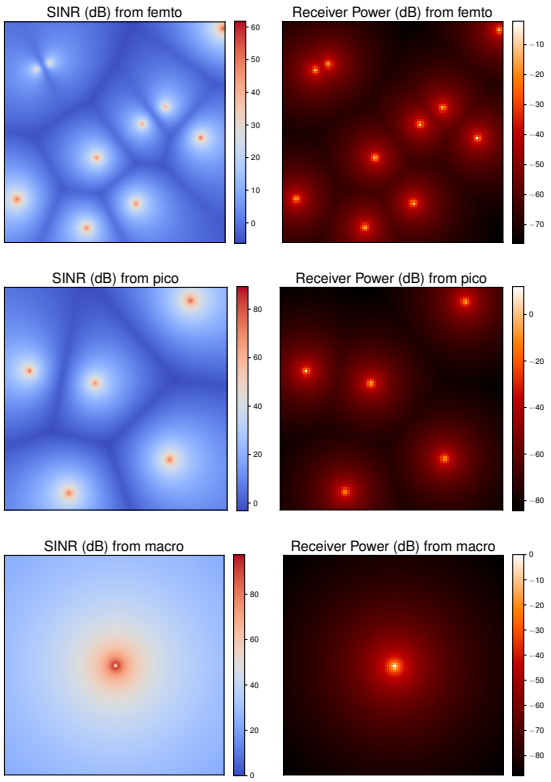


FIGURE 3 – SINR et puissance reçus en chaque point de l'environnement pour les différents tiers d'une infrastructure

le $k$ième tier, illustré en Figure 3, est donné par :

$$\text{SINR}_{ij} = \frac{P_k g_{ij}}{\sum_{b_l \neq b_i} P_k g_{lj} + BN_0} \tag{1}$$

où P_k est la puissance d'émission pour les stations de base du $k$ième tier, g_{ij} est le gain de puissance du canal entre u_j et b_i, B est la largeur de bande et N_0 est la densité spectrale de puissance de bruit. Le gain de puissance du canal comprend l'effet de l'affaiblissement du signal et son évanouissement. On suppose que l'affaiblissement sur le trajet est statique et que son effet est pris en compte dans la valeur moyenne du gain de puissance du canal, tandis que les évanouissements sont supposés suivre la distribution exponentielle. Ensuite, l'efficacité de l'utilisateur u_j associé à la station b_i, notée e_{ij} est :

$$e_{ij} = \log_2(1 + \text{SINR}_{ij}) \tag{2}$$

En considérant la largeur de bande B, la durée T et l'intervalle de planification Γ configurés pour chaque RB, on obtient le taux unitaire à u_j sur un RB suivant :

$$q_{ij} = \frac{BTe_{ij}}{\Gamma} \tag{3}$$

et ainsi le taux reçu par u_j avec n_{ij} blocs réservés sur b_j du $k$ième tier est :

$$r_{ij} = n_{ij} q_{ij} \tag{4}$$

La qualité de service (QoS) de chaque utilisateur est alors exprimée comme le taux total minimum que l'utilisateur pourra obtenir. En posant γ le taux minimal accepté par les utilisateur (e.g. on n'accepte que des services à 50 Mbps), nombre minimum de blocs requis est estimé à :

$$n^{ij}_{\text{min}} = \lceil \frac{\gamma}{q_{ij}} \rceil \tag{5}$$

Maintenant que le modèle physique et les définitions du HetNet ont été posées, nous présentons une formulation DCOP de ce problème.

3.2 Formulation DCOP

Pour définir un DCOP, il faut spécifier le tuple $\langle \mathcal{A}, \mathcal{X}, \mathcal{D}, \mathcal{C}, \mu, f \rangle$. Les variables de décision pour une station sont l'ensemble des décisions de servir ou non chaque utilisateur. Notons x_{ij} le nombre de blocs alloués à u_j par b_i, et donc $\mathcal{X} = \{x_{ij} \mid b_i \in \mathcal{B}_j, u_j \in \mathcal{U}\}$, où $\mathcal{B}_j$ est l'ensemble des stations considérées par u_j, et donc nous considérons des domaines binaires $\mathcal{D}_{ij} = \{0, n^{ij}_{\text{min}}\}$. Potentiellement, $\mathcal{B}_j = \mathcal{B}$, mais comme proposé dans [8], pour des raisons de simplification, $\mathcal{B}_j$ peut être l'ensemble des η meilleures stations perçues par u_j du point de vue du SINR, noté $\mathcal{B}^\eta_j$. Les contraintes du DCOP, doivent assurer que le nombre de blocs utilisés sur chaque station ne dépasse pas la capacité maximale (contraintes intra-stations regroupées dans $\mathcal{C}_{\text{intra}}$), et que chaque utilisateur soit connecté à au plus une station (contraintes inter-stations regroupées dans $\mathcal{C}_{\text{inter}}$). On a l'ensemble des contraintes du DCOP $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{\text{intra}} \cup \mathcal{C}_{\text{inter}}$. Avec ψ_i l'ensemble des utilisateurs intéressés par b_i, on a $\forall c^j_{\text{intra}} \in \mathcal{C}_{\text{intra}}$:

$$R(c^j_{\text{intra}}) = \begin{cases} -\infty & \text{si } \sum_{u_j \in \psi_i} x_{ij} > R_i \\ \sum_{u_j \in \psi_i} r_{ij} & \text{sinon} \end{cases} \tag{6}$$

et $\forall c^i_{\text{inter}} \in \mathcal{C}_{\text{inter}}$:

$$R(c^i_{\text{inter}}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_{u_j \in \psi_i} \frac{x_{ij}}{n^{ij}_{\text{min}}} \leq 1 \\ -\infty & \text{sinon} \end{cases} \tag{7}$$

Enfin, on obtient l'équation suivante pour l'objectif du DCOP :

$$\sum_{c \in \mathcal{C}} R(c) = \sum_{u_j \in \mathcal{U}} \sum_{b_i \in \mathcal{B}_j} r_{ij} \tag{8}$$

La fonction objectif f est donc ici est la somme des taux atteints chez tous les utilisateurs, ce qui peut être considéré comme une mesure du débit dans le HetNet. Ainsi, plus $R(c)$ est grand, plus le débit devrait être bon. Enfin, le dernier choix déterminant est celui de l'ensemble des agents. Une approche intuitive est de considérer les stations comme étant des agents qui vont se coordonner pour savoir quels utilisateurs servir, car elles sont capables de rapidement communiquer entre elles, contrairement aux utilisateurs. Ainsi, ici $\mathcal{A} = \mathcal{B}$. Ce modèle est illustré en Figure 4.

Cette formulation est assez simple, cependant, la présence de contraintes n-aires est une limitation assez importante pour les algorithmes DCOP par inférence, comme MaxSum ou DPOP, qui deviennent inapplicables quand n est grand car ils reposent sur le calculs de tables de coûts de taille exponentielle en l'arité des contraintes. En effet, les contraintes intra seront connectées à autant de variables que d'utilisateurs intéressés par une station, et dans le cas d'une station macro, elle risque de devoir gérer les demandes de tous les utilisateurs, puisqu'elle proposera un très bon débit. De plus, les contraintes

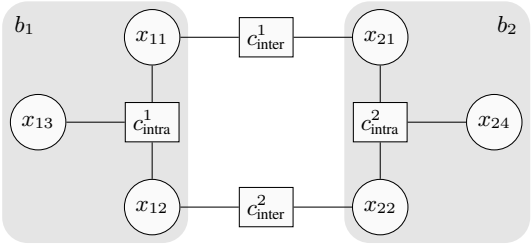


FIGURE 4 – Représentation graphique du DCOP pour le problème de la Figure 2

inter connectent autant de variables que de stations intéressant un utilisateur donné, donc potentiellement toutes les stations. Cette limitation des contraintes inter peut cependant être contournée par la fixation du paramètre η à un nombre limité de stations candidates par utilisateur, e.g. 2 ou 3 dans [8].

3.3 À propos d'une formulation binaire

Deux techniques pour binariser des contraintes sont (i) l'ajout de variables (dites cachées) pour chaque contrainte n-aire et de contraintes binaires ou (ii) l'approche duale consistant à remplacer les contraintes par des variables (dite duales) et les variables initiales (dites primales) par des contraintes binaires [1]. Cependant, les nouvelles variables créées ont des domaines qui représentent toutes les combinaisons faisables des valeurs des n variables impliquées dans la contrainte : les valeurs de ces variables sont des vecteurs de taille n. Ainsi, la taille du domaine d'une variable duale représentant une contrainte n-aire est de taille 2^n.

Dans le cadre des contraintes sur variables binaires, une solution efficace pour stocker ces domaines de taille exponentielle consiste à utiliser les diagrammes de décision binaire (ou BDD) [5, 8], c.-à-d. représenter toutes les combinaisons possibles sous la forme d'un graphe orienté non cyclique, compression de l'arbre représentant toutes ces combinaisons. Ainsi, au lieu de stocker une très longue liste de valeurs, on stocke un automate sur lequel on peut itérer pour obtenir les valeurs du domaine. Cependant, cette technique requiert de compiler les contraintes pour générer les BDDs. Cette opération prend un temps exponentiel dans le nombre de variable dans le pire des cas, et les temps de compilation sont incompatibles avec une utilisation en cours de fonctionnement (prenant plusieurs minutes pour 30 variables, alors qu'ici nous avons jusqu'à $|\mathcal{U}| = 200$).

Ainsi, nous considérons qu'une formulation avec contraintes binaires est inenvisageable dans notre cas.

4 Analyse des performances des algorithmes DCOP

Maintenant que nous avons défini, le problème d'association des utilisateurs dans un HetNet, et sa formulations DCOP, nous allons évaluer les performances de divers algorithmes de la littérature à même de résoudre ces problèmes en un temps raisonnable.

4.1 Cadre expérimental

Nous considérons ici le HetNet à 3 tiers illustré dans la Figure 3, avec 1 station macro, 5 stations pico, et 10 stations femto, inspiré des scénarios de la littérature [8, 2]. Les puissances de transmission de ces stations sont de 40, 35 et 24 dBm, respectivement. L'environnement consiste en un carré de 1000 m$\times$ 1000 m. La macro station est située au centre, et les autres stations sont positionnées aléatoirement par échantillonnage par hypercube latin [16]. Ici, nous considérerons un nombre d'utilisateurs aléatoirement positionnés souhaitant accéder au réseau dans $|\mathcal{U}| \in \{50,100,150,200\}$. Avec $|\mathcal{U}| \geq 100$, le réseau est surchargé, et des utilisateurs seront non servis dans tous les cas. Le modèle de perte de puissance de signal entre une station macro ou pico et les utilisateurs est défini comme $L(d) = 34+40\log_{10}d$, avec d la distance en mètres entre la station et l'utilisateur. De même, pour les stations femto avec $L(d) = 37+30\log_{10}d$. La puissance du bruit est -111.45 dBm, qui est le bruit thermique à la température dans une pièce, avec une largeur de bande de 180kHz. L'intervalle de temps de l'équation (3) est $t = 1$ seconde et $\Gamma = 1$. Le nombre de blocs disponibles est de 100 pour les stations macro, 50 pour les stations pico, et 25 pour les stations femto. Nous considérons $\eta \in \{1,2,3\}$. Les algorithmes suivants sont évalués : (i) allocation optimale, avec CPLEX, en formulant le DCOP n-aire sous forme de programme linéaire en nombres entiers ; (ii) allocation par maxSINR, ce qui revient pour chaque utilisateur à s'associer à la station disponible ayant le maximum de SINR (en cas de non disponibilité, l'utilisateur passe à un second choix, etc.) ; (iii) allocation par maxRSS, équivalent à maxSINR, mais avec la puissance sans interférence ni bruit comme critère de choix ; (iv) minDist, équivalent à maxSINR, mais avec la distance comme critère de choix ; (v) MGM ; (vi) MGM-2 ; (vii) DSA-C (probabilité fixée à 0.3) [1]. Nous avons réduit l'étude à ces algorithmes car les algorithmes DCOP optimaux, n'ont pas fourni de résultats en un temps acceptable (timeout de 60s). Pour chaque valeur de η et de N, nous générons 20 instances de DCOP, et chaque instance est résolue 10 fois par chaque algorithme DCOP, partant de l'allocation obtenue par maxSINR. Les autres algorithmes étant déterministes, ils ne sont appliqués qu'une seule fois. Nous affichons la moyenne et l'écart-type (parfois très faible donc peu visible) des mesures sur ces 20 ou 200 instances. MGM, MGM-2 et DSA ont été paramétrés pour fournir des solutions au bout de 20 itérations. Les calculs ont été effectués sur une machine avec processeur de type Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1603 v3 @ 2.80GHz et 32GiB de mémoire, en utilisant la librairie pyDCOP [21, 20], des codes écrits en Python 3.8, excepté pour les solutions optimales calculées avec CPLEX version 12.61 [6] en utilisant l'API Python via la librairie PuLP [19].

4.2 Analyse des performances

La Figure 5 présente la charge moyenne de chaque station de base pour chaque configuration et chaque algorithme. Comme précisé dans la littérature, maxSINR implique une forte charge sur la station macro, puis, lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la charge se déporte sur les stations de tiers inférieurs. Tous les algorithmes présentent ce comportement,

1. Cette configuration de DSA a été celle présentant les meilleurs résultats parmi la famille DSA sur ce problème

©AfIA 2020

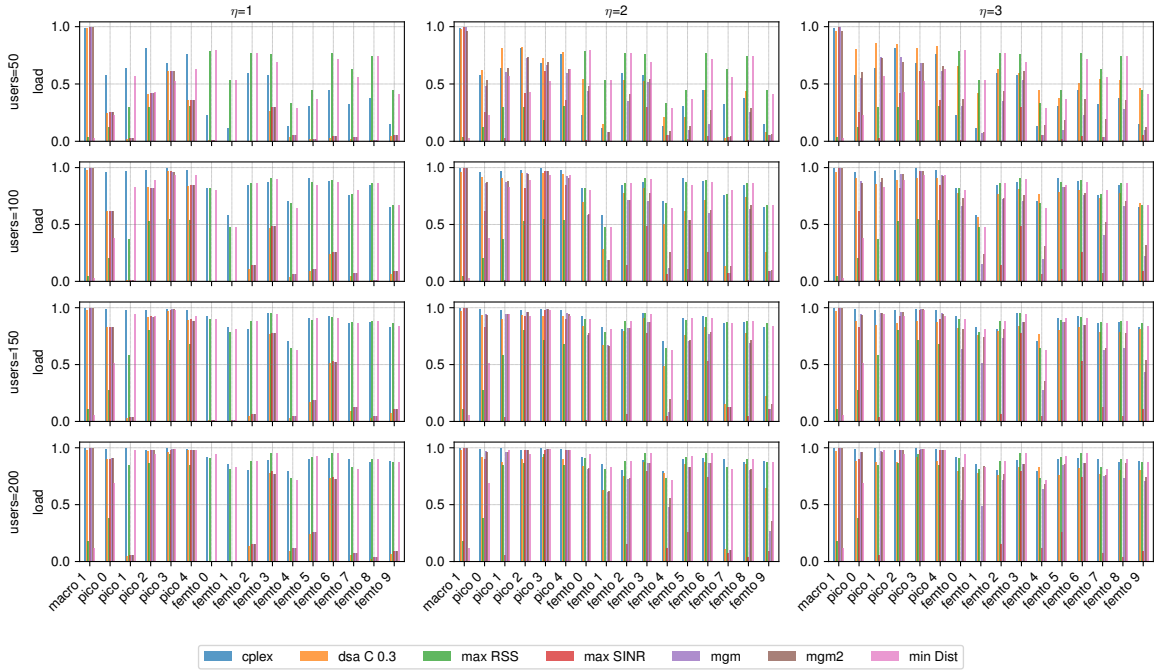


FIGURE 5 – Taux moyen d'utilisations des stations obtenus par chaque algorithme d'allocation pour différents nombres d'utilisateurs et valeurs du paramètre η

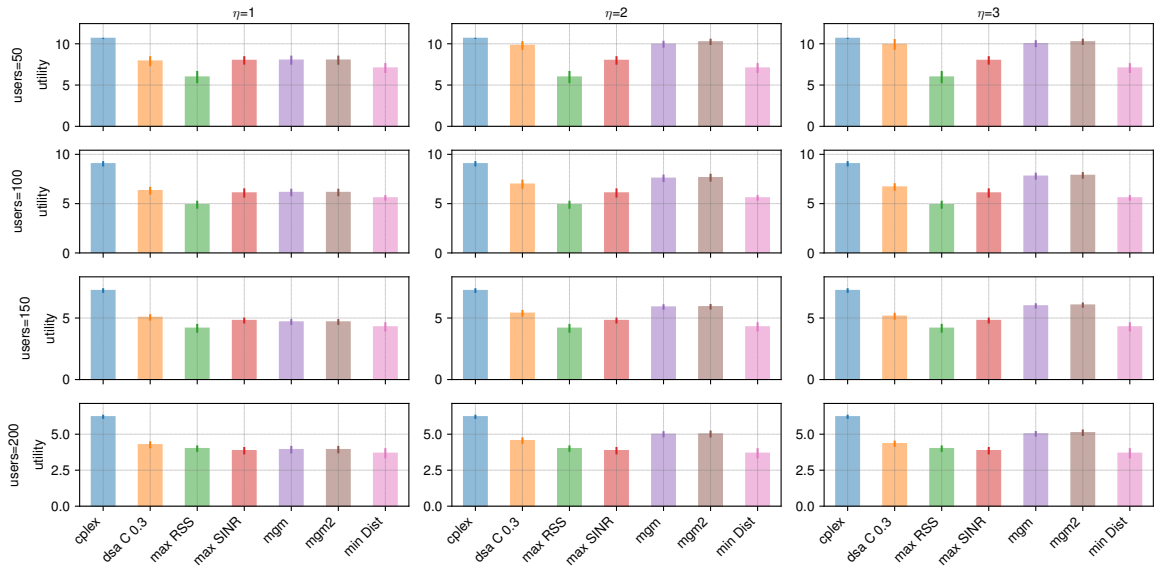


FIGURE 6 – Utilité finale (débit moyen par utilisateur en Mbps) obtenue par chaque algorithme d'allocation pour différents nombres d'utilisateurs et valeurs du paramètre η

excepté maxRSS et minDist qui vont principalement affecter les utilisateurs aux stations les plus proches, et comme les utilisateurs sont répartis sur tout l'environnement, toutes les stations ont une charge conséquente. Pour $\eta = 1$, notons que les algorithmes DCOP ont le même comportement que maxSINR, et vont donc mettre de côté les stations de tiers inférieurs, puisque les utilisateurs ne considèrent que la meilleure station du point de vue du SINR. Avec $\eta > 1$, les stations partent de l'allocation maxSINR, puis se coordonnent avec un algorithme DCOP pour améliorer la solution. Nous obtenons alors des allocations différentes à maxSINR, proches des allocations optimales calculées par CPLEX, qui sont de meilleure qualité du point de vue des utilisateurs.

En effet, en analysant l'utilité globale du système, c.-à-d. le débit global en Mbps, présenté dans la Figure 6, nous pouvons observer que pour $\eta = 1$, les algorithmes DCOP obtiennent la même qualité que maxSINR (puisque pas de réelle coordination), à part DSA. Ce dernier, grâce à ses mouvements aléatoires, change l'allocation maxSINR initiale, et donc retire des utilisateurs de certaines stations, et ajoutent des utilisateurs ini-

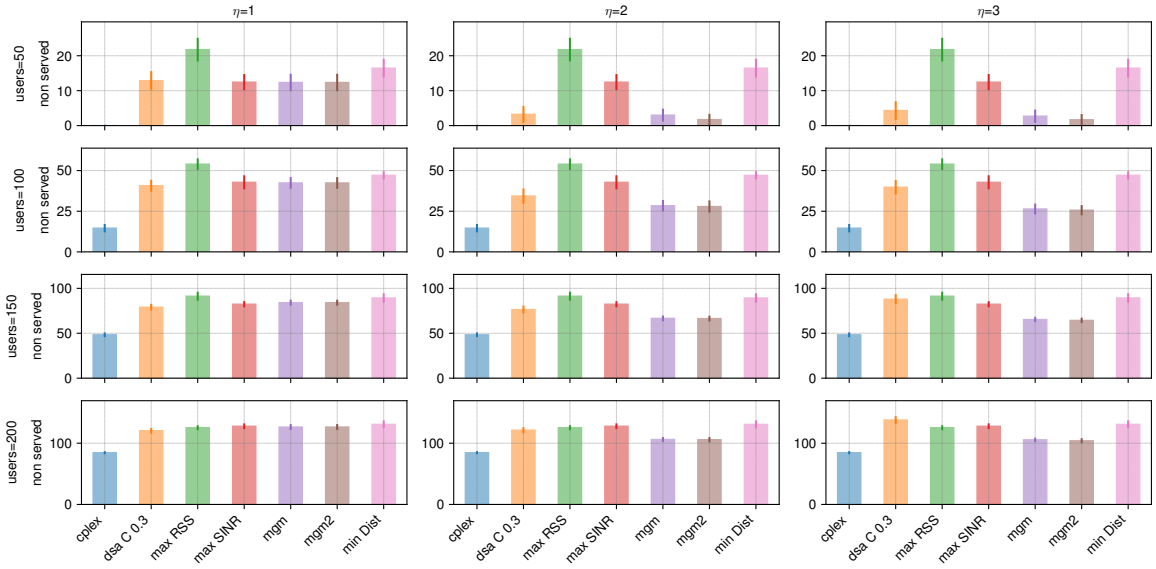


FIGURE 7 – Nombre final d'utilisateurs sans connexion obtenu par chaque algorithme d'allocation pour différents nombres d'utilisateurs et valeurs du paramètre η

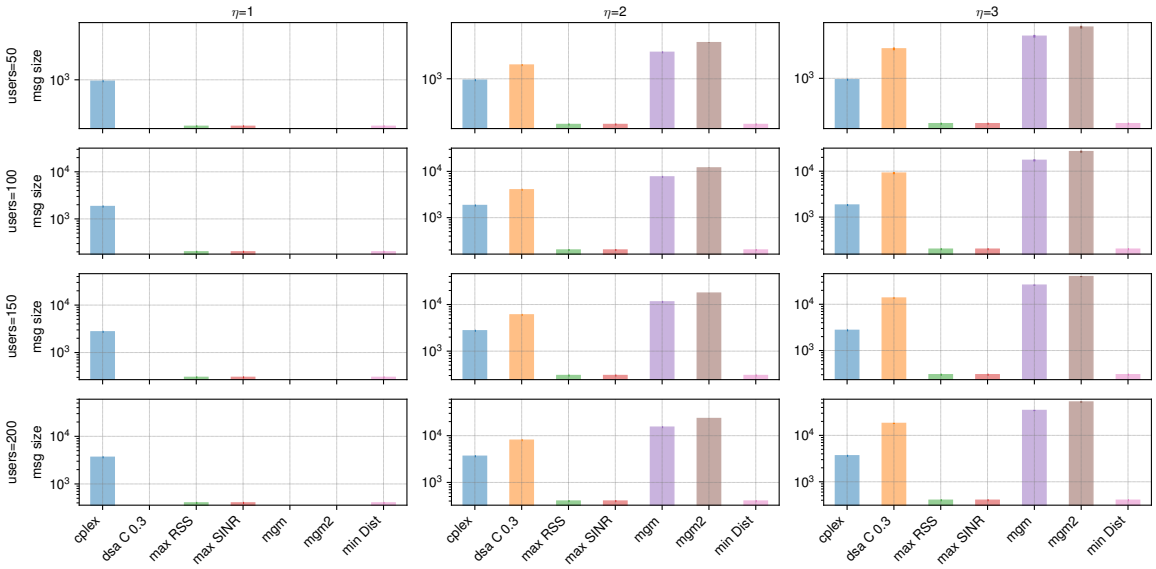


FIGURE 8 – Charge réseau pour chaque algorithme d'allocation pour différents nombres d'utilisateurs et valeurs du paramètre η

tialement non servis, pour obtenir en moyenne des solutions de meilleure qualité. Cependant, cette qualité n'est pas réellement opérationnelle, puisque DSA viole de nombreuses contraintes intra, et donc surcharge des stations au-delà de leur limite. Pour $\eta > 1$, la qualité des solutions MGM et MGM-2 augmente, et se place entre la qualité optimale et la qualité de maxSINR. Avec η augmentant, MGM-2 fournit des qualités de solutions très légèrement supérieures à celles fournies par MGM. Les pires solutions sont obtenues par maxRSS et minDist.

Cette qualité supérieure s'explique ainsi par l'ajout de coordination entre les stations, qui permet de servir plus d'utilisateurs, comme illustré dans la Figure 7. On y retrouve la même performance pour MGM-2 avec $\eta = 3$, qui se positionne entre la solution maxSINR et la solution optimale théorique obtenue par CPLEX. Notons que les instances que nous avons générées sont très stressantes pour le systèmes, puisque tous les utilisateurs ne peuvent être physiquement servis à partir de $|\mathcal{U}| \gtrsim 85$. Sur les systèmes non surchargés ($|\mathcal{U}| = 50$), MGM et MGM-2 améliorent grandement la part d'utilisateurs servis. Cet écart diminue dans les systèmes surchargés, mais MGM-2 fournit toujours de meilleures solutions.

Cependant cette coordination nécessite une charge réseau conséquente pour la stations, afin de traiter les messages de coordination, comme illustré en Figure 8, mais notons que ces messages DCOP ne se propagent qu'entre stations de base (donc à haut débit, et faible latence), et surtout que ces protocoles sont peu sensibles à la perte de messages, contrairement à une solution qui consisterait à recueillir

©AfIA 2020

toutes les données sur les utilisateurs (position, signal, SINR, exigences, etc.) et sur les stations de base (charge), puis les faire remonter à un serveur global pour effectuer une optimisation globale, avec CPLEX, par exemple.
Au final, MGM, pour une quantité d'information moindre que MGM-2, permet toutefois d'obtenir des solutions de bonne qualité, si une surcharge de messages entre stations est problématique.

5 Conclusions

Nous avons étudié les performances d'algorithmes DCOP légers pour l'association d'utilisateurs à des réseaux HetNet. L'objectif étant une optimisation du débit global obtenu par les utilisateurs, nous avons comparé les algorithmes MGM, MGM-2, et DSA-C à des algorithmes d'allocation classiques dans le domaines (maxSINR, maxRSS) ainsi qu'à la solution optimale théorique obtenue de manière centralisée par programmation mathématique. Dans des environnements chargés, MGM et MGM-2 exhibent des performances se situant entre la solution distribuée classiquement utilisée, maxSINR, et l'optimum théorique. Ainsi, en ajoutant une couche de coordination par DCOP entre les stations de base, le système améliore les performances normalement obtenues dans un HetNet. Cette amélioration requiert uniquement un échange de messages entre les stations (et donc à haut débit et sans goulot d'étranglement). Cette étude aboutit ainsi sur des résultats prometteurs. Cependant, nous n'avons utilisé que des algorithmes génériques issus de la littérature. Afin d'améliorer encore les performances, il nous semble nécessaire d'adapter ces algorithmes et leurs structures de données au cas particulier des HetNets, notamment à cause de la présence de contraintes n-aires et de la mixité contraintes souples/contraintes dures. Enfin, l'un des apport envisagé d'une approche décentralisée est la capacité à adapter le système en local, en cas de défaillance d'équipements. Nous envisageons ainsi de poursuivre cette étude dans un cadre DCOP dynamique, en utilisant notamment les mécanismes de résilience proposés dans [22].

Références

[1] F. Bacchus and P. van Beek. On the conversion between non-binary constraint satisfaction problems. In *AAAI'98*, page 311–318, USA, 1998.

[2] B. Bikram Kumar, L. Sharma, and S.-L. Wu. Online distributed user association for heterogeneous radio access network. *Sensors*, 19(6), 2019.

[3] H. Boostanimehr and V. K. Bhargava. Unified and distributed qos-driven cell association algorithms in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(3) :1650–1662, March 2015.

[4] S. Boudko, W. Leister, and S. Gjessing. Heterogeneous wireless network selection : Load balancing and multicast scenario. *International Journal on Advances in Networks and Services*, 6 :118–135, 12 2013.

[5] R.E. Bryant. Graph-based algorithms for boolean function manipulation. *IEEE Transactions on Computers*, C-35(8) :677–691, 1986.

[6] `https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer`.

[7] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi. A survey on 3gpp heterogeneous networks. *IEEE Wireless Communications*, 18(3) :10–21, June 2011.

[8] P. Duan, C. Zhang, G. Mao, and B. Zhang. Applying distributed constraint optimization approach to the user association problem in heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(6) :1696–1707, 2018.

[9] A. Farinelli, A. Rogers, and N. R. Jennings. Agent-based decentralised coordination for sensor networks using the max-sum algorithm. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 28(3) :337–380, May 2014.

[10] F. Fioretto, E. Pontelli, and W. Yeoh. Distributed constraint optimization problems and applications : A survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 61 :623–698, 2018.

[11] D. Fooladivanda and C. Rosenberg. Joint resource allocation and user association for heterogeneous wireless cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(1) :248–257, 2013.

[12] K. Gomadam, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar. A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 57(6) :3309–3322, June 2011.

[13] V. N. Ha and L. B. Le. Distributed base station association and power control for heterogeneous cellular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(1) :282–296, Jan 2014.

[14] M. Jain, M. Taylor, M. Tambe, and M. Yokoo. DCOPs meet the real world : Exploring unknown reward matrices with applications to mobile sensor networks. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'09)*, pages 181–186, 2009.

[15] R.T. Maheswaran, J.P. Pearce, and M. Tambe. Distributed algorithms for DCOP : A graphical-game-based approach. In *Proceedings of the 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems (PDCS)*, pages 432–439, 2004.

[16] M. D. Mckay, R. J. Beckman, and W. J. Conover. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42(1) :55–61, 2000.

[17] P. J. Modi, W. Shen, M. Tambe, and M. Yokoo. ADOPT : Asynchronous Distributed Constraint Optimization with Quality Guarantees. *Artificial Intelligence*, 161(2) :149–180, 2005.

[18] A. Petcu and B. Faltings. A scalable method for multiagent constraint optimization. In *IJCAI'05*, pages 266–271, 2005.

[19] `https://pythonhosted.org/PuLP/`.

[20] `https://github.com/Orange-OpenSource/pyDcop`.

[21] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. pyDCOP, a DCOP library for IoT and dynamic systems. In *International Workshop on Optimisation in Multi-Agent Systems (OptMAS@AAMAS)*, 2019.

[22] P. Rust, G. Picard, and F. Ramparany. Resilient distributed constraint optimization in physical multi-agent systems. In *ECAI*. IOS Press, 2020.

[23] Z. Wang, X. Zhu, X. Bao, and S. Zhao. A novel resource allocation method in ultra-dense network based on noncooperation game theory. *China Communications*, 13(10) :169–180, 2016.

[24] W. Zhang, G. Wang, Z. Xing, and L. Wittenburg. Distributed stochastic search and distributed breakout : Properties, comparison and applications to constraint optimization problems in sensor networks. *Artificial Intelligence*, 161(1-2) :55–87, 2005.

[25] L. Zhao, Y. Qin, M. Ma, X. Zhong, and L. Li. Qos guaranteed resource block allocation algorithm in lte downlink. In *7th International Conference on Communications and Networking in China*, pages 425–429, Aug 2012.

Politiques de synchronisation dans les systèmes multi-agents distribués parallèles

A. Rousset[1], P. Breugnot[2], B. Herrmann[2], C. Lang[2] et L. Philippe[2]

[1] Faculté des Sciences, de la Technologie et de Médecine (FSTM),
Université du Luxembourg, Luxembourg
[2] Institut Femto-ST, Unversité de Bourgogne-Franche-Comté/CNRS, France

christophe.lang@univ-fcomte.fr

Résumé

Parmi les méthodes de modélisation/simulation, les systèmes multi-agents présentent un intérêt particulier pour simuler les systèmes complexes. Lorsque la taille des modèles croît, le recours aux systèmes multi-agents parallèles est nécessaire mais pose de nombreux problèmes. Dans cet article, nous nous intéressons à l'impact de la synchronisation sur la définition des modèles et leur exécution. Nous mettons en évidence des problématiques de synchronisation à travers des instances de modèles puis nous analysons expérimentalement l'impact des politiques de synchronisation sur des exécutions de grande taille.

Mots-clés

multi-agent simulation, parallélisme, MAS, High Performance Computing, synchronisation

Abstract

Among simulation or modelisation methods, multi-agent systems are interesting candidate to simulate complex systems. As the size of the models increases, the use of parallel multi-agent systems is mandatory but comes with many issues. In this article, we are interested in the impact of synchronization on models design and on their execution. We highlight synchronization problems through model instances then we experimentally analyze the impact of synchronization on large scale testcases.

Keywords

Multi-agent simulation, Parallelism, High Performance Computing, Synchronization

1 Introduction

La simulation numérique vise à virtualiser le monde réel, par exemple pour explorer son évolution dans différentes configurations ou pour comprendre comment le contrôler. Dans les systèmes complexes, les comportements sont souvent trop élaborés et interdépendants pour pouvoir être modélisés par une loi unique. Les systèmes multi-agents sont alors souvent utilisés pour modéliser les comportements car ils reposent sur une description algorithmique simple d'agents qui interagissent entre eux. De nombreuses plateformes [12, 6, 11] proposent un support de développement pour de tels modèles.

La qualité d'une simulation dépend souvent de la taille et précision du modèle. Or leur accroissement entraîne une augmentation du nombre de calculs à réaliser, rendant nécessaire le recours à des exécutions parallèles, voire à l'utilisation de moyens de calcul haute performance (HPC : High Performance Computing). L'exécution distribuée parallèle d'une simulation pose alors de nombreux problèmes comme la distribution de l'environnement, la communication entre les instances parallèles de la plateforme, etc. Il existe des plateformes multi-agents (Parallel and Distributed MAS ou PDMAS) offrant un support à l'exécution distribuée où plusieurs instances, ou processus, de la plateforme coopèrent pour faciliter la mise en œuvre d'un modèle sur un ensemble d'ordinateurs mais la synchronisation reste l'un des points clefs pour l'exécution efficace du fait des nombreux échanges et dépendances temporelles qu'elle induit. Nous nous intéressons dans cet article aux problèmes posés par la synchronisation au sein de simulations multi-agents distribuées parallèles, en visant plus particulièrement les exécutions à large échelle. Comme les plates-formes multi-agents fonctionnent fréquemment par pas de temps, il est nécessaire de s'interroger sur l'échange des données entre les processus distribués d'une simulation au regard de ce mode de fonctionnement.

Les contributions proposées dans cet article sont, d'une part, la définition de politiques de synchronisation utilisées au sein de simulations multi-agents parallèles et leur mise en évidence à travers des modèles, et d'autre part, l'analyse expérimentale de l'impact des politiques de synchronisation sur des exécutions de grande taille, jusqu'à 512 cœurs, dans les systèmes multi-agents parallèles et distribués.

L'article est organisé comme suit. Dans la section 2 nous présentons un état de l'art sur les systèmes multi-agents parallèles et la synchronisation. Nous proposons une étude des problématiques de synchronisation dans les systèmes multi-agents parallèles distribués dans la section 3. Dans la section 5, nous présentons une étude expérimentale de l'impact des différentes politiques de synchronisation définies dans la section 4 .

©AfIA 2020

2 PDMAS et synchronisation

Par nature les agents interagissent entre eux, en consultant les données d'autres agents, à travers les modifications réalisées sur l'environnement ou par échange de messages. Dans un PDMAS, les agents et les données de l'environnement sont distribués entre les instances de la plateforme, ou processus. Un agent peut alors vouloir accéder à des agents ou un environnement distant. Ceci nécessite la mise en place d'une synchronisation entre les processus pour maintenir un état cohérent et permettre aux agents d'accéder à la valeur à jour des données. Les processus étant distribués, la synchronisation est réalisée sous la forme de communications et l'accès est alors plus coûteux qu'un simple accès local. Il est donc important d'implémenter la synchronisation en limitant les surcoûts, ce qui suppose de caractériser les propriétés attendues. Dans la littérature, la caractérisation de la synchronisation de modèles parallèles repose sur le mode de dépendance de données et son respect de la causalité.

On distingue deux modes de gestion de la dépendance de données dans les simulations : (i) le mode *ghost* qui utilise les données du pas de temps précédent (le *ghost*) et (ii) le mode *non ghost* qui utilise une seule instance des données, dans laquelle les calculs sont directement reportés. Le *ghost* n'est accessible qu'en lecture alors que, sans *ghost*, les données sont accessibles en lecture/écriture et l'ordre d'accès aux données impacte les résultats. Dans le cas des PDMAS, le modèle *ghost* permet de ne diffuser les données modifiées qu'à la fin des pas de temps. Pour limiter le coût des mises à jour, plusieurs PDMAS ne diffusent que des *ghost* limités à la zone de perception des agents, les zones de recouvrement. Le mode *non ghost* nécessite des mécanismes de mise à jour continus, au sein d'un même pas de temps, garantissant que les données utilisées sont les plus à jour. Ces mises à jour doivent alors être synchronisées pour éviter les conflits. Nous analysons en 3 l'incidence du mode de dépendance et nous montrons que son choix est déterminé par le modèle.

Pour optimiser l'exécution parallèle, les systèmes à événements discrets utilisent deux approches de gestion de la causalité, l'approche conservative et l'approche optimiste. Dans l'approche conservative un processus qui traite un événement doit être sûr de ne pas utiliser de données modifiées à une date postérieure, ce qui limite l'exploitation du parallélisme. Les premiers algorithmes utilisant l'approche conservative ont été proposés par Chandy et al. [2]. A l'inverse, la violation de la contrainte de causalité est possible avec l'approche optimiste. Chaque processus traite les événements locaux, avec une connaissance partielle qui peut omettre certains événements provenant d'autres processus et donc ne pas respecter la causalité [10]. Lorsqu'un processus reçoit une donnée avec une date antérieure à la sienne, un retour en arrière, ou *Rollback* [7] est effectué, ce qui implique de sauvegarder plusieurs points de récupération par processus. Ainsi Xu et al. [16] définissent le *lookahead* comme étant la durée jusqu'à la prochaine mise à jour des données. Un processus peut alors continuer tant qu'il n'a pas atteint son *lookahead*. Cette approche est difficilement généralisable à tous les modèles et elle n'est pas efficace lorsqu'il faut effectuer de nombreux *Rollback*, un *Rollback* pouvant entraîner une réaction en chaîne de *Rollback*. Dans les PDMAS, les événements sont planifiés tous les pas de temps. L'utilisation des approches conservatives ou optimistes peut alors s'entendre comme le respect strict ou non de la frontière du pas de temps, comme nous l'étudions en 3.

Dans [8] nous avons proposé une étude des plateformes multi-agents parallèles et distribuées (PDMAS). Parmi les plateformes que nous avons évaluées, seules quatre d'entre elles permettent d'envisager une exécution sur des ressources de grande taille, de type HPC. Les plateformes implémentent principalement une synchronisation conservative, sur la base de zones de recouvrement pour D-Mason [4], de tableaux de messages pour Flame [3] et de grille 2D pour Pandora [1]. En effet l'approche optimiste convient peu aux systèmes multi-agents qui animent les agents par pas de temps, donc de manière uniforme au sein des processus parallèles à l'inverse des systèmes à événements discrets où la répartition temporelle des événements diffère entre les processus. Une politique de répartition de la charge s'avère alors plus efficace. D-Mason et Flame reposent sur un mode *ghost* avec une barrière de synchronisation à la fin de chaque pas de temps permettant d'attendre tous les processus voisins avant d'échanger les données et les agents à migrer. Pandora résout les conflits de cohérence de données en découpant la simulation en quatre parties et en exécutant en parallèle les parties non-adjacentes. Les parties sont exécutées dans le même ordre de 0 à 3 et, une fois l'exécution d'une partie terminée, les zones de recouvrement sont envoyées aux processus voisins. RepastHPC offre au développeur la possibilité de faire une copie d'agents sur les processus distants, en plus de gérer les migrations et les zones de recouvrement. En couplant ces modes avec les fonctions d'ordonnancement de la plateforme, il est possible d'implémenter les politiques conservatives et optimistes mais l'ensemble reste à la charge du développeur avec le risque de surcharger le modèle.

3 Impact des synchronisations

La synchronisation est un point clé pour une exécution efficace d'une simulation multi-agents parallèle, du fait des nombreux échanges et dépendances temporelles générés. Son impact sur la parallélisation dépend néanmoins du modèle lui-même : dans un modèle où les agents n'interagissent pas, aucune synchronisation n'est nécessaire. L'intérêt du modèle agent repose cependant justement sur la capacité des agents à interagir [5]. Notre objectif est donc d'étudier l'impact de la synchronisation sur les temps d'exécution et l'impact de politiques de synchronisation plus relâchées. En effet, dans les systèmes multi-agents, l'observation d'un phénomène s'effectue en général au niveau macroscopique et non microscopique. Or, il est possible qu'avec un grand nombre d'agents, des synchronisations erronées ou fausses se compensent et limitent ainsi l'impact d'une synchronisation relâchée. Il est donc intéressant de mettre en relation l'erreur possible avec le surcoût dû à la synchronisation. Nous proposons dans la suite différentes politiques de syn-

chronisation et étudions leur impact.
À noter que, même si la simulation n'est pas parallèle, une exécution en mode *ghost* ne peut conserver que la cohérence des modèles qui ne nécessitent pas d'écriture concurrente, car celle-ci peut conduire à une violation des règles du modèle. Par exemple, dans un modèle proie-prédateur, plusieurs prédateurs pourraient manger une même proie au cours d'un pas de temps puisque, suite à une première attaque, la mort de la proie est enregistrée dans la copie de travail et non dans la copie *ghost* qui donne l'état du système. La mort de la proie ne sera reportée dans la copie *ghost* qu'au changement de pas de temps. À l'opposé, dans le mode *non ghost*, les informations doivent être accessibles en lecture et en écriture, ce qui nécessite des mécanismes de synchronisation pour les données détenues par d'autres processus ou situées dans les zones de recouvrement. L'accès aux données doit alors être géré pour garantir qu'aucune incohérence (ou biais) n'est injectée dans la simulation et que les informations sont à jour. Plusieurs synchronisations sont donc nécessaires pour une distribution sur plusieurs processus : (i) à la fin de chaque pas de temps pour garantir que tous les processus exécutent le même pas de temps, (ii) à la migration d'un agent d'un processus à un autre pour que l'état des processus concernés soit cohérent, (iii) à la modification d'une zone de recouvrement pour garder la continuité des champs de perception des agents, (iv) à la modification des données d'un agent distant.
Il est important de noter que le système modélisé et son implémentation ont un impact important sur la synchronisation qui doit être mise en place pour garantir la qualité des résultats obtenus par la simulation parallèle. Ainsi, dans les modèles agents, il existe des modèles *ghost* ou non et/ou qui nécessitent que les données soient accessibles uniquement en lecture, d'autres en lecture et en écriture. La synchronisation est donc à considérer au cas par cas. Dans la suite, pour évaluer l'impact de la synchronisation sur les résultats d'exécution des simulations multi-agents, nous utilisons trois modèles agents (Proie-prédateur, Virus et Flocking) qui nécessitent des niveaux de synchronisation différents pour s'exécuter de manière cohérente. A noter que, dans les modèles traités, nous avons choisi l'approche que nous avons le plus souvent trouvée par rapport à ce choix d'implémentation. Changer ce choix modifierait les contraintes de synchronisation et conduirait à d'autres conclusions.
Le modèle Flocking [13] simule le comportement collectif d'une nuée d'oiseaux en vol. Il est composé d'un seul type d'agent oiseau, localisé dans l'espace, avec une zone de perception réduite. Ses comportements déterminent la nouvelle position de l'oiseau en fonction de la position des oiseaux de son voisinage. Le modèle fonctionne en mode *ghost* : les agents calculent leur déplacement en fonction de la position des oiseaux voisins obtenue au pas de temps précédent. La mise à jour des données des zones de recouvrement à chaque pas de temps garantit que chaque agent oiseau dispose des informations correctes pour calculer son déplacement. Il n'y a donc pas de problème de concurrence d'accès sur ces données puisqu'elles sont accédées uniquement en lecture.
Le modèle Virus [14] simule la transmission d'un virus dans une population composée d'agents personne, localisés sur une grille 2D, avec une connaissance partielle du voisinage. Le modèle gère, en fonction de paramètres, le cycle de vie des agents qui se déplacent de manière aléatoire sur l'environnement et infectent leurs voisins. Le modèle Virus fonctionne en mode *non ghost*. Il est possible que, dans un même pas de temps, un agent infecté infecte un autre agent. Si les deux agents ne sont pas exécutés sur le même processus, il est alors nécessaire de mettre à jour les données distantes. Pour finir, nous pouvons remarquer qu'un agent ne change pas son état même s'il est infecté plusieurs fois. Cette propriété, que nous appelons écriture idempotente, fait que nous n'avons pas à gérer de concurrence en écriture sur le changement de l'état de l'agent, puisque même si deux agents infectent un même agent l'ordre des deux exécutions n'a pas d'incidence sur le résultat final.
Le modèle proie-prédateur [15] (PP) explore la stabilité des écosystèmes à travers la gestion des populations de trois types d'agents ; les loups (prédateurs), les moutons (proies/prédateurs) et l'herbe (proie). Les prédateurs se déplacent au hasard sur une grille 2D avec une perception limitée. Ils consomment des proies dans leur champ de perception pour maintenir leur énergie de vie et ont une probabilité de se reproduire à chaque pas de temps. L'herbe disparaît lorsqu'elle est mangée et repousse après un temps fixé. Le modèle fonctionne en mode *non ghost* dans la mesure où les prédateurs changent l'état des proies qu'ils mangent, ce qui engendre une écriture dans les données de l'agent et oblige à une synchronisation pendant le pas de temps pour gérer les écritures concurrentes. A cause du parallélisme, des prédateurs situés dans des processus différents peuvent être tentés de manger une même proie dans la zone de recouvrement. Si tous les prédateurs mangent cette proie (celle qui est dans la zone de recouvrement) alors chacun bénéficiera d'un apport en énergie et donc d'une augmentation de sa durée de vie, ce qui constitue une erreur par rapport au modèle séquentiel. Il est donc nécessaire de synchroniser tous les agents qui souhaiteraient manger une proie pour garantir qu'un seul prédateur la mangera.
L'analyse de ces modèles met en évidence différents besoins en termes de synchronisation et nous permet de définir trois types de modèles en fonction des interactions entre les agents : (i) les modèles en lecture (L), comme flocking, (ii) les modèles en écriture idempotente (EI), comme le modèle virus, où l'état de l'agent ne change plus après une écriture et (iii) les modèles en écriture concurrente (EC). À partir de ces types, nous souhaitons analyser l'impact du choix d'une politique de synchronisation sur les performances.

4 Politiques de synchronisation

Nous proposons ici plusieurs politiques de synchronisation dont nous souhaitons évaluer l'impact sur les résultats et sur le temps d'exécution des simulations, sachant que d'autres politiques pourraient présenter un intérêt pour d'autres modèles. A ces propositions nous ajoutons le cas "sans synchronisation" qui sert de référence.
La politique **aucune synchronisation (NS)** distribue la si-

©AfIA 2020

mulation en n portions sans zone de recouvrement ni écritures distantes. Les agents peuvent se déplacer d'un processus à un autre en ayant un champ de perception tronqué lorsqu'ils sont proches des limites des processus.

La politique **overlapping zones (OLZ)** ne gère que des zones de recouvrement, qu'elle copie à chaque pas de temps. Les écritures ne sont pas reportées sur les originaux et sont écrasées au pas de temps suivant par la mise à jour.

La politique **écritures asynchrones (EA)** fait des écritures à distance sans attendre une confirmation ou une valeur de retour. Elle est utilisée lorsqu'un agent modifie une donnée de la zone de recouvrement et que cette écriture doit être prise en compte dans le pas de temps courant mais que l'agent n'attend pas de donnée en retour.

La politique **synchronisation stricte (SS)** gère les zones de recouvrement et les écritures concurrentes pour garantir au maximum la reproduction du cas séquentiel. Chaque demande en écriture est bloquante jusqu'à l'acquittement de sa prise en compte, ainsi la cohérence des données est garantie. Elle est ce qu'il y a de plus strict en termes de synchronisation sans revenir à une exécution séquentielle.

La **synchronisation stricte décalée (SSD)** s'effectue de manière non-bloquante. Ainsi, lorsqu'un agent effectue une demande de synchronisation, il est mis en attente de réponse jusqu'à la fin du pas de temps afin que l'exécution des autres agents se poursuive, assurant ainsi un meilleur recouvrement calcul-communication.

Ces définitions permettent de discerner l'impact sémantique et les contraintes garanties par les politiques de synchronisation, il faut également étudier leur incidence sur les performances des modèles.

5 Expérimentations

L'objectif est de mettre en évidence le lien entre les performances d'exécution d'un modèle et une politique de synchronisation en fonction de l'extensibilité ou de la montée en charge. Nous utilisons les trois modèles vus précédemment, choisis pour leurs différents besoins de synchronisation. Comme aucune des plateformes vues précédemment n'offre ces politiques de synchronisation, nous les avons implémentées dans des modèles pour les tester. Le modèle Flocking est un modèle L. Deux politiques sont donc testées : aucune synchronisation (NS) et utilisation de zones de recouvrement (OLZ). Le modèle Virus est un modèle EI, nous testons donc l'écriture asynchrone (EA), les zones de recouvrement (OLZ) et la synchronisation stricte décalée (SSD). La politique de synchronisation stricte (SS) n'est pas utilisée puisque l'écriture idempotente ne change pas l'état d'un agent contaminé. Le modèle proie-prédateur est un modèle EC puisqu'une proie ne peut être mangée qu'une seule fois. Les politiques de synchronisation testées sont les zones de recouvrement (OLZ), la synchronisation stricte décalée (SSD) et la synchronisation stricte (SS). À noter que les modèles choisis sont spatialisés mais ces problématiques s'appliquent de la même manière sur des modèles non-spatialisés puisqu'elles sont liées aux échanges de données entre agents plutôt qu'à la position de ceux-ci.

Pour l'implémentation des modèles nous utilisons notre plateforme FPMAS[9], une plateforme multi-agents parallèle qui repose sur la bibliothèque Zoltan pour gérer la distribution de la simulation, le modèle agent étant représenté par un graphe pour tirer parti des algorithmes de partitionnement parallèles. FPMAS propose également des mécanismes de synchronisation, dont la synchronisation stricte, contrairement aux plateformes précédemment citées qui n'offrent même pas la possibilité de l'implémenter. Une fois le modèle avec les politiques de synchronisation implémenté, FPMAS peut l'exécuter dans un environnement parallèle HPC : la simulation est divisée en portions distribuées sur les processus. A noter que les politiques de synchronisation étant implémentées directement dans les modèles, ceci peut engendrer quelques différences de performances d'un modèle à l'autre et nous ne faisons donc que des comparaisons entre politiques par rapport à un modèle donné.

Pour les simulations, nous avons utilisé le cluster du Mésocentre de calcul de Franche-Comté, constitué de 146 nœuds bi-processeurs (Xeon E5 8 cœurs à 2.6 Ghz, 64 Go de mémoire), interconnectés en fat tree par un réseau non bloquant QDR infiniBand [1]. Le système de batch est SGE [2]. Chaque point des courbes représente une moyenne de 10 exécutions avec 10 graines différentes. Pour des raisons de reproductibilité, la même configuration initiale est utilisée pour toutes les exécutions, seule la graine varie d'une exécution à une autre.

5.1 Impact de l'extensibilité

L'extensibilité des modèles est étudiée en fixant le nombre d'agents et en faisant varier le nombre de processus pour l'exécution. L'impact de l'extensibilité est mesuré avec le temps d'exécution et le speed-up.

Pour chacun des modèles nous avons calculé un speed-up avec comme référence le temps d'une exécution parallèle sur 16 cœurs, la taille des données des modèles étant trop grande pour un seul processus. Le speed-up sur p processus est donné par $T(p_{ref})/T(p)$ où $T(p_{ref})$ est le temps d'exécution de référence et $T(p)$ le temps d'exécution sur p processus. Pour les trois modèles l'extensibilité est bonne avec un speed-up de plus ou moins 20 suivant les modèles, alors que le speed-up idéal est de 32. Les résultats obtenus par les politiques sans synchronisation, ou avec moins de synchronisation, sont meilleurs que ceux ayant des synchronisations plus strictes.

Modèle Flocking. L'environnement du modèle Flocking est basé sur un cube 1000^3. A l'initialisation, 100000 oiseaux sont répartis de manière aléatoire dans l'espace. Les taux de cohésion, de séparation et d'alignement sont fixés à 1 afin de ne pas favoriser l'un des trois critères composant les comportements des oiseaux, tandis que le taux d'aléa est fixé à 1.5, supérieur aux autres pour générer des déplacements plus chaotiques et solliciter davantage la synchronisation. Chaque simulation est exécutée durant 2000 pas de temps.

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Bus_InfiniBand
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Oracle_Grid_Engine

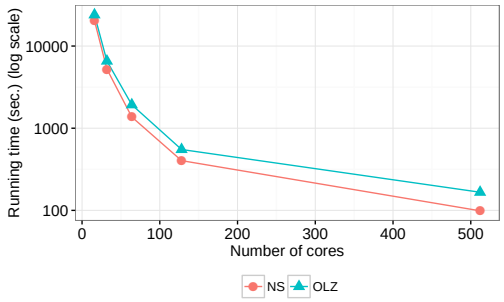


FIGURE 1 – Temps d'exécution du modèle Flocking

La figure 1 donne les temps d'exécution du modèle Flocking pour les politiques de synchronisation *NS* et *OLZ*. La différence des temps d'exécution est d'environ 15% pour 16 cœurs, 26% pour 128 cœurs, et 65% pour 512 cœurs. Lorsque le nombre de cœurs augmente, plus de messages sont nécessaires pour mettre à jour les zones de recouvrement, ce qui explique cette différence croissante.

Modèle Virus. Le modèle Virus utilise un environnement de grille de 1000^2 avec une capacité maximale de 500000 personnes. A l'initialisation 9600 personnes saines et 640 infectées par le virus sont positionnées de manière aléatoire sur l'environnement. Les valeurs sont issues du modèle Virus de NetLogo : le taux d'infection est à 0.65, le taux de reproduction à 0.2 et le taux de récupération à 0.5. Seule la taille de l'environnement et la capacité maximale ont été adaptées pour obtenir un modèle de grande taille. Chaque simulation est exécutée durant 800 pas de temps.

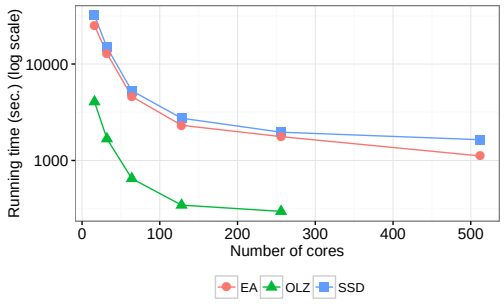


FIGURE 2 – Temps d'exécution du modèle Virus

La figure 2 donne les temps d'exécution du modèle Virus pour les synchronisations *OLZ*, *EA* et *SSD*. Pour *OLZ* il n'y a pas de point pour 512 cœurs car nous n'avons pas eu assez de temps sur le calculateur pour réaliser l'expérimentation. Les résultats obtenus avec le modèle flocking se confirment ici avec une différence de 27% pour 16 cœurs, seulement 15% pour 128 et 47% pour 512 cœurs. Deux raisons expliquent ce surcoût : le traitement additionnel en fin de pas de temps de la synchronisations SSD et l'augmentation du nombre de messages nécessaires à la synchronisation due au plus grand nombre de cœurs. Cette figure nous montre également le coût induit par la synchronisation des agents.

Pour 16 cœurs, les temps d'exécution de la courbe *OLZ* sont environ 8 fois meilleurs que la courbe *SSD*. Cette différence tend à décroître avec l'augmentation du nombre de cœurs et, pour 256 cœurs, elle n'est plus que de 6.6. Pour les courbes *EA* et *SSD* le ratio n'est que de 1.27 pour 16 cœurs, et de 1.4 pour 512 cœurs. Il croît donc avec le nombre de cœurs du fait du nombre plus important de messages.

Modèle proie-prédateur. Le modèle proie-prédateur (PP) utilise une grille de 400^2 où 25000 moutons et 17000 loups sont initialement positionnés de manière aléatoire. Le modèle des comportements et l'initialisation de l'énergie des agents loups et moutons sont issus du modèle NetLogo. L'énergie gagnée par un mouton qui mange de l'herbe est fixée à 5 et à 20 pour un loup mangeant un mouton. Le taux de reproduction est fixé à 0.5 pour les moutons et 0.4 pour les loups. La durée de vie d'un mouton est 4 et celle d'un loup est 20. La croissance de l'herbe est de 8. Pour finir les simulations sont exécutées durant 2000 pas de temps.

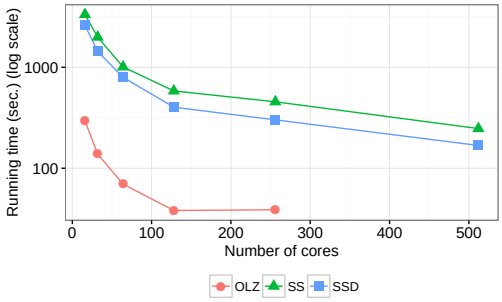


FIGURE 3 – Temps d'exécution du modèle PP

La figure 3 présente les temps d'exécution du modèle PP avec *OLZ*, *SSD* et *SS*. Comme précédemment, aucun calcul n'a été effectué sur 512 cœurs avec *OLZ*. Les points de 16 à 64 cœurs permettent cependant de mettre en évidence, comme pour le modèle Virus, le coût important à payer pour avoir des politiques de synchronisations strictes. La courbe *SSD* montre que la relaxation de la synchronisation à la fin du pas de temps de cette politique permet un gain de temps d'exécution par rapport à la synchronisation stricte. Ce gain est dû au fait que le traitement des agents n'est plus bloqué en attente de la réponse à une écriture concurrente, le recouvrement calcul-communication est meilleur.
Sur les modèles étudiés, le calcul des speed-up montre une bonne extensibilité et le niveau de synchronisation n'induit pas d'impact. Les simulations avec un grand nombre de cœurs profitent donc bien du parallélisme, ce qui confirme que les systèmes multi-agents peuvent bénéficier d'une parallélisation. Néanmoins, les politiques de synchronisation ont un coût très important (jusqu'à un facteur 8), qui est dû aux communications car dans les modèles étudiés, les agents ont un comportement relativement simple qui s'exécute beaucoup plus rapidement qu'une communication.

5.2 Impact de la montée en charge

La montée en charge est évaluée en fixant le nombre de processus et en faisant varier le nombre d'agents. Le modèle

©AfIA 2020

PP n'est pas présenté car il est très difficile d'y faire varier le nombre d'agents puisque la population s'auto-équilibre.

Modèle Flocking. La montée en charge du modèle Flocking utilise le même jeu de valeur que précédemment, sauf pour le nombre d'oiseaux qui varie de 100000 à 1000000.

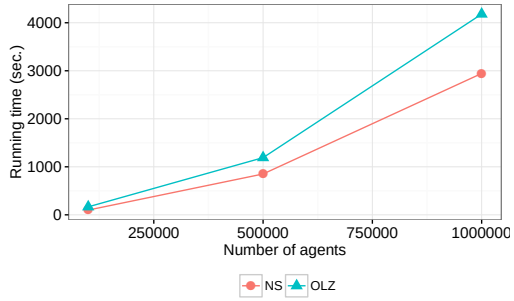


FIGURE 4 – Montée en charge du modèle Flocking

La figure 4 présente l'impact de la montée en charge sur 512 cœurs. Les politiques *NS* et *OLZ* supportent bien la charge jusqu'à 500000 agents, au delà les courbes croissent plus rapidement. Sans surprise, la version sans synchronisation supporte mieux la charge que la version avec zone de recouvrement, qui consomme environ un tiers de performance en plus. L'augmentation de la charge après 500000 agents s'explique par un manque d'optimisation dans la recherche du voisinage des agents : l'environnement est parcouru à chaque pas de temps pour explorer le voisinnage, au lieu de mettre à jour uniquement les agents qui arrivent ou partent.

Modèle Virus. Les paramètres utilisés pour la montée en charge sont les mêmes que précédemment, sauf pour le nombre d'agents qui varie de 100000 à 700000 agents.

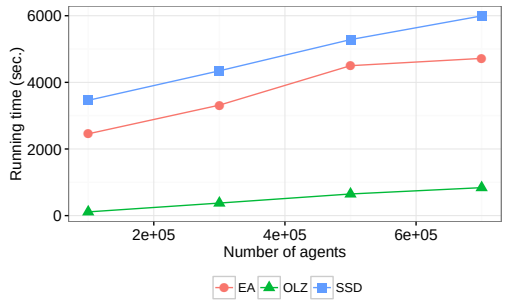


FIGURE 5 – Montée en charge du modèle Virus

La figure 5 présente la montée en charge du modèle Virus jusqu'à 64 cœurs car il n'a pas été possible d'obtenir plus sur le cluster partagé. La courbe *OLZ* se comporte évidemment mieux puisqu'elle ne gère pas les écritures. *EA* supporte mieux la charge que *SSD* : la courbe *SSD*, reste linéaire, alors que la courbe *EA* croît très peu de 500000 à 700000 agents. Ceci est dû au surcoût lié à l'accumulation des synchronisations en fin de pas de temps. Le ratio de performance obtenu entre 100k et 700k pour la courbe *EA* est de 1.9, 1.73 pour *SSD* et 7.5 pour *OLZ*.

Les résultats sur la montée en charge confirment que, quelle que soit la politique de synchronisation, les modèles multi-agents profitent d'une parallélisation. Les résultats obtenus avec *OLZ* montrent que cette politique est plus efficace que les politiques plus contraintes. Nous avons donc étudié l'impact des politiques de synchronisation sur les résultats des exécutions, ce que nous présentons dans la suite.

5.3 Impact sur les résultats

Pour étudier l'impact d'une exécution plus ou moins synchronisée sur les résultats de l'exécution, nous observons deux données : le résultat de la simulation, ce qui est attendu par le modélisateur, et le nombre d'interactions incohérentes. Dans les cas où les écritures dans les zones de recouvrement sont gérées, c'est à dire avec les politiques *EA*, *SS* et *SSD*, des interactions peuvent mettre en évidence une incohérence entre l'information locale et l'information distante. Par exemple pour le modèle proie-prédateur, un loup essaie de manger un mouton dans la zone de recouvrement seulement si il est vivant. Par conséquent, un retour négatif pour cette action montre que le mouton était en fait déjà mort dans les données distantes. En conséquence, prendre seulement en compte la zone de recouvrement aurait mené à une action incohérente où au moins deux loups auraient mangé le même mouton. De même, pour le modèle Virus, un agent essaie d'en infecter un autre seulement si ce dernier est sain. Ainsi, pour analyser l'impact des interactions sur les résultats des simulations nous comptabilisons le nombre total de demandes de synchronisation, les synchronisations pour lesquelles l'information était cohérente (notées *CO*) et celles pour lesquelles l'information était incohérente (notées *NCO*). Cette analyse n'inclut pas le modèle Flocking car elle ne s'applique pas à un modèle en lecture.

Modèle Virus. La figure 6 présente le détail des demandes de synchronisation pour les synchronisations *EA* et *SSD*.

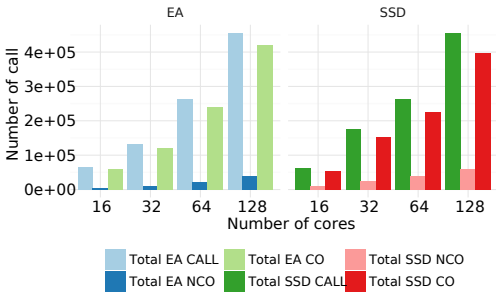
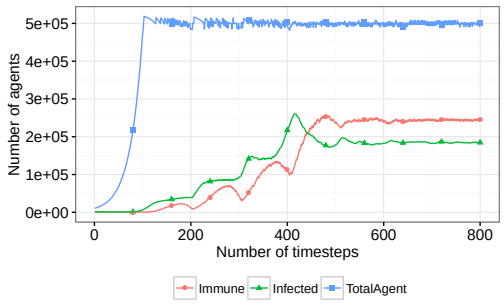


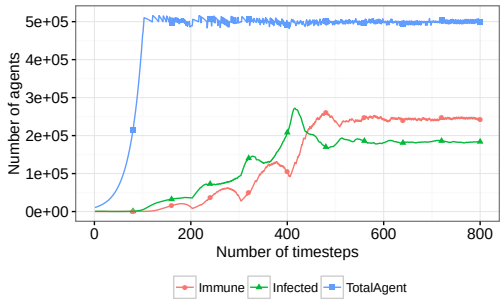
FIGURE 6 – Détail des synchronisations du modèle Virus

Pour les deux politiques de synchronisation le nombre total de demandes de synchronisation croît de manière linéaire avec le nombre de cœurs car, lorsque le nombre de cœurs augmente la simulation est divisée en plus de processus. Il y a donc plus de zones de recouvrement et plus d'interactions potentielles. Le nombre d'interactions *NCO* est très faible pour *EA*. Il croît d'environ 10% pour *SSD* à cause des synchronisations gérées en fin de pas de temps. Les agents qui

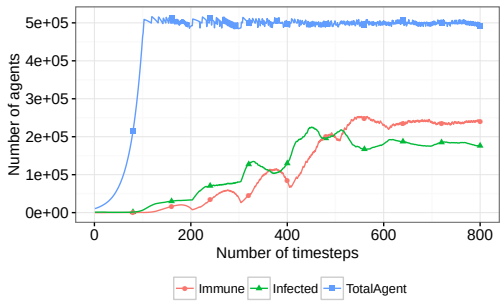
effectuent une demande de synchronisation sont suspendus et exécutés à la réception de la réponse, en fin de pas de temps. De ce fait, certaines interactions qui étaient potentiellement *CO* au moment de la demande de synchronisation peuvent devenir *NCO* si les agents concernés n'avaient pas encore été exécutés. Il faut donc poser la question de savoir quel est l'impact de ces interactions *NCO* sur les résultats. La figure 7 présente les résultats de l'exécution sur 128 cœurs. Les résultats pour *SSD* (figure 7(a)) et *EA* (7(b)) sont quasi identiques. Les quelques variations s'expliquent par les interactions *NCO* traitées en fin de pas temps par la politique *SSD*. En revanche, les résultats de *OLZ* (figure 7(c)) présentent de nombreuses différences, malgré une tendance identique.



(a) SSD



(b) EA



(c) OLZ

FIGURE 7 – Résultats d'une exécution du modèle Virus

Modèle proie-prédateur. La figure 8 présente le détail des synchronisations lors de l'exécution du modèle PP. Comme pour le modèle Virus, le nombre de demandes de synchronisations croît de manière linéaire avec le nombre de cœurs. Le nombre d'appels *NCO* reste plus faible pour la politique *SS* que pour la politique *SSD*.

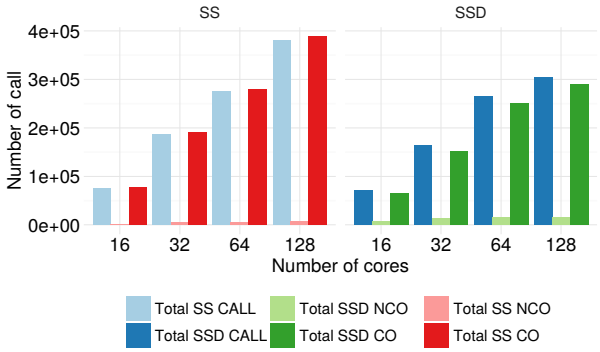


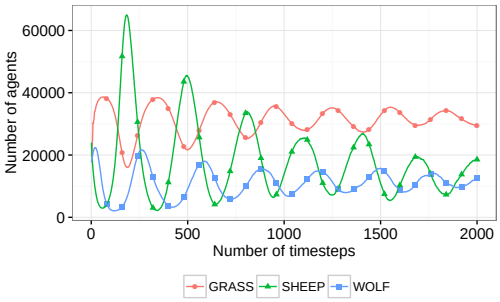
FIGURE 8 – Détail des synchronisations du modèle PP

La figure 9 présente les résultats sur 128 cœurs des politiques *SSD*, *SS* et *OLZ*. Le modèle PP est un modèle très sensible : la modification d'un paramètre peut conduire à une instabilité qui se traduit par la mort d'une des espèces. Le changement de politique induit ainsi des différences de résultats entre les courbes *SSD* (figure 9(a)) et les courbes *SS* (figure 9(c)). La figure 9(b) qui représente l'exécution sans synchronisation montre des résultats proches de la politique *SSD* (figure 9(a)). Nous retrouvons tout de même des courbes cycliques qui tendent à s'équilibrer.
Au vu des courbes, on peut s'interroger sur ce qu'il est important d'observer dans les résultats du modèle. Si nous regardons plus en détails ces figures, nous remarquons que le nombre maximal de moutons diffère, environ 60000 pour *OLZ* et *SSD* et environ 80000 pour *SS*. On remarque également que sur la figure 9(c) (synchronisation *SS*) la phase est régulière avec un décalage de l'ordre de $\pi/2$. En revanche, sur les figures 9(b) et 9(a), un décalage de phase s'effectue au cours du temps. Les courbes *OLZ* et *SSD* sont semblables et donnent des résultats erronées.

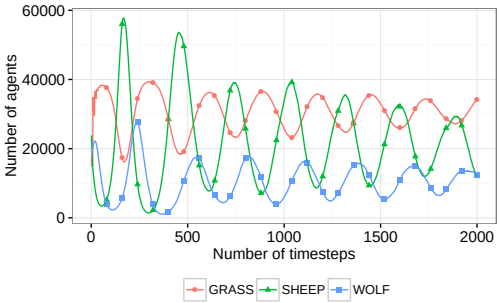
6 Conclusion

Notre étude sur l'impact des politiques de synchronisation vise à sensibiliser la communauté agent, et plus particulièrement les modélisateurs, aux problèmes liés à la parallélisation d'un modèle. Nous évaluons pour cela différentes politiques de synchronisation en lien avec différents modèles et nous mettons en évidence que, suivant le modèle à implémenter, le niveau de synchronisation a un impact sur les performances d'exécution et les résultats. A travers nos expérimentations, nous quantifions le coût de la synchronisation sur les performances de la simulation suivant les modèles et nous montrons son impact sur les résultats. La synchronisation est de fait dépendante des comportements des agents : c'est au modélisateur de prévoir l'exécution du modèle et donc d'adapter la modélisation pour prendre en compte le coût et l'impact de la synchronisation lors de la conception d'un modèle parallèle.
Pour la suite nos travaux s'orientent vers une analyse de

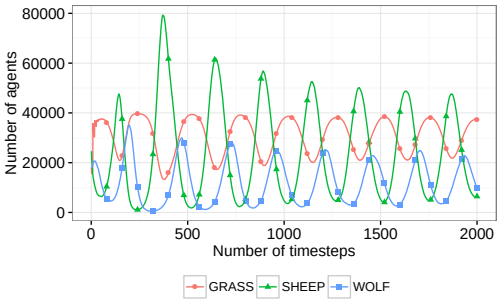
©AfIA 2020



(a) SSD



(b) OLZ



(c) SS

FIGURE 9 – Résultats d'une exécution du modèle PP

nombreux modèles en vue d'identifier les problèmes génériques de synchronisation et de proposer des politiques efficaces, qui pourraient être implémentées dans une plateforme pour simplifier le travail du modélisateur.

Remerciements

Les calculs présentés dans cet article ont été effectués sur le calculateur du Mésocentre de calcul de Franche-Comté

Références

[1] E. S. Angelotti, E. E. Scalabrin, and B. C. Ávila. Pandora : a multi-agent system using paraconsistent logic. In *Computational Intelligence and Multimedia Applications, ICCIMA*, pages 352–356. IEEE, 2001.

[2] K. Mani Chandy and Jayadev Misra. Distributed simulation : A case study in design and verification of distributed programs. *IEEE Transactions on software engineering*, (5) :440–452, 1979.

[3] AL Chin, AD Worth, AC Greenough, S Coakley, M Holcombe, and M Kiran. Flame : An approach to the parallelisation of agent-based applications. *Work*, 501 :63259, 2012.

[4] G. Cordasco, R. Chiara, A. Mancuso, D. Mazzeo, V. Scarano, and C. Spagnuolo. A Framework for Distributing Agent-Based Simulations. In *Euro-Par 2011 : Parallel Processing Workshops*, volume 7155 of *LNCS*, pages 460–470, 2011.

[5] Jacques Ferber and Jean-François Perrot. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions Paris, 1995.

[6] Olivier Gutknecht and Jacques Ferber. Madkit : A generic multi-agent platform. In *4th intl Conf. on Autonomous agents*, pages 78–79. ACM, 2000.

[7] David R Jefferson. Virtual time. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)*, 7(3) :404–425, 1985.

[8] A. Rousset, B. Herrmann, C. Lang, and L. Philippe. A survey on parallel and distributed multi-agent systems for high performance computing simulations. *Computer Science Review*, 22 :27 – 46, nov 2016.

[9] A. Rousset, B. Herrmann, C. Lang, L. Philippe, and H. Bride. Nested graphs : A model to efficiently distribute multi-agent systems on hpc clusters. *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, 30(7) :e4407, 2018.

[10] B. Samadi. Distributed simulation, algorithms and perfomance analysis. *PhD Thesis, Computer Science Department, Univ. of California, Los Angeles*, 1985.

[11] P. Taillandier, DA. Vo, E. Amouroux, and A. Drogoul. GAMA : A Simulation Platform That Integrates Geographical Information Data, Agent-Based Modeling and Multi-scale Control. In *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, volume 7057, pages 242–258. Springer, 2012.

[12] S. Tisue and U. Wilensky. Netlogo : Design and implementation of a multi-agent modeling environment. In *Proceedings of Agent*, volume 2004, pages 7–9, 2004.

[13] U. Wilensky. Netlogo flocking model. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL*, 1998.

[14] U. Wilensky. Netlogo virus model. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL*, 1998.

[15] U. Wilensky. Netlogo wolf sheep predation (docked) model. *Center for connected learning and computer-based modeling, Northwestern Univ., Evanston, IL*, 2005.

[16] Yadong Xu, Wentong Cai, Heiko Aydt, Michael Lees, and Daniel Zehe. Relaxing synchronization in parallel agent-based road traffic simulation. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 27(2) :14 :1–14 :24, May 2017.

Knowledge Compilation for Action Languages

Sergej Scheck[1], Alexandre Niveau[1], Bruno Zanuttini[1]

[1] Normandie Univ.; UNICAEN, ENSICAEN, CNRS, GREYC, 14000 Caen, France

sergej.scheck,alexandre.niveau,bruno.zanuttini@unicaen.fr

Résumé

Nous étudions différents langages permettant de représenter des actions non déterministes pour la planification, du point de vue de la compilation de connaissances. Précisément, nous considérons la question de la concision des langages (quelle est la taille de la description d'une action dans chaque langage?) et des questions de complexité (quelle est la complexité algorithmique de décider si un état est un successeur d'un autre pour une action décrite dans l'un de ces langages?). Nous étudions une version abstraite et nondéterministe de PDDL, le langage des théories d'actions en NNF, et DL-PPA, la logique dynamique des affectations propositionnelles parallèles. Nous montrons que ces langages ont une concision différente, et une complexité de requête différente : DL-PPA est le plus concis et NNF le moins concis, et décider si un état est successeur d'un autre est déjà NP-complet pour PDDL nondéterministe.

Mots-clés

Planification, compilation de connaissances, logique dynamique des affectations propositionnelles, planning domain definition language, théories d'actions

Abstract

We study different languages for representing nondeterministic actions in planning from the point of view of knowledge compilation. Precisely, we consider succintness issues (how succinct is the description of an action in each language?) and complexity issues (how hard is it to decide whether a state is a successor of another one through some action described in one of these languages?). We study an abstract, nondeterministic version of PDDL, the language of NNF action theories, and DL-PPA, the dynamic logic of parallel propositional assignments. We show that these languages have different succinctness and different complexity of queries: DL-PPA is the most succinct one and NNF the least succinct, and deciding successorship is already NP-complete for nondeterministic PDDL.

Keywords

Planning, knowledge compilation, dynamic logic of propositional assignments, planning domain definition language, action theories

1 Introduction

In automated planning, a central aspect of the description of problems is the formal representation of actions. Such representations are indeed needed for specifying the actions available to the agent (PDDL [15] is a standard language for this), and also for the planners to manipulate them while searching for a plan.

In this paper, we consider different representation languages from the point of view of knowledge compilation [9]. Knowledge compilation is the study of formal languages under the point of view of queries (how efficient is it to answer various queries depending on the language?), transformations (how efficient is it to transform or combine different representations in a given language?), and succinctness (how concise is it to represent knowledge in each language?). Most work in knowledge compilation has been done on representations of Boolean functions, for instance, by Boolean formulas in negation normal form, by ordered binary decision diagrams, etc. [9].

As far as we know there has been no systematic study of languages for representing actions per themselves. This is however an important problem, as planners need to query action representations again and again while searching for a plan (for instance, to find out which actions are applicable at the current node of the search tree), and typically start by transforming the action specifications into some representation suited for this. Hence having a clear picture of the properties of languages is clearly of interest for the development of such planners.

However, there have been a few papers studying aspects related to knowledge compilation for planning. For instance, Nebel has considered questions very similar to ours [17]. His study uses a rather powerful notion of compilation, where translations from one formal language to another are allowed to change the set of variables and the set of actions.[1] This captures compilation schemes where one is interested in preserving the existence of plans and their size. Contrastingly, we are interested in a strict notion of compilation, where the set of variables and the specification of initial states and goals are unchanged by the translation, while each action is translated into one with the same

[1] Actions are called "operators" there.

©AfIA 2020

semantics. This is more demanding, but makes translations applicable in broader settings (for instance, to problems where we want to count or enumerate plans). Bäckström and Jonsson have studied representations of plans with respect to their size and the complexity of retrieving the individual actions which they prescribe at each step [3]. This is also related to our work, but with a focus on languages for representing plans, while we study languages for representing actions.

We are interested here in (purely) nondeterministic actions, which lie at the core of fully observable nondeterministic planning and of conformant planning [19, 1, 12, 16, 20, 13]. We moreover consider propositional domains, in which states are assignments to a given set of propositions. The languages which we consider are of different natures: (grounded) **PDDL** is a specification language, **NNF** action theories are typically used as an internal representation by solvers, and **DL-PPA** is a logic allowing to specify programs and to reason about them. However, all of them can be viewed as languages for representing actions (as nondeterministic mappings from states to states), and their diversity (allowed constructs, representation of persisting values) allows us to give a clear picture. Our mid-term goal is to give a systematic picture of languages arising from all combinations of allowed constructs among the ones introduced in the literature (like nondeterministic choice, iteration, persistency by default, etc.).

The paper is structured as follows. In Section 2 we give the necessary background about actions and logic, and in Section 3 we formally define the action languages which we will consider. We then give our results: in Section 4 we prove positive results about polynomial-time translations between the languages, then in Section 5 we study the complexity of deciding whether a state is a possible successor of another state given an action description in one of these languages, and in Section 6 we give negative results about polynomial translations, which allows us to determine which languges are strictly more succinct than others. Finally, we conclude in Section 7.

2 Preliminaries

For any planning problem we consider a fixed finite set $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$ of propositional variables. A subset of P is called a *P-state*, or simply a *state*. The intended interpretation of a state $s \in 2^P$ is the assignment to P in which all variables in s are true, and all variables in $P \setminus s$ are false. As an example, for $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, $s = \{p_1, p_3\}$ denotes the state in which p_1 and p_3 are true and p_2 is false We write $\mathbb{P}$ for $\{p_i \mid i \in \mathbb{N}\}$.

Actions In this article we consider (purely) nondeterministic actions, which map states to sets of states. Hence a single state may have several successors through the same action, in contrast with deterministic actions (which map states to states), and that no relative likelihood is encoded between the successors of a state, in contrast with stochastic actions (which map states to probability distributions over states).

Definition 1 (action)**.** *Let P be a finite set of propositional variables. A* nondeterministic P-action *is a mapping a from 2^P to $2^{(2^P)}$. The elements of $a(s)$ are called* a-successors *of s.*

In the literature, actions are often considered together with preconditions which have to be satisfied to allow the execution of the action. However, for the results in this paper it is not important whether we require the action preconditions to be written explicitly, so for simplicity we assume them to be implicit. This means that an action a is applicable to a state s if and only if there exists at least one a-successor state s' of s.

Example 2. *We condier a hunting example. Let*

$$P = \{\text{rabbit_in_sight, rabbit_alive, loaded_rifle}\}.$$

The action shoot_rabbit *can be described as "if* rabbit_alive *then: if* loaded_rifle *and* rabbit_in_sight*, then not* loaded_rifle *and either* rabbit_alive *and not* rabbit_in_sight *or not* rabbit_alive *and* rabbit_in_sight*, otherwise state unchanged". The action is applicable only if the rabbit is alive (otherwise it is not sensible to shoot at him). In this case, if the hunter is ready to shoot (the rifle is loaded and he can see the rabbit), then he tries to shoot the rabbit (he might miss the rabbit who hears the shot and runs away, so the action is nondeterministic), and if he is not ready to shoot, then nothing happens.*
Let $s = \{\text{rabbit_in_sight, rabbit_alive, loaded_rifle}\}$ *be the state where all three variables are true. Then* shoot_rabbit(s) *is the set of states ("successors")* $\{s', s''\}$ *with* $s' = s \setminus \{\text{rabbit_alive, loaded_rifle}\} = \{\text{rabbit_in_sight}\}$ *and* $s'' = s \setminus \{\text{rabbit_in_sight, loaded_rifle}\} = \{\text{rabbit_alive}\}$.

In this article, we are interested in the properties of *representations* of actions in various langugages.

Definition 3 (action language)**.** *An* action language *is an ordered pair $\langle L, I\rangle$, where L is a set of* action descriptions *and I is an* interpretation function*. Action descriptions are ordered pairs $\langle \alpha, P\rangle$ where α is a formula and P is a finite subset of $\mathbb{P}$. The interpretation function I maps every action description $\langle \alpha, P\rangle \in L$ to a P-action $I(\alpha, P)$.*

Observe that P is *a priori* not related to the variables of α (this depends on the language). For instance, variables of P not mentioned in an **NPDDL** expression α are assumed to persist, and a formula may also use variables outside of P and even outside of $\mathbb{P}$ (called *auxiliary* variables), as in **NNFAT**.

©AfIA 2020

If the language $\langle L, I\rangle$ and the set P are clear from the context (or we just consider them to be fixed), then we write $\alpha(s)$ instead of $I(\alpha, P)(s)$ for the set of all α-successors of s.
In this article, we are mostly interested in translations between languages.

Definition 4 (translation)**.** *Let $\langle L_1, I_1\rangle$ and $\langle L_2, I_2\rangle$ be two action languages. A function $f : L_1 \to L_2$ is a* (proper) translation *if $I_1(\alpha, P) = I_2(f(\alpha, P), P)$ holds for all $\langle \alpha, P\rangle \in L_1$.*

In words, this means that the L_1-action description $\langle \alpha, P\rangle$ and the L_2-formula $f(\alpha, P)$ describe the same P-action. Again, when P is clear from the context, we write $f(\alpha)$ for $f(\alpha, P)$.
The function f is called a *polynomial-time* translation if it can be computed in time polynomial in the size of α and P. It is called a *polynomial-size* translation if the size of $f(\alpha, P)$ is bounded by a fixed polynomial in the size of α together with the size of P. Clearly, a polynomial-time translation is necessarily also a polynomial-size one, but a polynomial-size translation may not be polynomial-time.

Logic A Boolean formula φ is said to be in *negation normal form* (**NNF** for short) if it is built up from literals using conjunctions and disjunctions, *i.e.*, if it is generated by the grammar

$$\varphi ::= p \mid \neg p \mid \varphi \wedge \varphi \mid \varphi \vee \varphi$$

where p ranges over $\mathbb{P}$. We also use the shorthand notation $\top$ for $p \vee \neg p$ and $\bot$ for $p \wedge \neg p$, for an arbitrary $p \in \mathbb{P}$. For such a formula φ, $\mathrm{V}(\varphi)$ denotes the set of variables occuring in φ.
The set of formulas in **NNF** is complete, that is, every Boolean function can be described by an **NNF** formula. It is important to note that a formula φ with $\mathrm{V}(\varphi) \subseteq P$ for some set of variables P can be regarded as a formula over P (and the truth value of the corresponding Boolean function does not depend on the variables in $P \setminus \mathrm{V}(\varphi)$). For a boolean formula φ over a set of variables P and a state $s \subseteq P$, we write $s \models \varphi$ if φ evaluates to $\top$ under the assignment s.

Notation As a general rule, we use variables $a, b, \ldots$ for actions, $\alpha, \beta, \ldots$ for action expressions (in some language), and $\varphi, \psi, \ldots$ for logical formulas. Since action descriptions are also formulas in some language, we reserve the term "expression" for action descriptions and the term "formula" for logical formulas occuring in them.

Representations In the whole article we assume the expressions and formulas of action languages to be "flat", *i.e.*, that the amount of memory space required to store the expression or formula is its number of symbols (without the parentheses). This is to be contrasted with representations of NNF formulas (in particular) in which isomorphic subformulas are assumed to be represented only once, with any superformula pointing to this shared representation, a representation widely used in the literature about knowledge compilation [9]. We however wish to highlight that all our results would go through if we assumed such "circuit" (or "DAG") representations for formulas (we leave the case of circuit representations of expressions for future work).

3 Action Languages

In this section we formally define the action languages which we study later.

Variants of PDDL The first language which we consider is the well-known planning domain description language (**PDDL**). This language is a standardized one used for specifying actions at the relational level, widely used as an input for planners, especially in the international planning competitions [15, 10, 11]. Since we are interested in nondeterministic actions, we consider a nondeterministic variant of **PDDL** inspired by **NPDDL** [6], and so as to abstract away from the precise syntax of the specification language, we consider an idealized version. Finally, we consider a grounded version of **PDDL**, namely, a propositional one. Still we use the name "**NPDDL**", since we use essentially the same constructs.
We first define the syntax of **NPDDL**.

Definition 5 (**NPDDL** action descriptions)**.** *An* **NPDDL** action description *is an ordered pair $\langle \alpha, P\rangle$, where α is an expression generated by the grammar*

$$\alpha \ ::= \varepsilon \mid p \mid \neg p \mid \alpha \,\&\, \alpha \mid \varphi \rhd \alpha \mid (\alpha \mid \alpha)$$

where p ranges over P and φ over Boolean formulas in **NNF** *over P.*

Intuitively,

- ε describes the action with no effect (the only successor of s is s itself),
- p (resp. $\neg p$) is the action which makes p true (resp. false),
- $\&$ denotes simultaneous execution (with no successor if the operands are inconsistent together),
- $\rhd$ denotes conditional execution,
- $\mid$ denotes nondeterministic choice,

and, importantly, variables not explicitly modified by the action are assumed to keep their value.
We insist that this syntax is an idealization of nondeterministic (grounded) **PDDL**; for instance, the action which we write $x \rhd \big(y | (\neg y \,\&\, z)\big)$ would be written

```
when x (oneof y (and (not y) z))
```

with the syntax of **NPDDL** [6].
Action descriptions in **NPDDL** are interpreted as actions as follows.

Definition 6 (semantics of **NPDDL**). *The* interpretation function for **NPDDL** *is the function I defined by $I(\alpha, P)(s) = \{(s \cup e^+) \setminus e^- \mid \langle e^+, e^-\rangle \in M(\alpha, s)\}$, where $M(\alpha, s)$ is the set of possible modifications of s caused by α, defined inductively by*

- $M(\varepsilon, s) = \{\langle\emptyset, \emptyset\rangle\}$,
- $M(p, s) = \{\langle\{p\}, \emptyset\rangle\}$ *and* $M(\neg p, s) = \{\langle\emptyset, \{p\}\rangle\}$,
- $M(\varphi \rhd \alpha, s) = M(\alpha, s)$ *if* $s \models \varphi$, *else* $\{\langle\emptyset, \emptyset\rangle\}$,
- $M(\alpha_1 \,\&\, \alpha_2, s) = \{\langle e_1^+ \cup e_2^+, e_1^- \cup e_2^-\rangle \mid \langle e_1^+, e_1^-\rangle \in M(\alpha_1, s), \langle e_2^+, e_2^-\rangle \in M(\alpha_2, s), e_1^+ \cap e_2^- = e_1^- \cap e_2^+ = \emptyset\}$,
- $M(\alpha_1 \mid \alpha_2, s) = M(\alpha_1, s) \cup M(\alpha_2, s)$.

When we want to denote simultaneous execution of all action descriptions in a set A, we write $\&_{\alpha\in A}\,\alpha$. Also note that the action description $p \,\&\, \neg p$ (for an arbitrary $p \in \mathbb{P}$) defines a nonexecutable action. Hence it can be used as a subaction for encoding a precondition, and we use $\bot$ as shorthand notation for it.

Example 7 (continued). *The following is an* **NPDDL** *action description for the action* shoot_rabbit *of Example 2.*

$$\begin{aligned}
&(\neg\text{rabbit_alive} \rhd \bot)\\
\&\quad &\big((\text{rabbit_alive} \wedge \text{rabbit_in_sight} \wedge \text{loaded_rifle})\\
&\quad \rhd(\neg\text{loaded_rifle}\\
&\qquad \&(\neg\text{rabbit_alive} \mid \neg\text{rabbit_in_sight}))\big)
\end{aligned}$$

We are also interested in the language **NPDDL** as extended by the sequential execution operator ";".

Definition 8 (**NPDDL**$_{\text{seq}}$). *The language* **NPDDL**$_{\text{seq}}$ *is the language in which action descriptions are generated by the following grammar:*

$$\alpha \;::=\; \varepsilon \mid p \mid \neg p \mid \alpha \,\&\, \alpha \mid \varphi \rhd \alpha \mid (\alpha \mid \alpha) \mid \alpha; \alpha$$

and the interpretation function is the same as that of **NPDDL** *for all constructs, augmented with*

$$(\alpha_1; \alpha_2)(s) = \{s'' \mid \exists s' \in \alpha_1(s) : s'' \in \alpha_2(s')\}$$

NNF action theories We now define the second language which we consider, namely that of (**NNF**) action theories. Such representations are typically used by planners which reason explicitly on *sets of states* (aka *belief states*), since they allow for symbolic operations on belief states and action descriptions [8, 7, 20]. We consider action theories represented in **NNF**, which encompasses representations usually used like OBDDs or DNFs.
To prepare the definition we associate a variable $p' \in \mathbb{P}'$ to each variable $p \in \mathbb{P}$, where $\mathbb{P}'$ is a disjoint copy of $\mathbb{P}$; p' is intended to denote the value of p *after* the action took place, while p denotes the value *before*.

Definition 9 (**NNFAT**). *An* **NNFAT** *action description is an ordered pair $\langle\alpha, P\rangle$ where α is a Boolean formula in* **NNF** *over the set of variables $P \cup \{p' \mid p \in P\}$. The interpretation of $\langle\alpha, P\rangle$ is defined by*

$$I(\alpha, P)(s) = \{s' \mid s \cup \{p' \mid p \in s'\} \models \alpha\}$$

In words, an (**NNF**) action theory represents the set of all ordered pairs $\langle s, s'\rangle$ such that s' is a successor of s, as a Boolean formula over variables in $P \cup \{p' \mid p \in P\}$. Importantly, **NNFAT** does not assume the frame axiom, so that if, for example, a variable does not appear at all in an **NNFAT** action description, then this means that its value after the execution of the action can be arbitrary. For instance, the action description $\langle x' \vee (\neg y \vee z'), \{x, y, z\}\rangle$ represents an action which either (1) sets x to true and y, z to any value (nondeterministically), or (2) sets z to true and x, y to any value, in case y is true in the initial state, and otherwise sets each variable to any value, or (3) performs any consistent combination of (1) and (2).
Observe that a conjunct over variables in P in an **NNFAT** action description in fact encodes a precondition.

Example 10 (continued). *The action* shoot_rabbit *of Example 2 can be written as (we use $\rightarrow$ and $\leftrightarrow$ for readability)*

$$\begin{aligned}
&\text{rabbit_alive}\\
\wedge\quad &(\text{loaded_rifle} \wedge \text{rabbit_in_sight})\\
&\rightarrow \Big(\big((\neg\text{rabbit_in_sight}' \wedge \text{rabbit_alive}')\\
&\qquad \vee(\text{rabbit_in_sight}' \wedge \neg\text{rabbit_alive}')\big)\\
&\qquad \wedge\big(\neg\text{loaded_rifle}'\big)\Big)\\
\wedge\quad &\big((\text{rabbit_alive} \not\leftrightarrow \neg\text{rabbit_alive}')\\
&\quad \vee(\text{rabbit_in_sight} \not\leftrightarrow \text{rabbit_in_sight}')\\
&\quad \vee(\text{loaded_rifle} \not\leftrightarrow \text{loaded_rifle}')\big)\\
&\rightarrow (\text{loaded_rifle} \wedge \text{rabbit_in_sight})
\end{aligned}$$

As can be seen, encoding in **NNFAT** *the fact that the values of variables persist unless stated otherwise, typically requires subformulas (here the last conjunct) playing the same role as successor-state axioms in the situation calculus [18]. This typically requires a lot of space. We will give a formal meaning to this remark later in the paper (Proposition 30).*

Obviously, every action can be represented in this language, since the language of **NNF** formulas is complete for Boolean functions. We will see later that all the other languages that we study in this article are at least as succinct as **NNFAT**; hence in particular, they are all complete as well.

DL-PPA The last language that we consider in this paper is the *dynamic logic of parallel propositional assignments* (**DL-PPA** for short), which has been introduced by Herzig *et al.* as an extension of the language **DL-PA** [14].

©AfIA 2020

DL-PA was initially proposed for reasoning about imperative programs [5]. For instance, deciding whether there exists a plan from a given initial state to a goal given as a Boolean formula φ using actions $\alpha_1, \ldots, \alpha_k$ amounts to deciding whether the initial state satisfies the **DL-PA** formula $\langle(\alpha_1 \cup \ldots \cup \alpha_k)^*\rangle\varphi$. However, **DL-PPA** can also be used as an action language [14].

Definition 11 (**DL-PPA** action descriptions)**.** *A* **DL-PPA** action description *is an ordered pair* $\langle \alpha, P\rangle$ *where* α *is an expression generated by the following grammar:*

$$\begin{array}{lll} \alpha & ::= & p \leftarrow \varphi \mid \varphi? \mid \alpha;\alpha \mid \alpha \cup \alpha \mid \alpha \sqcap \alpha \mid \alpha \sqcup \alpha \mid \ \alpha^* \\ \varphi & ::= & p \mid \top \mid \neg\varphi \mid \varphi \vee \varphi \mid \langle\alpha\rangle\varphi \end{array}$$

where p *ranges over* P*.*

In the literature, action descriptions are typically called **DL-PPA** *programs*, and formulas φ as in the definition are typically called **DL-PPA** *formulas*. Intuitively, the symbols mean the following:

- $p \leftarrow \varphi$ evaluates φ in the current state and assigns the resulting value to p,
- $\varphi?$ tests whether φ is satisfied in the current state and fails if it is not the case,
- ; denotes sequential execution,
- $\cup$ denotes (exclusive) nondeterministic choice, that is, execution of exactly one subaction,
- $\sqcap$ denotes parallel execution,
- $\sqcup$ denotes nonexclusive nondeterministic choice, that is, execution of one subaction or of both subactions,
- $*$ denotes looping an arbitrary number of times,
- $\langle\alpha\rangle\varphi$ denotes the modal construction "there is an execution of α ending in a state which satisfies φ".

We also use the shorthand notation $+p$ (resp. $-p$) for $p \leftarrow \top$ (resp. $p \leftarrow \bot$) and $[\alpha]\varphi$ for $\neg\langle\alpha\rangle\neg\varphi$ ("all executions of α end in a state which satisfies φ"). Moreover, as follows from the semantics which is defined below, $\top?$ denotes an empty action mapping any state to itself, and $(\varphi?;\alpha) \cup (\neg\varphi?;\beta)$ denotes the construction "if φ then α else β".
Also observe that every **NNF** formula can be rewritten into an equivalent **DL-PPA**-formula (without $\wedge$) in linear time, since using De Morgan's laws we can always rewrite $\varphi\wedge\psi$ into the logically equivalent formula $\neg(\neg\varphi \vee \neg\psi)$.
Suppose that we are given the set P. To every formula there is an associated valuation which is the set of states that are models of the formula. The interpretations of programs are ternary relations on the set of states 2^P. We denote the valuation of a formula and the interpretation of a program by $\|\varphi\|$ and $\|\alpha\|$ respectively. $(s, s', w) \in \|\alpha\|$ means that there is an execution of α that leads from s to s' by assigning the variables in w. The formulas in **DL-PPA** are interpreted as follows, where $s, s', \hat{s} \ldots$ denote states and $w, w_1, \hat{w}_1 \ldots$ denote subsets of P:

Definition 12.

$$\begin{aligned} \|p\| &= \{s \mid p \in s\} \\ \|\top\| &= 2^P \\ \|\neg\varphi\| &= 2^P \setminus \|\varphi\| \\ \|\varphi_1 \vee \varphi_2\| &= \|\varphi_1\| \cup \|\varphi_2\| \\ \|\langle\alpha\rangle\varphi\| &= \{s \mid \exists w\ \exists s' : (s, s', w) \in \|\alpha\| \wedge s' \in \|\varphi\|\} \end{aligned}$$

The programs are interpreted in the following way:

$$\begin{aligned} \|p \leftarrow \varphi\| =& \{(s, s \cup \{p\}, \{p\}) \mid s \in \|\varphi\|\} \\ & \cup \{(s, s \setminus \{p\}, \{p\}) \mid s \notin \|\varphi\|\} \\ \|\varphi?\| =& \{(s, s, \emptyset) \mid s \in \|\varphi\|\} \\ \|\alpha_1;\alpha_2\| =& \{(s, s', w) \mid \exists \hat{w}_1\ \exists \hat{w}_2\ \exists \hat{s}' : (s, \hat{s}, \hat{w}_1) \in \|\alpha_1\| \\ & \wedge\ (\hat{s}, s', \hat{w}_2) \in \|\alpha_2\| \ \wedge\ w = \hat{w}_1 \cup \hat{w}_2\} \\ \|\alpha_1 \cup \alpha_2\| =& \|\alpha_1\| \cup \|\alpha_2\| \\ \|\alpha_1 \sqcap \alpha_2\| =& \{(s, s', w) \mid \exists s'_1\ \exists s'_2\ \exists w_1\ \exists w_2 : (s, s'_1, w_1) \\ & \in \|\alpha_1\|)\} \wedge (s, s'_2, w_2) \in \|\alpha_2\| \wedge w_1 \cap w_2 \cap s'_1 \\ & = w_1 \cap w_2 \cap s'_2 \wedge w = w_1 \cup w_2 \\ & \wedge s' = (s \setminus w) \cup (s'_1 \cap w_1) \cup (s'_2 \cap w_2) \\ \|\alpha_1 \sqcup \alpha_2\| =& \|\alpha_1 \cup \alpha_2 \cup (\alpha_1 \sqcap \alpha_2)\| \\ \|\alpha^*\| =& \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \|\underbrace{\alpha;\alpha;\ldots;\alpha}_{k \text{ times}}\| \end{aligned}$$

When applying **DL-PPA** *to planning tasks we identify valuations with states and describe actions as programs: an action* α *is described by a program* α *with* $\alpha(s) = \{s' \mid \exists w : (s, w, s') \in \|\alpha\|\}$*.*

Finally, we will be interested in the restriction of **DL-PPA** obtained when disallowing nonexclusive choice, the Kleene star, and modalities.

Definition 13 (restricted **DL-PPA**)**.** *The language* restricted **DL-PPA** *is the language in which action descriptions* $\langle\alpha, P\rangle$ *are generated by the following grammar:*

$$\begin{array}{lll} \alpha & ::= & p \leftarrow \varphi \mid \varphi? \mid \alpha;\alpha \mid \alpha \cup \alpha \mid \alpha \sqcap \alpha \\ \varphi & ::= & p \mid \top \mid \neg\varphi \mid \varphi \vee \varphi \end{array}$$

where p *ranges over* P*, and whose semantics is the same as* **DL-PPA** *restricted to this language.*

Example 14 (continued)**.** *The action* shoot_rabbit *of our running example 2 can be described as follows in (restricted)* **DL-PPA***:*

$$\begin{array}{l} \text{rabbit_alive?;} \\ \big((\text{rabbit_in_sight} \wedge \text{loaded_rifle})?; \\ \quad (-\text{rabbit_alive} \cup -\text{rabbit_in_sight}); \\ \quad -\text{loaded_rifle}\big) \\ \cup\big(\neg\text{rabbit_in_sight} \vee \neg\text{loaded_rifle}?\big) \end{array}$$

Example 15. *The following* **DL-PPA** *program illustrates the meaning of the modal operators and of the Kleene star:*

$$\big(\langle \text{shoot_rabbit}; \text{shoot_rabbit}^*\rangle \neg \text{rabbit_alive?}; \text{shoot_rabbit}\big) \cup \big(-\text{loaded_rifle}\big)$$

This action can be read as follows. If the hunter has a chance to kill the rabbit (which especially means that in the current state the rabbit is alive, as ensured by the first occurrence of shoot_rabbit*), then the hunter will shoot. Otherwise he will be disappointed and shoot in the air because he has no hope for success. But there could be several reasons for him being unable to kill the rabit: the rabbit is already dead, or the rifle is not loaded, or he does not see the rabbit...*

Note that **DL-PPA** has all the features of **NPDDL**, like the implicit frame axiom, and it additionally allows for modal operators. Hence, summarizing, we study languages with and without the sequence operator, with and without the implicit frame axiom, and with and without modalities. A mid-term goal of our work is to study combinations of such features in a systematic way, and we view this restricted set of languages as a meaningful set of representative languages to start with.

4 Polynomial-Time Translations

In this section, we exhibit translations between some of our languages of interest which can be carried out in polynomial time (hence, *a fortiori*, are polynomial-size). We remark that the identity function is an obvious polynomial-time translation from restricted **DL-PPA** into **DL-PPA**.

We first show that any **NNFAT** action description α can be translated in polynomial time to an **NPDDL** action description $f(\alpha)$. The translation looks like a simple rewriting of α, but we have to care about (1) the fact that in **NNFAT**, a variable not explicitly set to a value can take any value in the next state s', contrary to persistency by default in **NPDDL**, and (2) the fact that $\vee$ is inclusive-or in **NNFAT**, while nondeterministic choice in **NPDDL** is interpreted as one effect taking place (but not both). For (1) we will make explicit in the **NPDDL** translation that these variables can take any value, and for (2) it will turn out that in the translation of $\alpha_1 \vee \alpha_2$ into $f(\alpha_1) \,|\, f(\alpha_2)$, $f(\alpha_1)$ will encode all possible transitions of α_1, including those of $\alpha_1 \wedge \alpha_2$ (the "inclusive part" of the $\vee$), and similarly for $f(\alpha_2)$.

The translation f is defined inductively as follows for an **NNFAT** action description $\langle \alpha, P\rangle$:

1. if $\mathrm{V}(\alpha) \subseteq P$, then $f(\alpha) = \big(\neg\alpha \rhd \bot\big) \,\&\, \big(\alpha \rhd (\mathop{\&}_{p\in P}(p \,|\, \neg p))\big)$;
2. if $\mathrm{V}(\alpha) \not\subseteq P$ and $\mathrm{V}(\alpha_1) \subseteq P$, then $f(\alpha_1 \vee \alpha_2) = \big(\neg\alpha_1 \rhd f(\alpha_2)\big) \,\&\, \big(\alpha_1 \rhd (\mathop{\&}_{p\in P}(p \,|\, \neg p))\big)$; dually for $\mathrm{V}(\alpha_2) \subseteq P$;
3. if $\mathrm{V}(\alpha) \not\subseteq P$ and $\mathrm{V}(\alpha_1) \subseteq P$, then $f(\alpha_1 \wedge \alpha_2) = \big(\alpha_1 \rhd f(\alpha_2)\big) \,\&\, \big(\neg\alpha_1 \rhd \bot\big)$; dually for $\mathrm{V}(\alpha_2) \subseteq P$;
4. $f(p') = p \,\&\, \Big(\mathop{\&}_{q\in P, q\neq p}(q \,|\, \neg q)\Big)$;
5. $f(\neg p') = \neg p \,\&\, \Big(\mathop{\&}_{q\in P, q\neq p}(q \,|\, \neg q)\Big)$;
6. if $\mathrm{V}(\alpha_1), \mathrm{V}(\alpha_2) \not\subseteq P$, $f(\alpha_1 \wedge \alpha_2) = f(\alpha_1) \,\&\, f(\alpha_2)$;
7. if $\mathrm{V}(\alpha_1), \mathrm{V}(\alpha_2) \not\subseteq P$, $f(\alpha_1 \vee \alpha_2) = f(\alpha_1) \,|\, f(\alpha_2)$.

Observe for future reference that for all states s, all possible modifications $\langle e^+, e^-\rangle$ in $M(f(\alpha), s)$ are P-complete in the sense that $e^+ \cup e^- = P$ (all variables are mentioned in e^+ or e^-). This is easily seen by induction on the definition of f.

Proposition 16. *Let $\langle \alpha, P\rangle$ be an* **NNFAT** *action description. Then we have $s' \in \alpha(s) \iff s' \in f(\alpha)(s)$.*

Proof. The translation is clearly polynomial-time, since the "gadgets" added to the rewriting in the first 5 cases involve no recursive call of f. We only give the proof of correcteness for the last two cases (the others are easy).

6. Let $\alpha = \alpha_1 \wedge \alpha_2$. Then $s' \in \alpha(s)$ is equivalent to $s' \in \alpha_1(s) \wedge s' \in \alpha_2(s)$, and by the induction hypothesis this is equivalent to $s' \in f(\alpha_1)(s) \wedge s' \in f(\alpha_2)(s)$. Now since the possible modifications of $f(\alpha_1)$ and $f(\alpha_2)$ are P-complete, it is easily seen from the definition of the semantics of **NPDDL** that the set of possible modifications $M(f(\alpha_1) \,\&\, f(\alpha_2), s)$ is exactly $M(f(\alpha_1), s) \cap M(f(\alpha_2), s)$, so that $s' \in f(\alpha_1)(s) \wedge s' \in f(\alpha_2)(s)$ is equivalent to $s' \in \big(f(\alpha_1) \,\&\, f(\alpha_2)\big)(s)$, that is, to $s' \in f(\alpha)(s)$.
7. Finally let $\alpha = \alpha_1 \vee \alpha_2$. Assume first $s' \in \alpha(s)$, and by symmetry $s' \in \alpha_1(s)$; then by the induction hypothesis we have $s' \in f(\alpha_1)(s)$ and hence, $s' \in \big(f(\alpha_1) \,|\, f(\alpha_2)\big)(s) = f(\alpha)(s)$. Conversely, assume $s' \in f(\alpha)(s)$, then by the definition of $f(\alpha)$ and the semantics of $|$ we have $s' \in f(\alpha_1)(s)$ or $s' \in f(\alpha_2)(s)$. Assume by symmetry $s' \in f(\alpha_1)(s)$. Then by the induction hypothesis we have $s' \in \alpha_1(s)$ and hence, $s' \in (\alpha_1 \vee \alpha_2)(s)$, that is, $s' \in \alpha(s)$.

□

The following propositions are quite intuitive, because $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ and restricted **DL-PPA** are essentially the same: $\varphi \rhd \ldots$ is analogous to $\varphi?$, $|$ is analogous to

©AfIA 2020

$\cup$, and $\&$ is analogous to $\sqcap$. However, we must pay attention to two facts. The first difference between the languages is that in $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$, if φ is not true in $\varphi \rhd \alpha$, then the action just does not change the current state whereas in **DL-PPA**, φ being false results in a failure. The other difference is that formulas in $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ must be in **NNF**, while **DL-PPA** does not have restrictions on the occurence of $\neg$ but does not have the $\wedge$ connective.

Proposition 17. *There is a polynomial-time translation of* $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ *into restricted* **DL-PPA**.

Proof. Consider an $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ action description α. The translation f first replaces each subformula of the form $\varphi \wedge \psi$ in α with $\neg(\neg\varphi \vee \neg\psi)$, then it computes an action description in restricted **DL-PPA** as follows:

$$\begin{array}{lcl} f(\epsilon) & = & \top? \\ f(p) & = & +p \\ f(\neg p) & = & -p \\ f(\alpha_1 \,\&\, \alpha_2) & = & f(\alpha_1) \sqcap f(\alpha_2) \\ f(\varphi \rhd \alpha) & = & \big(\varphi?; f(\alpha)\big) \cup (\neg\varphi?) \\ f(\alpha_1 \,|\, \alpha_2) & = & f(\alpha_1) \cup f(\alpha_2) \\ f(\alpha_1; \alpha_2) & = & f(\alpha_1); f(\alpha_2) \end{array}$$

It is easy to check that this translation can be computed in polynomial time and that it is correct. In particular, φ is duplicated in the fifth line but it involves no recursive call of f, hence preserving polynomial size (the rewriting of $\neg\varphi$ into a **DL-PPA** formula can be done in linear time), and $\neg\varphi?$ in the same line ensures that the action does nothing but does not fail when φ is not satisfied. □

The proof of the converse is completely symmetric.

Proposition 18. *There is a polynomial-time translation of restricted* **DL-PPA** *to* $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$.

Proof. The translation f first replaces each subformula of the form $\neg(\varphi \vee \psi)$ with $(\neg\varphi \wedge \neg\psi)$, ending up with a description in which all formulas are in **NNF**, then it computes an action description in $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ as follows:

$$\begin{array}{lcl} f(p \leftarrow \varphi) & = & (\varphi \rhd p) \,\&\, (\neg\varphi \rhd \neg p) \\ f(\varphi?) & = & (\varphi \rhd \varepsilon) \,|\, (\neg\varphi \rhd \bot) \\ f(\alpha_1; \alpha_2) & = & f(\alpha_1); f(\alpha_2) \\ f(\alpha_1 \cup \alpha_2) & = & f(\alpha_1) \,|\, f(\alpha_2) \\ f(\alpha_1 \sqcap \alpha_2) & = & f(\alpha_1) \,\&\, f(\alpha_2) \end{array}$$

□

5 Complexity of Deciding Successorship

We now turn to studying the complexity of *queries* to action descriptions. In this paper, we concentrate on the most natural query, which is formally defined by the following computational problem.

Definition 19 (IS-SUCC)**.** *Let L be an action language. The decision problem* IS-SUCC *is defined by:*

- *input: an action description $\langle \alpha, P \rangle \in L$ and two states $s, s' \subseteq P$,*
- *question: is s' an α-successor of s?*

Proposition 20. *The problem* IS-SUCC *is polynomial-time solvable for* $L = \mathbf{NNFAT}$.

Proof. From the semantics of **NNFAT** it follows that deciding $s' \in \alpha(s)$ amounts to deciding whether the assignment to $P \cup \{p' \mid p \in P\}$ induced by s, s' satisfies α, which is clearly doable in linear time. □

Proposition 21. *The problem* IS-SUCC *is in* **NP** *for* $L = \mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$.

Proof. We define a witness for a positive instance to be composed of either α_1 or α_2 for each subexpression $\alpha_1 \,|\, \alpha_2$ of α, and of a state t for each subexpression $\alpha_1; \alpha_2$ (representing the guessed intermediate state of the execution). Such a witness is clearly of polynomial size. Now verifying it amounts to verifying that when the nondeterministic choices are those encoded by the witness and the execution of sequence constructs go through the encoded intermediate states, s' is indeed an α-successor of s. This can clearly be done in polynomial time since there remains only to evaluate conditions of $\rhd$ constructs in given states and applying effects of the form p or $\neg p$. □

For showing hardness, we build a specific action able to "produce" all and only satisfiable 3-CNF formulas. For this we first define an encoding of any 3-CNF formula φ over n variables as an assignment to a polynomial number of variables.

Notation 22. *Let $n \in \mathbb{N}$ and X_n be the set of variables $\{x_1, \ldots, x_n\}$. Observe that there are a cubic number N_n of clauses of length 3 over X_n (any choice of 3 variables with a polarity for each). We fix an arbitrary enumeration $\gamma_1, \gamma_2, \ldots, \gamma_{N_n}$ of all these clauses, and we define Q_n to be the set of variables $\{q_1, q_2, \ldots, q_{N_n}\}$. Then we identify an assignment s to Q_n to the* 3-CNF *formula over X_n, written $\varphi(s)$, which for all i contains the clause γ_i if and only if $q_i \in s$ holds.*
We also write $s(\varphi)$ for the assignment to Q_n which encodes a 3-CNF *formula φ over X_n. By $\ell \in \gamma_i$ we mean that the literal ℓ occurs in the clause γ_i.*

Example 23. *Let $n = 2$, and consider an enumeration of all clauses over variables $X_2 = \{x_1, x_2\}$ which starts with $\gamma_1 = (x_1 \vee x_1 \vee x_2), \gamma_2 = (x_1 \vee x_1 \vee \neg x_2), \gamma_3 = (x_1 \vee \neg x_1 \vee x_2), \gamma_4 = (x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_2), \gamma_5 = (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee x_2), \gamma_6 = (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee \neg x_2), \ldots$. Then the* 3-CNF *$\varphi = (x_1 \vee x_1 \vee x_2) \wedge (\neg x_1 \vee \neg x_1 \vee x_2)$ is identified to the state $s(\varphi) = \{q_1, q_5\}$.*

Using Notation 22, for all $n \in \mathbb{N}$ we define the **NPDDL** action description $\langle \beta_n, Q_n \rangle$ by

$$\beta_n = \mathop{\&}_{x \in X_n} \left(\left(\mathop{\&}_{\gamma_i : x \in \gamma_i} (q_i \,|\, \varepsilon) \right) \mid \left(\mathop{\&}_{\gamma_i : \neg x \in \gamma_i} (q_i \,|\, \varepsilon) \right) \right)$$

Intuitively, β_n chooses an assignment ($\bot$ or $\top$) to each variable in X_n (outermost nondeterministic choices). Whenever it chooses one, it chooses nondeterministically some clauses which are satisfied by it, and adds them to the result. Hence it builds a satisfiable formula (which is satisfied precisely by—at least—the assignment made of its choices over each variable).

Lemma 24. *Let $n \in \mathbb{N}$ and let φ be a* 3-CNF *formula over X_n. Then φ is satisfiable if and only if $s(\varphi)$ is a β_n-successor of the state $\emptyset$.*

Since β_n can clearly be built in polynomial time given a set of variables X_n, Lemma 24 directly gives a reduction from the 3-SAT problem to the problem IS-SUCC for **NPDDL**. Hence the latter problem is **NP**-hard, and since we have shown IS-SUCC to be in **NP** for $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ (Proposition 21), we have the following.

Proposition 25. *The problem* IS-SUCC *is* **NP***-complete for $L =$* **NPDDL** *and for $L = \mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$.*

Finally, since $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ and restricted **DL-PPA** are translatable into each other in polynomial time (Propositions 17 and 18), we have the following.

Corollary 26. *The problem* IS-SUCC *is* **NP***-complete when L is restricted* **DL-PPA**.

We finally turn to **DL-PPA**.

Proposition 27. *The problem* IS-SUCC *is* **PSPACE***-complete for $L =$* **DL-PPA**.

Proof. It is known that model checking for **DL-PPA** is **PSPACE**-complete [4]. This problem is the one of checking whether a given state s is in $\|\varphi\|$ for a given **DL-PPA** formula φ. We reduce it to IS-SUCC for **DL-PPA** as follows.
Suppose that we are given a **DL-PPA** formula φ over the set $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$, and let without loss of generality $s = \{p_1, \ldots, p_k\}$. Let r (standing for "result") be a fresh variable, and build the **DL-PPA** action description $\langle \alpha, P \cup \{r\} \rangle$ with

$$\begin{aligned} \alpha \;=\; & (\langle +p_1; \ldots; +p_k; -p_{k+1}; \ldots; -p_n \rangle \varphi?; +r) \\ & \cup (\neg \langle +p_1; \ldots; +p_k; -p_{k+1}; \ldots; -p_n \rangle \varphi?; -r) \end{aligned}$$

Clearly, α can be built in time polynomial in the size of φ, and α does nothing except setting r to $\top$ if $s \in \|\varphi\|$ holds, and to $\bot$ otherwise. It follows that s is a model of φ if and only if the state $\{r\}$ is an α-successor of the state $\emptyset$.[2]

[2]The choice of $\emptyset$ is arbitrary, since the variables of φ are all set by the modalities and are used only there and hence, their initial and final values do not matter.

Hence IS-SUCC is **PSPACE**-hard for $L =$ **DL-PPA**. For membership, we reduce it to the satisfiability problem for **DL-PPA** formulas, which is in **PSPACE** [4]. Given an action description $\langle \alpha, P \rangle$ with $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$, a state $s = \{p_1, \ldots, p_k\}$ (without loss of generality) and a state s', we define φ to be the **DL-PPA** formula

$$\langle +p_1; \ldots; +p_k; -p_{k+1}; \ldots; -p_n; \alpha \rangle \Big(\bigwedge_{p \in s'} p \wedge \bigwedge_{p \in P \setminus s'} \neg p \Big)$$

Clearly, φ can be built in polynomial time, and it is satisfiable if and only if the program "go to state s and then execute α" can lead to the state s', which is just a rephrasing of s' being an α-successor of s. □

6 Succinctness

We finally study the relative succinctness of action languages. Succinctness is formally defined as follows [9].

Definition 28 (succinctness)**.** *An action language L_1 is said to be* at least as succinct as *an action language L_2, denoted by $L_1 \preceq L_2$, if there exists a polynomial-size translation from L_2 to L_1. If $L_1 \preceq L_2$ and $L_2 \not\preceq L_1$ hold, then L_1 is said to be* strictly more succinct than *L_2, written $L_1 \prec L_2$. If $L_1 \preceq L_2$ and $L_2 \preceq L_1$ hold, then L_1 and L_2 are said to be* equally succinct*.*

The succinctness relation $\preceq$ is reflexive and transitive, hence it is a preorder. However, it is not antisymmetric and thus not an order.
Clearly, if there is a polynomial-time translation from L_2 to L_1 then $L_1 \preceq L_2$ holds. Hence the following is a direct consequence of Propositions 17 and 18.

Proposition 29. *The languages $\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ and restricted* **DL-PPA** *are equally succinct.*

Our next results rely on assumptions about *nonuniform* complexity classes. Recall that **P/poly** (resp. **NP/poly**) is the class of all decision problems such that for all $n \in \mathbb{N}$, there is a polynomial-time algorithm (resp. a nondeterministic polynomial-time algorithm) which decides the problem for all inputs of size n [2]. The assumptions $\mathbf{NP} \not\subseteq \mathbf{P/poly}$ and $\mathbf{PSPACE} \not\subseteq \mathbf{NP/poly}$ which we use are standard ones; in particular, $\mathbf{NP} \subseteq \mathbf{P/poly}$ would imply a collapse of the polynomial hierarchy at the second level (Karp-Lipton theorem), and $\mathbf{PSPACE} \subseteq \mathbf{NP/poly}$ would imply a collapse at the third level, since already $\mathbf{coNP} \subseteq \mathbf{NP/poly}$ would do so [21].

Proposition 30. *There is no polynomial-size translation from* **NPDDL** *into* **NNFAT** *unless* $\mathbf{NP} \subseteq \mathbf{P/poly}$ *holds.*

Proof. We use the action description β_n that was introduced in Section 5; the size of β_n is clearly polynomial in n.

©AfIA 2020

Assume that for every **NPDDL** action description α_n there is an equivalent **NNFAT** action description α'_n of size polynomial in that of α_n. In particular, there is an **NNFAT** action description β'_n of size polynomial in n which is equivalent to β_n. Then the following is a nonuniform polynomial-time algorithm for the 3-SAT problem; given a formula φ in 3-CNF over n variables:

1. encode φ into a state $s(\varphi)$ over the set of variables Q_n as in Notation 22;
2. decide whether $s(\varphi)$ is a β'_n-successor of $\emptyset$;
3. claim that φ is satisfiable if the answer is positive, otherwise claim that φ is unsatisfiable.

All steps are polynomial-time (Proposition 20), the algorithm is correct (Lemma 24), and it depends only on the number of variables in φ (which is polynomially related to the size of φ), hence this is indeed a nonuniform polynomial time algorithm for 3-SAT. Since 3-SAT is **NP**-complete, we get **NP** $\subseteq$ **P/poly**. □

We finally consider the relative succinctness of **DL-PPA** and **NPDDL**$_{\text{seq}}$. Since model checking in **DL-PPA** is **PSPACE**-complete, there can be no polynomial time translation from **DL-PPA** to **NPDDL**$_{\text{seq}}$ unless **PSPACE** = **NP**. However, we will prove a stronger result.
For this, we use the problem of deciding whether a QBF formula is valid, for QBFs restricted to be of the form $\Phi = \forall x_1 \exists x_2 \ldots \forall x_{2n-1} \exists x_{2n} \varphi$, with φ a 3-CNF formula and $\mathrm{V}(\varphi) \subseteq X_{2n} = \{x_1, \ldots, x_{2n}\}$; clearly, deciding validity is as hard for such formulas (hereafter called "normalized QBFs") as for unrestricted QBFs, and hence it is **PSPACE**-complete.
For all $n \in \mathbb{N}$, we define the **DL-PPA** action description $\langle \delta_{2n}, X_{2n} \cup Q_{2n} \cup \{r\} \rangle$, where Q_{2n} is as in Notation 22, r is a fresh variable (standing for "result"), and δ_{2n} is defined to be

$$\begin{aligned} r \quad \leftarrow \quad & \big([+x_1 \cup -x_1]\langle +x_2 \cup -x_2\rangle \\ & \ldots \\ & [+x_{2n-1} \cup -x_{2n-1}]\langle +x_{2n} \cup -x_{2n}\rangle \psi_{2n}\big) \end{aligned}$$

with $\psi_{2n} = \bigwedge_{q_i \in Q_{2n}} \big(q_i \rightarrow (\bigvee_{x \in \gamma_i} x \vee \bigvee_{\neg x \in \gamma_i} \neg x)\big)$ (rewritten without $\wedge$ nor $\rightarrow$ in polynomial time). Observe that the size of δ_{2n} is polynomial in n.

Lemma 31. *Let Φ be a normalized QBF over the set of variables $X_{2n} = \{x_1, \ldots, x_{2n}\}$. Then Φ is valid if and only if $s(\varphi) \cup \{r\}$ is a δ_{2n}-successor of $s(\varphi)$.*

Using δ_{2n}, the proof of the following result is parallel to that of Proposition 30.

Proposition 32. *There is no polynomial-size translation from* **DL-PPA** *into* **NPDDL**$_{\text{seq}}$ *unless* **PSPACE** $\subseteq$ **NP/poly** *holds.*

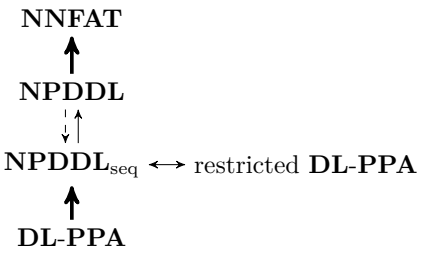


Figure 1: Succinctness relations between the languages. A thick arrow from L to L' means $L \prec L'$, a thin line means $L \preceq L'$, and a dashed arrow means that it is still unknown whether $L \preceq L'$.

Proof. Analogously to the proof of Proposition 30, assume that for all n, δ'_{2n} is an **NPDDL**$_{\text{seq}}$ description equivalent to δ_{2n} and of size polynomial in that of δ_{2n}, hence in n. Then the following is a nonuniform nondeterministic polynomial-time algorithm for the **PSPACE**-complete problem of deciding the validity of a normalized QBF $2n$ variables, with matrix φ:

1. encode φ into $s(\varphi)$,
2. decide whether $s(\varphi) \cup \{r\}$ is a δ'_{2n}-successor of $s(\varphi)$,
3. claim that Φ is valid if the answer is positive, otherwise claim that Φ is not valid.

□

7 Conclusion

We have studied the complexity of deciding whether a state is a successor of another one through a given action, and the relative succinctness of three specification languages for planning tasks and actions. We have shown that deciding successorship is polynomial-time solvable for **NNFAT**, **NP**-complete for **NPDDL**, **NPDDL**$_{\text{seq}}$, and restricted **DL-PPA**, and **PSPACE**-complete for **DL-PPA**. These results agree with the intuition that the more succinct languages have harder queries; the relationships which we have shown are represented on Figure 1.
An examination of the proof of Proposition 32 reveals that the reasons for **DL-PPA** being strictly more succinct than **NPDDL**$_{\text{seq}}$ are the modal operators. Our mid-term goal is to investigate complexity of queries and succinctness in a more systematic way, for languages constructed using combinations of features like the sequence operator, modalities, Kleene star, parallel execution, etc. For example, we want to find out whether **DL-PPA** without the Kleene star is strictly less succinct than **DL-PPA** (because until now the only elimination of $*$ that we know requires exponential space). Another interesting question is whether

$\mathbf{NPDDL}_{\text{seq}}$ is strictly more succinct than **NPDDL**, because IS-SUCC is **NP**-complete for both of them.

Acknowledgements

This work has been supported by the French National Research Agency (ANR) through project PING/ACK (ANR-18-CE40-0011).

References

[1] Alexandre Albore, Héctor Palacios, and Hector Geffner. Compiling uncertainty away in non-deterministic conformant planning. In *Proc. 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2010)*, volume 215, pages 465–470, 2010.

[2] Sanjeev Arora and Boaz Barak. *Computational complexity: a modern approach*. Cambridge University Press, 2009.

[3] Christer Bäckström and Peter Jonsson. Algorithms and limits for compact plan representations. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 44:141–177, 2012.

[4] Philippe Balbiani, Andreas Herzig, François Schwarzentruber, and Nicolas Troquard. DL-PA and DCL-PC: model checking and satisfiability problem are indeed in PSPACE. *arXiv preprint arXiv:1411.7825*, 2014.

[5] Philippe Balbiani, Andreas Herzig, and Nicolas Troquard. Dynamic logic of propositional assignments: a well-behaved variant of PDL. In *Proc. 28th Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LiCS 2013)*, pages 143–152, 2013.

[6] Piergiorgio Bertoli, Alessandro Cimatti, Ugo Dal Lago, and Marco Pistore. Extending PDDL to nondeterminism, limited sensing and iterative conditional plans. In *Proc. ICAPS 2003 Workshop on PDDL*, 2003.

[7] Daniel Bryce, Subbarao Kambhampati, and David E. Smith. Planning graph heuristics for belief space search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 26:35–99, 2006.

[8] Alessandro Cimatti and Marco Roveri. Conformant planning via symbolic model checking. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 13:305–338, 2000.

[9] Adnan Darwiche and Pierre Marquis. A knowledge compilation map. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 17:229–264, 2002.

[10] Maria Fox and Derek Long. The third international planning competition: Temporal and metric planning. In *Proc. 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS 2002)*, pages 333–335, 2002.

[11] Maria Fox and Derek Long. PDDL2. 1: An extension to PDDL for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20:61–124, 2003.

[12] Hector Geffner and Blai Bonet. *A Concise Introduction to Models and Methods for Automated Planning*. Morgan & Claypool Publishers, 2013.

[13] Tomas Geffner and Hector Geffner. Compact policies for fully observable non-deterministic planning as SAT. In *Proc. 28th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018)*, pages 88–96, 2018.

[14] Andreas Herzig, Frédéric Maris, and Julien Vianey. Dynamic logic of parallel propositional assignments and its applications to planning. In *Proc. 28th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2019)*, pages 5576–5582, 2019.

[15] Drew McDermott. PDDL–the planning domain definition language. Technical Report CVC TR-98-003/DCS TR-1165, Yale Center for Computational Vision and Control, 1998. Available at: `www.cs.yale.edu/homes/dvm` (consulted on 2020/03/16).

[16] Christian J. Muise, Sheila A. McIlraith, and Vaishak Belle. Non-deterministic planning with conditional effects. In *Proc. 24th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2014)*, pages 370—374, 2014.

[17] Bernhard Nebel. On the compilability and expressive power of propositional planning formalisms. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 12:271–315, 2000.

[18] Raymond Reiter. The frame problem in the situation calculus: A simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression. In Vladimir Lifschitz, editor, *Artificial intelligence and mathematical theory of computation: papers in honor of John McCarthy*, pages 359–380. Academic Press Professional, 1991.

[19] Jussi Rintanen. Complexity of planning with partial observability. In *Proc. 14th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2004)*, pages 345–354, 2004.

[20] Son Thanh To, Tran Cao Son, and Enrico Pontelli. A generic approach to planning in the presence of incomplete information: Theory and implementation. *Artificial Intelligence*, 227:1–51, 2015.

[21] Chee K Yap. Some consequences of non-uniform conditions on uniform classes. *Theoretical computer science*, 26(3):287–300, 1983.

©AfIA 2020

Activité AFIA

1er août 2018 – 31 juillet 2020

Éditeurs : Conseil d'Administration de l'AFIA – Année 2020

Table des matières

Flyer AFIA2020.
À propos de l'AFIA v

Conseil d'Administration de l'AFIA.
CA AFIA vii

Collèges AFIA.
Collèges Industriel, R&R, SIC, SMAA, TLH, Compétitions ix

Prix de Thèse IA.
2019 et 2020 xxi

Bulletins Trimestriels.
Résumé des numéros 102 à 109 xxiii

Journées propres.
PDIA 2018, EFIA 2019, FIIA 2019, PDIA 2019, Hommage à Jacques Pitrat xxv

Compétitions.
Nuits de l'Info 2018 & 2019 xxxi

Journées communes.
Période : de août 2018 à juillet 2020 xxxiii

Plates-formes IA.
Affiches PFIA 2019 & 2020 xliii

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

À propos de l'AFIA

L'objet de l'AFIA, Association Loi 1901 sans but lucratif, est de promouvoir et de favoriser le développement de l'Intelligence Artificielle (IA) sous ses différentes formes, de regrouper et de faire croître la communauté française en IA, et, à la hauteur des forces de ses membres, d'en assurer la visibilité.

L'AFIA anime la communauté par l'organisation annuelle de grands rendez-vous. Se tient ainsi chaque été une semaine de l'IA, la « Plate-forme IA » (PFIA 2018 Nancy, PFIA 2019 Toulouse, PFIA 2020 Angers) au sein de laquelle se tiennent les « Conférence Nationale d'Intelligence Artificielle » (CNIA), « Rencontres des Jeunes Chercheurs en IA » (RJCIA) et « Conférence sur les Applications Pratiques de l'IA » (APIA) ainsi que des conférences thématiques invitées qui évoluent d'une année à l'autre, sans récurrence obligée.

Ainsi, PFIA 2020 héberge du 29 juin au 3 juillet 2020 à Angers, outre les 23e CNIA, 18e RJCIA et 6e APIA, les 31es IC, 14e JIAF, les 15es JFPDA, et les 28es JFSMA, trois journées thématiques (Agronomie & IA, IoT & IA, Santé & IA) et une série de six tutoriels. A noter que PFIA 2020, virtualisée, est accessible gratuitement !!!

Forte du soutien de ses 414 adhérents à jour de leur cotisation en 2020, l'AFIA assure :

- Le maintien d'un Site web dédié à l'IA, reproduisant également les Brèves de l'IA,
- Une journée Recherche sur les « Perspectives et Défis en IA » (PDIA 2019),
- Une journée Enseignement intitulée « Enseignement et Formation en IA » (EFIA 2020),
- Une journée Industrielle connue sous le nom « Forum Industriel en IA » (FIIA 2020),
- La remise annuelle d'un Prix de Thèse de Doctorat en IA,
- Le soutien à plusieurs Collèges, actuellement au nombre de 7, ayant leur propre activité :
    - Collège Industriel (depuis janvier 2016),
    - Collège Compétitions (depuis octobre 2018),
    - Collège Apprentissage Artificiel (depuis janvier 2020),
    - Collège Représentation et Raisonnement (depuis avril 2017),
    - Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (depuis avril 2016),
    - Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes (depuis octobre 2016),
    - Collège Technologies du Langage Humain (depuis juillet 2019),
- La parution trimestrielle des Bulletins de l'AFIA, en accès libre à tous depuis le Site web,
- Un lien entre membres et sympathisants sur les réseaux sociaux LinkedIn, Facebook et Twitter,
- Le Parrainage scientifique, mais aussi éventuellement financier, d'événements en IA,
- La diffusion mensuelle de Brèves sur les actualités de l'IA en France,
- La réponse aux consultations officielles ou officieuses (Ministères, Missions, Organismes),
- La réponse aux questions de la presse, écrite ou orale, également sur internet,
- La divulgation d'offres de Collaborations, de Formations, d'Emploi, de Thèses et de Stages.

L'AFIA organise aussi mensuellement des Journées Communes avec d'autres Associations. Ont ainsi eu lieu ou sont prévues d'ores et déjà prévues en 2020 : PS & IA avec la SPS, et RO & IA avec la ROADEF.

Enfin, l'AFIA encourage la participation de ses membres aux grands événements de l'IA, dont PFIA. Les membres de l'AFIA, pour leur inscription à PFIA bénéficient-ils d'une réduction équivalente à deux fois le coût de leur adhésion, leur ayant permis d'assister à PFIA 2019 sur 5 jours pour seulement 95 € HT !

Rejoignez-nous vous aussi et adhérez à l'AFIA pour contribuer au développement de l'IA en France. L'adhésion peut être individuelle ou, à partir de cinq adhérents, être réalisée au titre de personne morale. Parmi les personnes morales, certaines peuvent vouloir rejoindre notre Collège Industriel, au plus près de l'IA !

Merci également de susciter de telles adhésions en diffusant ce document autour de vous !

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Conseil d'Administration 2019

Président	Yves DEMAZEAU	GT Bureau, GT Communication, GT Plateforme
V.-Président	Elise BONZON	GT Collèges, Parrainages, Représentation,
Trésorier	Catherine FARON	GT Finances, GT Journées, EFIA 2019, PFIA 2019
Secrétaire	Sandra BRINGAY	Cartographie, Prix Thèse, EFIA 2019, PFIA 2019
Webmestre	Emmanuel ADAM	GT Web&Mail, Brèves, Réseaux Sociaux, Communication
Rédacteur	Dominique LONGIN	GT Bulletins, Organisation PFIA 2019, Communication
Membres	Alain BERGER	Collège Industriel, Communication, Représentation
	Gaël DIAS	Collèges, Dossier n°107
	Pierre FEILLET	FIIA 2019, Réseaux Sociaux, Dossier n°109
	Jean-Marie LAGNIEZ	Collège Industriel, PDIA 2019
	Marie LEFEVRE	Adhésions, Journées, Dossier n°108, Enseignement
	Arnaud MARTIN	Postmaster, Dossier n°103
	Frédéric MARIS	Organisation PFIA 2019, Démos et Posters PFIA 2019
	E. Mephu NGUIFO	Journées Communes, Dossier n°106
	Davy MONTICOLO	Réseaux Sociaux, Web & Mail
	Philippe MORIGNOT	Bulletins, Compétitions
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2019, Tutoriels PFIA 2019
	Laurent SIMON	Dossier n°105, PDIA 2019, Réseaux Sociaux
	Olivier SIMONIN	Dossier n°104, Compétitions
	Serena VILLATA	Adhésions, Finances, Journées, FR@International 2019

Conseil d'Administration 2020

Président	Yves DEMAZEAU	GT Bureau, GT Communication, GT Plateforme
V.-Président	Domitile LOURDEAUX	Parrainages, Collège Industriel, Représentation
Trésorier	Catherine FARON	GT Bureau, GT Enseignement, Collèges, PFIA 2020
Secrétaire	Sandra BRINGAY	GT Journées, Prix Thèse
Webmestre	Emmanuel ADAM	GT Web&Mail, Brèves, Réseaux sociaux, Bulletin
Rédacteur	Dominique LONGIN	GT Bulletins, GT Communication, PFIA 2020
Membres	Alain BERGER	Collège Industriel, Journées, Communication
	Grégory BONNET	GT Bulletins, FR@International 2020, FIIA 2020
	Elise BONZON	GT Collèges, Parrainages
	Gaël DIAS	Ecole de Printemps, Dossier n°107
	Pierre FEILLET	Collège Industriel, Réseaux Sociaux, Dossier n°109
	Thomas GUYET	Journées
	Marie LEFEVRE	Adhésions, Collèges, Dossier n°108, Journées
	Christophe LEROUX	Journées
	Frédéric MARIS	GT Plateforme
	E. Mephu NGUIFO	GT Journées, Dossier n°110
	Gauthier PICARD	GT Enseignement, EFIA 2020, Tutoriels PFIA 2020
	Valérie REINER	Collège Industriel, Représentation, Journées
	Céline ROUVEIROL	Cartographie, Collège Industriel
	Laurent SIMON	Dossier n°111, Bulletin, Réseaux Sociaux
	Olivier SIMONIN	Journées
	Charlotte TRUCHET	GT Web&Mail, Dossier n°111, Communication

Collège Industriel

Objectif du Collège

Si l'AFIA représente plutôt bien la communauté académique française, cela n'est pas le cas de la communauté des industriels acteurs ou même juste intéressés par l'Intelligence Artificielle. L'objet du Collège Industriel est de promouvoir les échanges en France, au sein de l'AFIA, dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA), entre sa composante industrielle et sa composante académique ainsi que diverses actions de promotion de l'IA.

En particulier, le Collège Industriel a pour objectifs de :

- mettre en contact les sociétés entre elles, partager les problématiques et les solutions, en garantissant la confidentialité des échanges entre les sociétés ;
- permettre des actions de lobbying au niveau français auprès des ministères, des pôles de compétitivité, de l'ANR et tout autre organisme, également au niveau Européen ;
- permettre aux sociétés de faire connaître leurs relations académiques existantes et leurs recherches de partenariat académique sur des problématiques ciblées ;
- permettre aux sociétés de faire connaître leurs besoins en recrutement et permettre à la communauté académique de valoriser leurs formations auprès des sociétés;
- de proposer au Conseil d'Administration de l'AFIA des actions, dont l'organisation du Forum Industriel de l'IA (FIIA), et celle de la conférence sur les Applications Pratiques de l'IA (APIA).
- participer aux chantiers de l'AFIA, dont un Dossier biannuel Equipes Industrielles pour les Bulletins de l'AFIA et la Cartographie annuelle Industrielles-Académiques, ou bien en lancer de nouveaux à travers des collaborations avec les Collèges Thématiques de L'AFIA
- proposer aux Collèges Thématiques de l'AFIA des actions intéressant les membres du Collège Industriel, en lien avec une problématique scientifique ciblée.
- supporter toute initiative (projets, actions, etc.) extérieure au collège mais participant à la promotion de ses priorités.

Programme de Travail

Lors de la première réunion annuelle du Collège Industriel, le programme de travail de l'année à venir est défini en tenant compte des priorités. Ce programme de travail comprend au moins la liste des actions à destination du Conseil d'Administration de l'AFIA et des autres Collèges Thématiques.

Le Collège Industriel se réunit mensuellement le reste de l'année pour :

- gérer les informations relatives aux entreprises membres du Collège Industriel;
- échanger sur un sujet particulier, et sur l'actualité en IA sur le mois écoulé ;
- soutenir les actions de promotion et de lobbying de l'AFIA ;
- coordonner les avancées sur les actions engagées par le Collège Industriel et en décider d'autres.

Comité de Pilotage

Le Collège Industriel est composé des sociétés ayant signé l' Accord Collège Industriel les liant entre elles et à l'AFIA et s'étant acquitté de leurs droits d'inscription annuels. La composition du Collège Industriel est complétée par au moins deux représentants académiques membres du Conseil d'Administration de l'AFIA.

Au 01/07/20, le Collège Industriel est composé de :

- Stephan Brunessaux et Frédéric Perlant
  AIRBUS, Elancourt

- Alain Berger
  ARDANS, Montigny-le-Bretonneux

- Mustapha Derras, Youssef Miloudi et Valérie Reiner
  BERGER-LEVRAULT, Boulogne Billancourt

- Stéphane Durand et Bruno Patin
  DASSAULT AVIATION, Saint-Cloud

- Pierre Feillet et Christian de Sainte-Marie
  IBM FRANCE, Gentilly

- Ghislain Atemezing et Christophe Prigent
  MONDECA, Paris

- Juliette Mattioli et David Sadek
  THALES, Palaiseau

- Yves Demazeau, Domitile Lourdeaux et Céline Rouveirol
  CA AFIA, Grenoble

Le Comité de Pilotage du Collège Industriel est constitué de membres du Collège Industriel et, au moins : le coordinateur du Collège Industriel, le responsable du site web de travail collaboratif, le responsable de la feuille de route, et le responsable des séminaires. Ces responsables sont désignés pour un an par les membres du Collège Industriel, lors de la première réunion annuelle du Collège Industriel.

Contacts

Coordinateur et responsable de la feuille de route : yves.demazeau@imag.fr

Responsable du site web : bruno.patin@dassault-aviation.com

Responsable des séminaires : valerie.reiner@berger-levrault.com

Six membres du Collège Industriel sont membres du Conseil d'Administration de l'AFIA :

- Alain Berger, aberger@ardans.fr

- Yves Demazeau, yves.demazeau@imag.fr

- Pierre Feillet, feillet@fr.ibm.com

- Domitile Lourdeaux, domitile.lourdeaux@hds.utc.fr

- Valérie Reiner, valerie.reiner@berger-levrault.com

- Céline Rouveirol, celine.rouveirol@lipn.univ-paris13.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Représentation et Raisonnement

Objectif du Collège

L'objectif du collège est d'animer les communautés de recherche françaises en Représentation et Raisonnement. Les thématiques de recherche sont relatives aux méthodes et outils fondamentaux de l'Intelligence Artificielle. Elles portent sur :

- la définition de modèles de représentation des informations (croyances, connaissances, préférences, obligations et permissions, actions, incertitude, confiance, réputation) comme les langages des logiques classiques ou non classiques, les modèles possibilistes, les ontologies, les langages à base de contraintes, les représentations graphiques, etc.,
- la définition et l'automatisation de raisonnements sur ces informations : raisonnement spatio-temporel, dynamique des informations, révision de croyances, fusion d'informations symboliques, raisonnement par argumentation, raisonnement causal, raisonnement abductif, raisonnement à partir de cas, etc.,
- la perspective algorithmique et de représentation pour des concepts utilisés dans des théories connexes comme la théorie des jeux ou la théorie du choix social (équilibre, stratégie gagnante, manipulation, etc.) : théorie des jeux algorithmique et choix social computationnel,
- la mise au point de méthodes de codage des informations et d'algorithmes de traitement efficaces : compilation de connaissances, SAT, ASP, etc.,
- la modélisation formelle de l'interaction : entre utilisateurs et systèmes informatiques, entre entités informatiques autonomes (agents),
- et généralement le lien avec différentes techniques liées à la décision, la planification, l'ordonnancement, le diagnostic, l'apprentissage, les sciences des données, etc.

Ces thématiques couvrent de très nombreux contextes d'application, comme par exemple le Web sémantique, le Web des données, les systèmes de recommandation ou d'aide à la décision, les agents conversationnels et assistants personnels, la programmation des jeux, la robotique, etc.

Activités d'animation générales

Le collège R&R est impliqué dans les activités suivantes :

- IAF : Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentales. Ces journées ont lieu tous les ans, à l'initiative du comité IAF. Elles sont articulées autour de 3 ou 4 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.
- JFPDA : Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage pour la conduite de systèmes. Ces journées ont lieu tous les ans, à l'initiative des anciens présidents de comités de programme JFPDA et des participants à la liste de diffusion jfpda@loria.fr. Elles sont articulées autour de 2 ou 3 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.
- JFPC : Journées Francophones de Programmation par Contraintes. Ces journées ont lieu tous les ans à l'initiative de l'AFPC (Association Française pour la Programmation par Contraintes). Elles sont

articulées autour de 2 ou 3 exposés de synthèse invités, ainsi que d'un programme constitué après appel à communication.

- des ateliers thématiques, qui ont lieu lors d'autres évènements et la contribution à l'organisation de journées communes.

Le Collège consacre une partie de son budget de fonctionnement à l'attribution de bourses permettant à des étudiants d'assister à l'un des évènements organisés par le Collège, ou d'autres manifestations pertinentes au regard des thématiques scientifiques.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du Collège est constitué en 2019 des personnes suivantes :

- Elise Bonzon, vice-présidente de l'AFIA
  Université Paris-Descartes, LIPADE, Paris
- Sylvie Doutre, co-présidente du comité de programme IAF
  Université Toulouse 1, IRIT, Toulouse
- Sébastien Konieczny, directeur du GDR IA
  CNRS, CRIL, Lens
- Tiago de Lima, co-président du comité de programme IAF
  Université d'Artois, CRIL, Lens
- Fréderic Maris, membre du CA et représentant pour l'AFIA
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse
- Nicolas Maudet
  Université Pierre et Marie Curie, LIP6, Paris
- François Schwarzentruber
  ENS Rennes, IRISA, Rennes
- Laurent Simon, vice-président de l'AFPC
  Université de Bordeaux, LaBRI, Bordeaux
- Elise Vareilles, membre du CA de l'AFPC
  IMT Mines, Albi
- Bruno Zanuttini, co-président du comité de programme JFPDA
  Université Caen Normandie, GREYC, Caen

La composition du comité est amenée à être modifiée bi-annuellement.

Contacts

Coordinateur du Collège R&R : frederic.maris@irit.fr

Listes de diffusion du Collège R&R : bull-i3@irit.fr, bull-ia@gdria.fr, jfpda@loria.fr

Trois membres du comité de pilotage du collège sont membres du Conseil d'Administration de l'AFIA :

- Elise Bonzon, elise.bonzon@mi.parisdescartes.fr
- Fréderic Maris frederic.maris@irit.fr
- Laurent Simon lsimon@labri.fr

Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances

Objectif du Collège

À l'heure numérique, les données et les outils se multiplient mais assurer un accès intelligent aux données reste un défi et ce malgré les langages et les technologies qui sont maintenant à disposition des informaticiens et des experts de domaine. Partager des données et des connaissances au sein d'une communauté, d'une entreprise ou sur le web suppose leur explicitation, leur représentation, leur mise en relation, leur diffusion et leur maintenance. L'ingénierie des connaissances est au cœur de ces problématiques.

L'essor des sciences et technologies de l'information et de la communication, et notamment des technologies du web, dans l'ensemble de la société engendre des mutations dans les pratiques individuelles et collectives. L'ingénierie des connaissances accompagne cette évolution, en inventant les modèles, les méthodes, les algorithmes et les outils permettant l'intégration de connaissances et de raisonnements automatiques sur ces connaissances dans des environnements informatiques.

De fait, on constate aujourd'hui une omniprésence des connaissances, en même temps qu'un décloisonnement des communautés de recherche en Intelligence Artificielle pour répondre aux problèmes qui se posent. Ainsi, la construction des systèmes à base de connaissances fait appel à l'ingénierie des connaissances, au traitement automatique des langues, à l'apprentissage automatique, à la fouille de données et à l'interaction homme-machine.

La représentation, l'intégration, l'interrogation, la découverte de connaissances ou le contrôle de la qualité de données et de connaissances issues de données textuelles, semi-structurées, graphes, ou multimédia, potentiellement multi-sources et évolutives, associent ingénierie des connaissances avec recherche d'information, recherche opérationnelle, raisonnement, et analyse de données ; en particulier, la définition de principes évolutifs de représentation des connaissances et de raisonnement dans le cadre unifié des graphes de connaissances devient une thématique émergente traitant par exemple du rôle des ontologies et de l'intégration de données dans ces graphes ; la modélisation des environnements informatiques, de ses acteurs humains ou logiciels, allie ingénierie des connaissances et systèmes multi-agents ; enfin l'ingénierie des connaissances touche à des thématiques classiques dans les communautés de l'interaction homme-machine et des environnements informatiques pour l'apprentissage humain.

En plaçant ainsi l'utilisateur au cœur des systèmes informatiques, l'ingénierie des connaissances est sollicitée pour assister l'utilisateur dans le traitement de la masse de données disponibles, pour les visualiser, contextualiser, classer, prédire, approximer, sécuriser, fiabiliser, recommander, expliquer, valider, pallier leur imprécision voire incohérence.

Programme de Travail

Le collège Ingénierie des Connaissances a premièrement un rôle de diffusion de l'information. Il gère une liste de diffusion (comptant plus de 800 inscrits) sur l'ingénierie des connaissances et maintient une page web du collège IC sur le site Web de l'AFIA. Il contribue également à l'animation et au dynamisme de la communauté de recherche en Ingénierie des Connaissances. Il est moteur dans l'organisation de la conférence nationale d'Ingénierie des Connaissances (IC) et des Rencontres du Web des Données. Il soutient l'organisation de la conférence internationale Terminology & Ontology: Theories and applications (Toth 2020), l'organisation d'une session spéciale Ethics in AI, Cyber-Physical and IoT Systems dans le cadre de SMC 2020 et l'organisation du workshop international Toth : «Terminology, interoperability and Data integration: Issues and Challenges ».

Ses membres contribuent également à la mise en place de certaines « Journées Communes » de l'AFIA avec d'autres sociétés savantes, notamment la journée « Informatique Médicale et Intelligence Artificielle » (IM&IA), à l'organisation d'ateliers sur la Plate-Forme Intelligence Artificielle (PFIA) ou à l'occasion d'autres événements tels que RISE. Enfin, ils participent activement à des événements internationaux tels que EKAW, K-CAP ou encore ISWC.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège est constitué de 10 chercheurs spécialisés dans le domaine de l'Ingénierie des Connaissances, tous membres des comités de programme de la conférence nationale d'ingénierie des Connaissances (IC) et/ou de la conférence Journées Francophones des Ontologies (JFO), et la plupart des présidents d'éditions passées de la conférence nationale d'Ingénierie des Connaissances :

- Marie-Hélène Abel
  Université de Technologie de Compiègne, HEUDIASYC

- Djamal Benslimane
  Université Claude Bernard Lyon 1, LIRIS

- Sandra Bringay
  Université Paul Valéry Montpellier 3, LIRMM

- Jean Charlet
  Assistance Publique-Hôpitaux de Paris & INSERM, LIMICS

- Sylvie Després
  Université Paris 13, LIMICS

- Catherine Faron
  Université Nice Sophia Antipolis, I3S et Inria

- Nathalie Hernandez
  Université Jean Jaurès Toulouse 2, IRIT

- Nathalie Pernelle
  Université Paris 13, LIPN

- Raphaël Troncy
  EURECOM, Sophia Antipolis

- Haifa Zargayouna
  Université Paris 13, LIPN

Contacts

Coordinateur du Collège : sylvie.despres@univ-paris13.fr

Listes de diffusion : info-ic@inria.fr

N membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Sandra Bringay, andra.bringay@lirmm.fr

- Catherine Faron, faron@unice.fr

Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes

Objectif du Collège

Le collège SMAA a pour mission de contribuer aux activités menées par l'AFIA, par des actions relatives au domaine de l'IA, émanant de la communauté des Agents Autonomes et des Systèmes Multi-Agents (SMAA). Les thématiques de recherche couvertes par ce collège sont celles relevant des Journées Francophones en Systèmes Multi-Agents (JFSMA) et du Workshop Affects, Compagnon Artificiel, Interactions (WACAI). Elles portent sur la modélisation à base d'agents logiciels mis en interaction au sein d'environnements partagés pour :

- La résolution collective de problème (modèles de coordination ; apprentissage, adaptation et planification distribuées ; décisions sous incertitudes, etc.),
- La simulation de phénomènes complexes où la modélisation multi-agents apporte un cadre conceptuel permettant la représentation et la simulation de systèmes faisant intervenir différentes entités en interaction
- Le développement de systèmes informatiques décentralisés où l'approche SMA permet l'intégration flexible et la coopération de logiciels et de services autonome
- Le développement de systèmes médiatisés dans lesquels utilisateurs humains et agents artificiels interagissent directement ou indirectement, dans le cadre d'activités collectives de type éducatif, culturel ou social
- L'étude, la modélisation, le développement et l'évaluation de l'interaction de systèmes interactifs avec leurs partenaires (humains ou artefacts).

Les recherches menées sur ces thèmes adoptent fréquemment une démarche pluridisciplinaire (biologie, linguistique, psychologie, sociologie…) dans la modélisation de sociétés d'agents artificiels ou pour la prise en compte de l'activité et des interactions avec des utilisateurs humains au sein de communautés mixtes.

Programme de Travail

Les missions du collège SMAA concernent le soutien à l'organisation de manifestations scientifiques (conférences, ateliers), l'animation de groupes de travail, l'édition de dossiers techniques ou de numéros spéciaux de journaux sur des thématiques d'intérêt pour la communauté et la diffusion et la communication autour des recherches des communautés françaises sur les disciplines ciblées.

Le collège SMAA accompagne notamment l'organisation régulière des JFSMA et de WACAI en sollicitant un parrainage de l'AFIA sous la forme de remise de prix, réduction des tarifs d'inscription, annonces d'événements sur ses relais de communication… Il propose également un soutien similaire à d'autres événements, ponctuels ou récurrents, relevant de son périmètre scientifique.

Il contribue aux actions initiées par l'AFIA sur la mise en place de journées bilatérales, notamment les journées communes « Réalité Virtuelle & Intelligence Artificielle » (RV & IA), « Interaction Homme-Machine & Intelligence Artificielle » (IHM & IA) ainsi que « Modélisation, Analyse et Conduite des

Systèmes dynamiques & Intelligence Artificielle » (MACS & IA) ; par une participation aux actions du collège industriel de l'AFIA ; par des contributions à la rubrique « Collèges » du bulletin de l'AFIA. Un partenariat avec le collège industriel de l'AFIA, notamment dans l'organisation de FIIA 2019, permettra d'afficher les réalisations industrielles de nos domaines scientifiques.

Les actualités du collège SMAA et plus largement des communautés françaises de recherche associées aux conférences JFSMA et WACAI sont publiées régulièrement sur son site web : http://smaa.lip6.fr/.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège SMAA est constitué de chercheurs spécialisés dans le domaine des systèmes multi-agents et des agents autonomes, tous membres des comités de programme ou du comité consultatif des journées francophones en systèmes multi-agents (JFSMA) et/ou du workshop Affect, Compagnon Artificiel, Interaction (WACAI).

- Emmanuel Adam
  Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, LAMIH, Valenciennes
- Rémy Courdier
  Université de la Réunion, LIM, Saint Denis.
- Catherine Garbay
  CNRS, LIG, Grenoble
- Fabien Michel
  Université de Montpellier, LIRMM, Montpellier
- Frédéric Migeon
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse
- Maxime Morge
  Université de Lille 1, CRIStAL, Lille
- Gauthier Picard
  Mines Saint-Etienne, LHC, Saint-Etienne
- Nicolas Sabouret
  Université Paris-Sud, LIMSI, Saclay
- Laurent Vercouter
  INSA Rouen Normandie, LITIS, Rouen
- Mahdi Zargayouna
  IFSTTAR, Paris

Contacts

Coordinateur du Collège : laurent.vercouter@insa-rouen.fr

Listes de diffusion : sma@loria.fr, acai@poleia.lip6.fr

Deux membres du comité de pilotage du collège sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Emmanuel Adam, emmanuel.adam@uphf.fr
- Gauthier Picard, gauthier.picard@emse.fr

Le Collège Technologies du Langage Humain

Objectif du Collège

Les Technologies du Langage Humain (TLH) proposent des méthodes permettant une communication homme-machine naturelle, pouvant s'étendre à une interaction homme-homme médiée. Ainsi, les TLH permettent d'analyser, d'interpréter et de produire des actes du langage écrit, parlé ou signé, mais aussi d'interagir avec des données langagières. Ainsi, les TLH englobent traditionnellement le Traitement Automatique des Langues (TAL), la Communication Parlée (CP) et leurs applications les plus emblématiques comme la Recherche d'Information (RI) et la Traduction Automatique.

Les TLH occupent une part entière en IA sous le prisme du Test de Turing. Ainsi, elles regroupent tous les axes de recherche de l'IA dans le cadre des données langagières comme la représentation (e.g. plongements lexicaux, analyse syntaxique), le raisonnement (e.g. systèmes de question-réponse), la planification (e.g. argumentation), l'apprentissage (e.g. analyse de sentiments), ou même l'intelligence collective (e.g. détection de communautés). Créer des modèles pouvant interagir de manière élégante et naturelle en utilisant la langue nécessite une compréhension profonde de l'acoustique, de la phonétique et de la prosodie pour le langage oral d'une part (dans le cadre de la reconnaissance et de la synthèse de la parole), et d'autre part, de la morphologie, de la syntaxe, de la sémantique et de la pragmatique pour le langage écrit ou signé (dans le cadre de l'analyse et de la génération de textes). Seulement à cette condition les applications des TLH peuvent offrir la promesse d'un accès « universel » à l'information, notamment à travers les moteurs de recherche, la traduction automatique, le résumé de textes, la veille automatique ou les systèmes de question-réponse. La compréhension globale du langage permet également de caractériser les textes suivant leurs objectifs communicationnels. Ainsi, l'analyse des sentiments et des émotions, l'identification de discours haineux, la détection de plagiats, l'identification et la vérification du locuteur proposent autant de cadres applicatifs importants pour les sociétés numériques.

Parallèlement au développement de modèles des TLH, de nombreux défis connexes doivent être pris en compte dans le cadre d'une démarche globale, comme la confiance (e.g. reproductibilité, explicabilité, confidentialité), l'éthique (e.g. biais d'apprentissage, représentativité) et l'évaluation (e.g. métriques dédiées) des systèmes proposés.

Puisqu'à l'ère du numérique les données langagières prolifèrent dans des quantités toujours plus importantes et accessibles (*big data*), les champs d'applications des TLH sont nombreux. Ainsi, les archives numériques, les réseaux sociaux, les plateformes collaboratives, les entretiens clients, les textos, les courriels, les commentaires sur des plateformes de vente en ligne sont autant de matières premières pour le développement d'applications des TLH. En particulier, quelques domaines privilégiés sont la santé, l'éducation, le droit, le journalisme et le handicap, mais d'autres émergent comme la finance, l'agriculture, la sécurité, le marketing et les humanités numériques.

Le collège TLH de l'AFIA a donc pour mission de promouvoir l'animation et l'interaction scientifiques entre les communautés TAL, CP et RI, et l'ensemble des communautés en IA ayant des intérêts communs dans le but de consolider les collaborations transversales.

Programme de Travail

Afin de mener à bien sa mission, le collège TLH s'engage à soutenir l'organisation de manifestations scientifiques (conférences, ateliers), animer des groupes de travail, éditer des dossiers techniques, organiser

des journées thématiques et diffuser et communiquer autour des recherches des communautés françaises du TAL, de la CP, de la RI et de l'IA.

Le collège TLH s'engage également à servir de canal de communication entre l'AFIA et ses collèges ainsi qu'avec l'AFCP (Association Francophone de la Communication Parlée), l'ARIA (Association Francophone de Recherche d'Information et Applications), et avec l'ATALA (Association pour le Traitement Automatique des Langues.

Comité de Pilotage

Le comité de pilotage du collège est constitué de 10 chercheuses et chercheurs spécialisés dans le domaine du TAL, de la CP et de la RI.

- Florian Boudin
  Université de Nantes, LS2N, Nantes
- Davide Buscaldi
  Université Paris 13, LIPN, Villetaneuse
- Gaël Dias
  Université de Caen Normandie, GREYC, Caen
- Corinne Fredouille
  Université d'Avignon, LIA, Avignon
- José Moreno
  Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse
- Aurélie Névéol
  CNRS, LIMSI, Saclay
- Yannick Parmentier
  Université de Lorraine, LORIA, Nancy
- François Portet
  Grenoble INP, LIG, Grenoble
- Mathieu Roche
  CIRAD, TETIS, Montpellier
- Serena Villata
  CNRS, I3S, Sophia Antipolis

Contacts

Coordinateur du collège : mathieu.roche@cirad.fr

Listes de diffusion : ln@cines.fr, parole@listes.afcp-parole.org, info-aria@lsis.org

Deux membres du comité de pilotage sont membres du conseil d'administration de l'AFIA :

- Gaël Dias gael.dias@afia.asso.fr
- Serena Villata villata@i3s.unice.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Collège Compétitions

Objectif du collège

Le collège Compétitions est impliqué dans l'ensemble des compétitions auxquelles l'AFIA est amené participer. Les activités de ce Collège prolongent les compétitions antérieures organisées par l'AFIA : « IA sur Robot » lors de RFIA'16 à Clermont-Ferrand, et la « BotContest » lors de PFIA'17 à Caen.

Activités du collège

A ce jour, les compétitions identifiées par le Collège sont les suivantes :

- **Nuit de l'Info**. Cette compétition a lieu tous les ans en décembre. Les participants programment en une nuit sur un défi national tout en relevant divers défis, ils remettent leur programme et un document le lendemain matin à 8h. Ces résultats sont évalués par un jury national et les jurys des défis. Cette compétition a lieu tous les ans en décembre. L'AFIA propose le défi d'intégrer l'IA dans l'application développée, le jury se compose de membres du collège et d'autres membres de l'AFIA.

- **IA sur Robots**. Le but de cette compétition est de mettre en évidence l'IA au sein d'une ou plusieurs plateformes robotiques, dans un scénario figé avec des règles, et une mesure des performances. Cette compétition aura lieu en 2019 à Toulouse lors de PFIA. Elle est ouverte à tous : chercheurs, ingénieurs, étudiants et grand public. Cette nouvelle édition s'intitule "DriveToGaether" et dispose d'un scénario et d'un règlement.

- **IA et Jeux Vidéos**. Le but de cette compétition est de faire expérimenter aux conférenciers la créativité, l'originalité, la performance stratégique et/ou l'adaptativité d'un logiciel d'IA sur écran développé par les participants. Cette compétition aura lieu en 2020 lors de PFIA. La thématique de la compétition n'est cependant pas figée, et pourra être redéfinie en fonction de l'évolution du Comité de Pilotage et de l'identité du Comité d'Organisation de PFIA 2020.

Comité de Pilotage

- Carole Adam
  Université Grenoble Alpes, LIG

- Florence Bannay
  Université Paul Sabatier, IRIT

- Dominique Busso
  Atlangames

- Anne-Gwenn Bosser
  Ecole Nationale des Ingénieurs de Brest, Lab-STICC

- Cindy Even
  Virtualys

- Christophe Leroux (LRI, CEA LIST, Saclay)
  Commissariat à l'Energie Atomique, LIST

- Philippe Morignot
  Aspertise

- Nicolas Pépin-Hermann
  BA Systèmes

- Syvie Saget
  CLASP/FLOV

- Olivier Simonin
  INSA Lyon, CITI

La composition de ce comité sera modifiée annuellement.

Contacts

Coordinatrice du Collège Compétitions : Philippe Morignot, pmorignot@yahoo.fr

Site web : http://afia-competitions.fr

Adresse électronique du collège : contact@afia-competitions.fr

Quatre membres du comité de pilotage sont membres du CA de l'AFIA :

- Florence Bannay, bannay@irit.fr

- Frédéric Maris, maris@irit.fr

- Philippe Morignot, pmorignot@yahoo.fr

- Olivier Simonin, olivier.simonin@insa-lyon.fr

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Prix de Thèse IA 2019

Le Jury

- Président : Thomas Schiex (MIAT, INRA)
- Membres : Leila Amgoud, Salem Benferhat, Christian Bessière, Antoine Bordes, Nicolas Dobigeon, Hélène Fargier, Fabien Gandon, Yves Grandvalet, Andreas Herzig, Jérôme Lang, Pierre Marquis, Marie-Christine Rousset, Michèle Sebag.

Les Lauréats

- 1er Prix (ex-aequo) : Anaëlle Wilczynski "Interaction entre agents modélisée par un réseau social en choix computationnel". 13/12/18. Dir. : Laurent Gourves (LAMSADE, Univ. Paris Dauphine).
- 1er Prix (ex-aequo) : Valentina Zantedeschi "Une vue unifiée de l'apprentissage local : théories et algorithmes pour l'amélioration de modèles linéaires". 18/12/18. Dir. : Marc Sebban (LHC, Univ. Jean Monnet).
- Accessit : Joe Raad "Gestion d'identité dans des graphes de connaissances". 30/11/18. Dir. : Juliette Dibie (AgroParisTech, Paris) et Nathalie Pernelle (LRI, Univ. Paris-Sud).

Prix de Thèse IA 2020

Le Jury

- Président : Philippe Mathieu (Université de Lille)
- Membres : Salem Benferhat, Isabelle Bloch, Pierre Boulet, Jean-Gabriel Ganascia, Salima Hassas, Andreas Herzig, Jérôme Lang, Pierre Marquis, Marie-Christine Rousset, Thomas Schiex, Michèle Sebag.

Les Lauréats

- 1er Prix: Ghouthi Boukli Hacene "Processing and Learning Deep Neural Networks on Chip". 03/10/19. Dir. : Michel Jezequel (MILA, IMT Atlantique, Brest).
- Accessit (ex-aequo): Soumia Dermouche "Leveraging the Dynamics of Non-Verbal Behaviors: Modeling Social Attitude and Engagement in Human-Agent Interaction". 27/06/19. Dir. : Catherine Pelachaud (ISIR, Sorbonne Université, Paris).
- Accessit (ex-aequo): Éloi Zablocki "Multimodal Machine Learning: Complementarity of Textual and Visual Contexts". 14/10/19. Dir: Patrick Gallinari, Benjamin Piwowarski, and Laure Soulier (LIP6, Sorbonne Université, Paris).

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Bulletins

Le bulletin de l'AFIA fournit un cadre de discussions et d'échanges au sein de la communauté. Toutes les contributions, pour peu qu'elles aient un intérêt général, sont les bienvenues. Le bulletin contient des rubriques régulières de comptes rendus des conférences, journées et autres événements que l'AFIA organise ou parraine, les résumés d'HDR et de Thèses de Doctorat, et un Dossier qui dresse un état de l'art sur un domaine particulier de l'IA, ou présente des équipes françaises de recherche en IA, académiques ou industrielles, ou PFIA. Les bulletins de l'AFIA sont accessibles librement depuis le site de l'AFIA.

Le Comité de Rédaction

Le comité de rédaction 2019 comprenait Dominique Longin comme rédacteur en chef, aidé de Emmanuel Adam, Claire Lefèvre, et Philippe Morignot. En 2020, les fonctions de ce dernier ayant pris fin, le comité de rédaction a été étendu à 5 membres avec l'arrivée de Grégory Bonnet et Laurent Simon.

Bulletin 102 **Dossier « PFIA 2018 »** **septembre 2018**

- Le dossier de ce bulletin est consacré à la PFIA 2018 qui s'est déroulée du 2 au 6 juillet 2018 à Nancy, et qui hébergeait cette année : APIA, CNIA, IC, JFPDA et RJCIA ; les journées : éthique et IA, France@IJCAI2018, IA pour l'éducation, IA et Santé, Robotique et IA, Traitement des langues et IA. Les participants ont également pu assister à des démonstrations pendant deux jours entiers.
- Ce bulletin contient également le compte rendu de la journée Statistiques et IA qui s'est tenue le 25 septembre 2018 à Paris, ainsi que l'ensemble des soutenances de thèses et HDR dont nous avons eu connaissance et soutenues lors du troisième trimestre 2018.

Bulletin 103 **Dossier « I.A. et Réseaux Sociaux »** **janvier 2019**

- Ce bulletin contient un dossier thématique sur « Intelligence artificielle et réseau sociaux » sous la direction de Arnaud Martin, regroupant pas moins de huit contributions sur ce thème.
- Il contient également les comptes rendus des 26e JFSMA (Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents) qui se sont déroulées du 10 au 12 octobre 2018 à Métabief (Doubs), de la 5e journée PDIA (Perspectives et Défis en IA) qui s'est déroulée le 11 octobre à Paris, et de la Nuit de l'info qui s'est tenue la nuit du 6 au 7 décembre 2018 sous la direction de Florence Bannay. Il contient également l'ensemble des soutenances de thèses et HDR dont nous avons eu connaissance et soutenues lors du dernier trimestre 2018.

Bulletin 104 **Dossier « I.A. et Robotique Mobile »** **avril 2019**

- Le dossier de bulletin, dirigé par Olivier Simonin, porte sur le thème « IA & Robotique mobile » et ne contient pas moins de 19 contributions permettant d'avoir une vision très précise des travaux actuellement menés en France dans ce domaine.
- Ce bulletin contient également le compte rendu de la 1re journée EFIA (Enseignement et Formation en IA) qui s'est déroulée le 10 janvier 2019 à Nanterre, et celui de la 4e journée IHM-IA organisée à Telecom ParisTech le 14 mars 2019. Ce bulletin contient également l'ensemble des soutenances de thèses et HDR dont nous avons eu connaissance et soutenues lors du premier trimestre 2019.

Bulletin 105 Dossier « Equipes Académiques en I.A. » juillet 2019

- Le dossier de ce bulletin, dirigé par Laurent Simon, présente des équipes de recherche académiques en IA. Il est actuellement en cours de finalisation et devrait paraître sous peu.
- Ce bulletin contient également un compte rendu : de FIIA 2019 (Forum Industriel de l'IA) qui s'est tenu le 11 avril 2019 à Champ-sur-Marne ; de la journée EGC&IA (Extraction et Gestion des Connaissances & IA) organisée le 10 mai 2019 à l'Université Paris-Sud ; de la conférence internationale PAAMS (*Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*) qui s'est déroulée du 26 au 28 juin 2019 à Avila (Espagne). Ce bulletin contient également l'ensemble des soutenances de thèses et HDR dont nous avons eu connaissance et soutenues lors du deuxième trimestre 2019.

Bulletin 106 Dossier « PFIA 2019 » septembre 2019

- Le dossier, dirigé par E. Mephu Nguifo, est consacré à PFIA 2019 qui s'est déroulé du 1er au 5 juillet 2019 à Toulouse et qui a hébergé pas moins de 11 événements (APIA, Cap, CNIA, IC, JFPDA, JFSMA, JIAF, RJCIA, TALN-RECITAL France@International et la compétition DriveToGaether) en plus de démonstrations et posters, de tutoriels, et de 3 prix AFIA de thèse.
- Ce bulletin comporte en outre un compte rendu sur le camp d'été « Recherche MIDI » en IA, la journée « Classification & IA », et le séminaire national sur les « Aspects sociétaux des véhicules autonomes ». Il contient également les thèses et HDR du 3e trimestre 2019.

Bulletin 107 Dossier « I.A. et Technologies du Langage Humain» janvier 2020

- Le dossier, sous la direction de Gaël Diaz, recense 20 équipes de recherche académiques ou industrielles françaises menant des travaux à l'intersection du traitement automatique des langues, de la recherche d'information, de la communication parlée et de l'intelligence artificielle.
- Ce bulletin débute par un hommage à Jacques Pitrat, l'un de nos plus anciens et fidèles adhérents, pionner de l'IA en France. Il contient également les comptes rendus de la 4e journée MACS&IA, la 3e journée RI&IA, ainsi de la Nuit de l'Info 2019, en plus des thèses et HDR du dernier trimestres 2019 dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 108 Dossier « I.A. et Education » avril 2020

- Le dossier, dirigé par Marie Lefèvre, présente 15 structures francophones de France, Belgique et Suisse (équipe de recherche académique ou industrielle, laboratoire, projet ou chaire de recherche) travaillant actuellement à l'intersection de l'IA et de l'éducation, ainsi que les projets en cours.
- Ce bulletin complété par le compte rendu de la journée Philosophie des Sciences & IA qui s'est tenue sous le thème « Prédire et expliquer les phénomènes sociaux », ainsi que les thèses et HDR soutenues pendant le 1er trimestre 2020 et dont nous avons eu connaissance.

Bulletin 109 Dossier « Equipes Industrielles en I.A. » juillet 2020

- Le dossier recense des équipes industrielles travaillant sur des thématiques de l'IA. Il est dirigé par Pierre Feillet.
- Ce bulletin inclut liste des thèses et HDR soutenue lors du 2nd trimestre 2020 et dont nous avons eu connaissance.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

PDIA 2018

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa cinquième journée PERSPECTIVES ET DEFIS DE l'IA sur le thème : VEHICULE AUTONOME ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE. On parle beaucoup de Véhicule Autonome, sans toujours faire la connexion avec l'IA. On parle encore plus d'IA, mais sans forcément penser à toutes les possibilités pour les Véhicules Autonomes. Les défis sont nombreux, parmi lesquels la sûreté et la validation des algorithmes embarqués, la perception et la localisation, l'interaction avec l'humain, la prise de décision temps réel, la navigation en trafic dense. La journée vise à en dresser un panorama, au travers d'exposés et de tables rondes.

Cette journée se tient en collaboration avec le MTES Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) et le partenariat du MINEF Direction Générale des Entreprises (DGE).

Date et Lieu

- Date : 11 octobre 2018
- Lieu : Université Paris-Descartes, Amphithéâtre Fourier, 45 rue des Saints Pères, 75006 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de F. Dardel *(Président de l'Université Paris Descartes),* Y. Demazeau *(Président de l'AFIA)* et O. Simonin (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h00 « L'IA au service du transport autonome » par P. Aknin (*IRT SystemX*)
- 09h30 « SMA pour la simulation et la modélisation du trafic » par Ph. Mathieu (*Université Lille)*
- 10h00 Pause
- 10h30 « Le défi de la validation en sécurité de l'IA pour la perception et la décision en conduite autonome de train » par Ph. David (*SNCF*)
- 11h00 « Validation et vérification du logiciel pour les systèmes autonomes » par F. Ingrand (*CNRS*)
- 11h30 Table ronde « Validation / Vérification dans les différents secteurs » avec Ph. David (*SNCF*), F. Ingrand (*LAAS*), et A. Piperno (*UTAC-CERAM*).
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Validation des systèmes de conduite autonomes » par X. Delache (*Sous-directeur des études et de la prospectives, DGITM*)
- 14h30 « Les aspects éthiques du déploiement du véhicule autonome » par E. Dogan (*VEDECOM*)
- 15h00 « IA intégrée / à intégrer au sein des systèmes robotiques militaires pour l'autonomie » par B. Steux, J.-F. Massol et B. Ricaud (*Nexter Systems*)
- 15h30 « Navigation sociale des véhicules autonomes » par Anne Spalanzani (*UGA*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Table ronde « Plates-formes d'intégration et relations avec l'humain » avec E. Dogan (*VEDECOM*), J. Lemaire (*DGA*) et O. Simonin (*INSA Lyon*)
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Olivier Simonin et Yves Demazeau pour l'Association Française d'Intelligence Artificielle (AFIA).

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres de l'AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-pdia-2018/. Le déjeuner est offert aux personnes qui se seront inscrites à PDIA 2018 avant le 08/10/18, et seulement à celles-ci.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

EFIA 2019

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa première journée Enseignement et Formation en IA. La journée a deux objectifs : d'une part, réaliser un tour d'horizon des besoins des entreprises et de la société civile. D'autre part, de dresser un état de l'art des formations académiques en IA qui existent en France et qui participent à la démocratisation de son utilisation.

Date et Lieu

- Date : 10 janvier 2019
- Lieu : Université Paris Nanterre, Amphithéâtre Weber, 200 av. de la République, 92000 Nanterre

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h15 Ouverture de Jean-François Balaudé *(Président de l'Université Paris Nanterre)* et Gauthier Picard (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h30 « Présentation de l'AFIA » par Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*).
- 10h00 « Regard sur l'IA en France vu du CNU section 27 » par Grégory Bonnet (*CNU Section 27*)
- 10h30 Pause
- 11h00 « Développement de compétence Analytics et IA, retour d'expérience Airbus et perspectives » par Bruno Carron (*Airbus*)
- 11h30 « Retour sur la sémantique : comment caractériser et distinguer connaissance, intelligence et conscience artificielle » par Bernard Georges (*Société Générale*)
- 12h00 Buffet
- 14h00 « Évolution de l'enseignement en IA » par Jean-Gabriel Ganascia (*Sorbonne Université*)
- 14h30 « La place de l'IA dans la formation au lycée » par Christine Froidevaux (*Université Paris-Sud*)
- 15h00 « Les formations en Sciences de Données et Intelligence Artificielle à Sorbonne Université » par Bernd Amann, Vincent Guigne, Nicolas Bredeche (*Sorbonne Université*)
- 15h30 « Enseignement et formation en IA en ligne : retour d'expérience sur le MOOC "Web sémantique et Web de données" » par Catherine Faron-Zucker *(Université Nice Sophia Antipolis)*
- 16h00 « Pour une vision unifiée de l'intelligence artificielle : un nouvel ouvrage » par Odile Papini (*Université Aix-Marseille*)
- 16h30 Pause
- 17h00 Table ronde « Quels sujets tutoriels pour PFIA 2019 ? », animée par Gauthier Picard (*Ecole des Mines de Saint-Etienne*)
- 18h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Gauthier Picard, Sandra Bringay et Catherine Faron-Zucker pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres de l'AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-efia/. Le déjeuner est offert à toutes les personnes qui se seront inscrites à la journée avant le 07/01/19, et seulement à celles-ci.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

FIIA 2019

Ce quatrième FORUM INDUSTRIEL DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE est consacré aux SYSTEMES MIXTES avec pour sous-thèmes : capteurs, données et connaissances, intégration numérique et symbolique, hybridation, agents artificiels et humains, et une dominante applicative sur la ville sécure et durable. Chaque thème est composé de courtes présentations suivies d'une mini-table ronde dont l'objectif est d'aboutir à des éléments de feuille de route et de permettre des échanges accrus entre académiques et industriels. Une dernière session est réservée à des présentations rapides par des industriels invités.

Cette journée se tient en partenariat avec le MA Direction Générale de l'Armement.

Date et Lieu

- Date : 11 avril 2019
- Lieu : Amphithéâtre Bienvenüe, IFSTTAR, 14-20 bd Newton, 77420 Champ-sur-Marne

Programme

- 08h45 Ouverture de Joaquin Rodriguez (IFSTTAR). Introduction par Pierre Feillet (CA AFIA)
- 09h00 THEME « Ville sécure et durable. L'Intelligence Artificielle à l'épreuve des territoires » • « IA et Territoires Urbains » par Ahmed Mabrouk (ENGIE *Saint-Denis*) • « La Vision par Ordinateur pour les villes intelligentes » par Levi Viana (WINTICS *Paris*) • Table ronde
- 10h00 Pause
- 10h30 THEME « Capteurs, données et connaissances. Intégration numérique et symbolique » • « Optimisation au quotidien grâce à l'IA et aux données disponibles » par Arnaud de Moissac (DC Brain *Paris*) • « IA et Ingénierie Augmentée (IA2), ou comment hybrider IA, connaissance métiers et modèles physiques » par Patrice Aknin (SystemX *Gif-sur-Yvette*) • World Sensing : quels systèmes d'IA pour aller du signal capteur à la compréhension du comportement observé » par Youssef Miloudi (Berger-Levrault *Boulogne-Billancourt*) • IA connexionniste et IA symbolique : une synergie prometteuse » par Juliette Mattioli (Thales *Palaiseau*) et Christophe Meyer (Thales SIX GTS *Palaiseau*) • « Décisions algorithmiques: des modèles prescriptifs pour encadrer l'apprentissage automatique » par Pierre Feillet (IBM France *Gentilly*) • Table ronde
- 12h30 Buffet
- 14h00 THEME « Hybridation des composants. Interactions entre agents artificiels et humains » • « Booster les performances des applications sémantiques par hybridation des composants IA » par Ghislain Atemezing (Mondeca *Paris*) • Exploitation des modèles *whitebox* dans les interactions humain-IA » par Matthieu Boussard (CRAFT AI *Paris*) • « Initiatives et interactions mixtes pour systèmes autonomes » par Christophe Guettier (Safran *Corporate*) • « Collaboration agent humain - agent virtuel dans l'avion de combat du futur » par Lauren Dargent et Michael Huet (Dassault Aviation *Saint Cloud*) • Collaboration intelligence humaine et intelligence artificielle en vue d'une société conviviale » par Christophe Denis (Sorbonne Université *Paris* & EDF *Saclay*) • Table Ronde
- 16h00 Pause
- 16h30 Présentations rapides de sociétés concernées par les systèmes mixtes en « Trois planches »

Organisation

Cet événement est organisé par Pierre Feillet et Yves Demazeau pour le Collège Industriel de l'AFIA et Caroline Chopinaud pour le Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes de l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres de l'AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-fiia/. Le déjeuner est offert aux personnes qui se seront inscrites à la journée avant le 08/04/19, et seulement à celles-ci.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

PDIA 2019

L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) organise sa sixième journée PERSPECTIVES ET DEFIS DE l'IA sur le thème des CONTRAINTES. "La Programmation par Contraintes (PC) représente une des meilleures avancées que l'informatique ait jamais réalisée pour se rapprocher du Graal de la programmation : l'utilisateur décrit le problème, l'ordinateur le résout" [Freuder 97]. Beaucoup de progrès ont été effectués depuis dans cette direction et il existe dorénavant des techniques et des solveurs permettant de résoudre des problèmes de grande complexité avec de nombreuses applications industrielles. La journée PDIA 2019 vise à présenter les grandes avancées de ces dernières années tout en présentant les grands défis du domaine et les limites des outils et approches actuels. La journée est construite autour d'exposés accessibles, de retours d'expériences et de tables rondes favorisant une grande interaction.

Date et Lieu

- Date : 10 octobre 2019
- Lieu : TOTEM / Institut des Systèmes Complexes Paris IdF, 11 Place Nationale, 75013 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de David Chavalarias (*Directeur de l'ISC IdF*) et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Laurent Simon (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h00 « SAT4J : Satisfaisabilité booléenne et au-delà » par Daniel le Berre (*U. Artois, Lens*)
- 09h30 « Le formalisme de contraintes XCSP3 » par Gilles Audemard (*U. Artois, Lens*)
- 10h00 Pause
- 10h30 « La PC chez Cosling : vision et applications » par Jean-Guillaume Fages (*Cosling, Nantes*)
- 10h50 « Panorama des utilisations de la PC à DecisionBrain » par David Gravot (*DecisionBrain, Paris*)
- 11h10 « Applications de la PC à Dassault Aviation » par Philippe Walter et André Chamard (*Dassault Aviation, Saint-Cloud*)
- 11h30 Table ronde « L'expertise de la PC : dans l'encodage ou dans les outils ? »
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Contraintes en Continu » par Marie Pelleau (*U. Nice Sophia Antipolis*)
- 14h30 « CP Optimizer pour la planification et l'ordonnancement » par Philippe Laborie (*IBM France, Gentilly*)
- 15h00 « Satisfaisabilité booléenne et compilation de connaissances » par Jean-Marie Lagniez (*Huawei, Boulogne Billancourt*) et Laurent Simon (*U. Bordeaux*)
- 15h30 « Compilation de connaissances à Renault » par Jean-Marc Astesana (*Renault, Guyancourt*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Table ronde « La PC face aux problèmes au-delà de NP (comptage, minimisation, …) »
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Philippe Laborie (*IBM France, Gentilly*), Jean-Marie Lagniez (*Huawei, Boulogne Billancourt*) et Laurent Simon (*U. Bordeaux*) pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres de l'AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/inscription-pdia/. Le déjeuner est offert aux personnes qui se seront inscrites à PDIA 2019 avant le 07/10/19, et seulement à celles-ci.

Institut des Systèmes Complexes

cnrs

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Hommage à Jacques Pitrat

Jacques Pitrat est décédé le 14 octobre 2019. Diplômé de l'X, Ingénieur de l'Armement, Directeur de Recherche au CNRS, Jacques Pitrat a consacré sa vie à promouvoir et favoriser le développement de l'IA en France. Pionnier de l'Intelligence Artificielle Forte et auteur de nombreuses publications, père de l'Intelligence Artificielle en France et formateur de nombreux collègues dans le domaine de l'IA, membre actif de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, c'est à cet homme généreux, admirable et respecté de tous, que la communauté nationale en IA souhaite rendre hommage ici à travers de nombreux témoignages.

Date et Lieu

- Date : 06 mars 2020
- Lieu : Sorbonne U., CICSU, salle 108, Couloir 44-45 (accès T44), 4 place Jussieu, 75005 Paris

Programme

- 08h30 Accueil
- 08h45 Ouverture de Bernadette Bouchon-Meunier *(CNRS Paris)* et Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Alain Berger (*Membre du CA de l'AFIA*).
- 09h00 « Jacques Pitrat : ses activités de directeur de laboratoire » par Bernadette Bouchon-Meunier (*CNRS Paris*)
- 09h15 « Jacques Pitrat: directeur de recherche, directeur d'équipe » par Monique Grandbastien (*U. Lorraine*) et Monique Baron (*Sorbonne U.)*
- 09h45 « Démonstration automatique, métathéorèmes, connaissances déclaratives » par Dominique Pastre (*U. Paris Descartes Honoraire*)
- 10h15 « Connaissance, béchamel au chocolat » par Marie Odile Cordier (*U. Rennes 1*)
- 10h30 Pause
- 11h00 « Jacques Pitrat et le Traitement du Langage Naturel » par Hélène Giroire (*Sorbonne U.*)
- 11h30 « IA et les jeux » par Tristan Cazenave (*U. Paris-Dauphine*)
- 12h00 « La prise en compte des symétries dans CAIA » par Jean-Yves Lucas (*EDF Saclay*)
- 12h30 Buffet
- 14h00 « Bootstrapping et métaconnaissance » par Marc Porcheron (*EDF Saclay*)
- 14h30 « CAIA... et au-delà (refpersys.org) » par Basile Starynkevitch (*CEA Saclay*)
- 15h00 « Le point de vue de Jacques Pitrat sur l'apport d'une conscience artificielle à l'IA » par Gérard Sabah (*CNRS Honoraire*)
- 15h30 « L'œuvre scientifique de Jacques Pitrat, une perspective historique » par Jean-Paul Haton (*U. Lorraine*) et Henri Prade (*CNRS Toulouse*)
- 16h00 Pause
- 16h30 Session mémorielle, avec les interventions de Michel Buthion (*Transports Publics Lausanne*), Joël Courtois (*EPITA Kremlin-Bicêtre*), Jean-Luc Dormoy (*VESTA Paris*), Claude Roche (*Consultant Paris*), et les autres contributions depuis la salle.
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Alain Berger, Sandra Bringay et Yves Demazeau pour l'AFIA.

Inscriptions

Les inscriptions à la journée (gratuites pour les membres AFIA, 30 € sinon) sont obligatoires et à effectuer sur le site : https://afia.asso.fr/journee-hommage-j-pitrat/ . Le déjeuner est garanti à toutes les personnes qui se seront inscrites avant le 03/03/20, et seulement à celles-ci.

LIP6

SORBONNE UNIVERSITÉ

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Nuit de l'Info 2018

La Nuit de l'Info 2018 a eu lieu de 16h39 à 8h05 dans la nuit du 6 au 7 décembre sur le thème de *L'assistance numérique d'un explorateur en condition extrêmes*. Le principe de la Nuit de l'Info est très simple : Le soir d'avant à 16h39, les organisateurs remettent un sujet (le même pour toute la France) aux participants. Les étudiants s'organisent en groupes (sur un ou plusieurs sites) : ils développent un projet (informatique, marketing, rédactionnel, ...) tout en ciblant un ou plusieurs défis. Le jour d'après à 8h05, les développements sont figés. Puis, pendant que les équipes dorment, des jurys se réunissent (un jury par défi) et examinent les travaux réalisés par les différentes équipes durant la nuit.

La Compétition

Le défi qu'a proposé l'AFIA s'intitulait Mettez de l'intelligence dans votre moteur: « Vous mettez en œuvre une ou plusieurs méthodes d'Intelligence Artificielle (IA) dans votre projet et vous indiquez en quoi ces méthodes rendent votre réalisation plus performante ou pertinente. Vous pouvez faire appel à des techniques classiques, en cours de développement ou futuristes. L'équipe qui aura mis le plus en avant les avantages de l'utilisation de l'IA dans son projet remportera ce défi ». Les réponses devaient inclure :

- Une description des problématiques IA rencontrées dans le projet,
- Une explication de l'intégration de l'IA dans l'application (description de ce qui a été réalisé qui relève de l'IA ou de ce qui aurait pu être fait avec des outils d'IA)
- Une analyse des avantages et inconvénients de cette intégration.

La récompense est un montant de 400€ assorti d'invitations à présenter une démonstration lors de la compétition organisée par l'AFIA au sein de la Plate-Forme IA 2019 à Toulouse.

Les Equipes

Parmi les 12 équipes inscrites pour relever ce défi, 5 ont réussi à remettre à temps un projet : GIFCOMS, ISITCOM_Shadow_Brokers2, ISIT'COM_Techno_Knights, Lord of the Ping et MLG.

Le Jury

Le jury était composé de Florence Bannay (coordinatrice), Anne-Gwenn Bosser, Philippe Morignot et Sylvie Saget. Les projets ont été jugés sur cinq critères : Fonctionnement (est-ce que la proposition peut être mise en œuvre ?), Innovation, Qualité de l'IA, Spectre IA couvert, Qualité des explications.

Les Résultats

Nous avons eu du mal à départager les deux meilleures équipes : l'équipe *Lord of the Ping* a finalement été déclarée vainqueur pour le recul de ses explications et recevra un prix de 200 euros. Néanmoins vu la qualité des résultats de l'équipe *MLG*, elle recevra la même somme de 200 euros.

Le classement final est le suivant :

1- *Lord of the Ping* a développé un chatbot sarcastique avec détection de serpent par apprentissage. L'équipe est allée au bout de ses implémentations, a bien expliqué les problèmes et les limites des approches utilisées.

2- *MLG* a construit un site web permettant de saisir des données, de visualiser les courbes correspondantes et de donner les positions des robots. Le jury a apprécié les résultats présentés au travers de vidéos.

3- *ISITCOM_Techno_Knights* propose une montre connectée avec différents capteurs pour détecter l'état psychologique et pouvoir une alerte adaptée. Mais les détails techniques et implémentation étaient absents.

4 et 5- *ISITCOM_Shadow_Brokers2* et *GIFCOMS* ont proposé des projets dans lesquels le point de vue IA était peu développé.

L'AFIA remercie tous les participants pour le travail fourni et donne rendez-vous l'année prochaine pour un nouveau défi de l'AFIA !

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Nuit de l'Info 2019

La Nuit de l'Info 2019 a eu lieu de 16h39 à 8h03 dans la nuit du 5 au 6 décembre sur le thème : *Augmenter le pouvoir d'agir des étudiants en situation de précarité*. Le principe de la Nuit de l'Info est très simple: Le jeudi 5, au coucher du Soleil, 16h39, en séance plénière: les organisateurs remettent un sujet (le même pour toute la France) aux participants. Les étudiants s'organisent en groupes (sur un ou plusieurs sites) : ils développent un projet (informatique, marketing, rédactionnel, ...) tout en ciblant un ou plusieurs défis. Le vendredi 6, au lever du Soleil, 08h03, les développements sont figés. Le vendredi matin, pendant que les étudiants dorment des jurys se réunissent (un jury par défi) et examinent les travaux réalisés par les différentes équipes durant la nuit.

La Compétition

Le défi qu'a proposé l'AFIA s'intitulait Mettez de l'intelligence dans votre moteur: « Vous mettez en œuvre une ou plusieurs méthodes d'Intelligence Artificielle (IA) dans votre projet et vous indiquez en quoi ces méthodes rendent votre réalisation plus performante ou pertinente. Vous pouvez faire appel à des techniques classiques, en cours de développement ou futuristes. L'équipe qui aura mis le plus en avant les avantages de l'utilisation de l'IA dans son projet remportera ce défi ». Les réponses devaient inclure :

- Une description des problématiques IA rencontrées dans le projet,
- Une explication de l'intégration de l'IA dans l'application (description de ce qui a été réalisé qui relève de l'IA ou de ce qui aurait pu être fait avec des outils d'IA existants ou imaginaires)
- Une analyse des avantages et inconvénients de cette intégration.

Les Equipes

Parmi les 23 équipes inscrites pour relever ce défi, 10 ont réussi à remettre à temps un projet : « Les Ginis » , « La Rose » de Cesi Strasbourg, « Les 3 Cannards », « Obviously Working 2 Late [OWL2] », « IsitCom_HASHTAG_TOUNSI (2) », « Buck3T+ », « Codeanon », « Les nuls », « MLG », et « Les Importateurs ».

Le Jury

Le jury était composé de Florence Bannay (coordinatrice), Anne-Gwenn Bosser, Guillaume Levieux et Nicolas Pépin-Hermann. Les projets ont été jugés sur cinq critères : Applicabilité / mise en œuvre Innovation, Qualité de l'IA, Spectre IA couvert, Qualité des explications.

Les Résultats

La première place a été attribuée à l'équipe « MLG » : l'équipe propose un jeu vidéo (fonctionnel) pour apprendre à réaliser les démarches administratives nécessaires à la vie d'étudiant. Le jeu permet de visiter 3 bâtiments avec qui on peut discuter et qui récupèrent les informations standard que l'organisme visé récupèrerait.

La deuxième place a été attribuée à l'équipe « Les 3 Cannards » qui propose un outil (fonctionnel) permettant de faire un bilan visuel et interactif de l'état de l'étudiant selon différents critères : détection d'émotion, réponse à des questions.

Une même récompense de 200 euros a été attribuée aux équipes « MLG » et « Les 3 Cannards ».

La troisième place a été attribuée à l'équipe « La Rose » a répondu au challenge en proposant un site web dans lequel on peut retrouver des questions classées par thème et discuter avec un chabot.

L'AFIA remercie tous les participants pour le travail fourni et donne rendez-vous l'année prochaine pour un nouveau défi de l'AFIA !

Statistique & IA 2018

Cette première journée STATISTIQUE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE fait se rencontrer les deux domaines autour du thème de l'APPRENTISSAGE MACHINE.

Les progrès récents en apprentissage machine font actuellement l'objet d'investigations intenses dans diverses communautés scientifiques et les applications industrielles foisonnent. Différentes communautés s'attellent à l'étude d'une multitude d'approches, souvent complémentaires. Cette journée aura pour but de mettre en relief les liens forts entre l'Intelligence Artificielle et les Statistiques, et stimuler les discussions autour des interactions futures entre ces deux communautés. Algorithmes, challenges et impacts, et analyses mathématiques fines seront les pôles principaux des exposés invités.

Date et Lieu

- Date 25 septembre 2018
- Lieu Institut Henri Poincaré, 11 rue Pierre et Marie Curie 75005 Paris

Programme

- 09h00 Présentations de l'AFIA par Yves Demazeau, son Président, et de la SFdS par Gérard Biau, son Président.
- 09h15 « Unsupervised learning, from maximum entropy to deep generative networks » par Stéphane Mallat *(Collège de France Paris)*
- 10h15 « Robust machine learning via median-of-means » par Guillaume Lecue *(CNRS Palaiseau)*
- 10h45 Pause-café
- 11h00 « Paradoxes et inférence causale » par Alexandre Aussem *(Université Lyon 1)*
- 11h45 « BRICKS: Bayesian representation and inference for complex knowledge structuring » par Paul Munteanu *(Bayesia Laval)*
- 12h30 Pause
- 14h00 « A brief introduction to probabilistic argumentation » par Anthony Hunter *(University College London)*
- 14h45 « Autours des modèles graphiques qualitatifs » par Salem Benferhat *(Université d'Artois Lens)*
- 15h30 Pause-café
- 15h45 « Random matrix advances in machine learning » par R. Couillet *(Centrale-Supélec Gif-sur-Yvette)*
- 16h30 « The universality problem in dynamic machine learning » par Juan Pablo Ortega *(Université de Saint Gall)*
- 17h15 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Engelbert Mephu Nguifo (engelbert.mephu_nguifo@uca.fr) pour l'AFIA et Stéphane Chrétien (stephane.chretien@npl.co.uk) pour la SFdS.

Inscriptions

L'inscription est gratuite mais obligatoire et inclut la participation aux pauses-café. Elle se fait en ligne : https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf7osDlmfa1ZMTBXLnfwYOuAUbMJb0bgymvqTr_puD_ACrXMQ/viewform?c=0&w=1 L'organisation et la prise en charge du déjeuner restent à charge des participants.

IHM & IA 2019

L'AFIHM et l'AFIA organisent leur quatrième journée commune INTERACTION HOMME-MACHINE & INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

Cette journée s'organise autour de présentations, posters, démos, échanges sur des sujets à l'intersection des deux champs ou mettant en évidence les liens possibles entre les deux disciplines.

Date et Lieu

- Date 14 mars 2019
- Lieu Amphi B310, Télécom ParisTech, 46 rue Barrault, 75013 Paris

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h30 Présentations de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA) et* de *l'AFIHM* par Eric Lecolinet *(Président de l'AFIHM).*
- 10h00 « L'IA pour la conception et l'utilisation des systèmes interactifs » par Gilles Bailly (CNRS *Paris*)
- 10h30 « Prendre en compte le facteur humain pour construire la coopération Homme-IA » par Myriam Fréjus *(*EDF *Palaiseau)*
- 11h00 « Exploration interdisciplinaire de corpus d'interaction Humain-Humain et Humain-Machine pour le développement d'Agents Conversationnels Animés » par Magalie Ochs *(*Université Aix-*Marseille)*
- 11h30 « En quoi et comment l'IA pourrait-elle permettre d'améliorer l'entraînement et l'apprentissage des utilisateurs d'Interfaces Cerveau-Ordinateur ? » par Camille Jeunet *(*CNRS *Toulouse)*
- 12h00 « Apprentissage des Interfaces Multi-Touch : Reconnaissance de Gestes et Conception de Modèles d'Interaction Automatique » par Quentin Debard *(*INSA *Lyon)*
- 12h30 Déjeuner / Posters et Démonstrations
- 14h00 « Using Interactive Machine Learning in Movement-Based Interactive Systems » par Frédéric Bevilacqua *(*IRCAM *Paris)*
- 14h30 « Collaboration Humain-Machine à l'aide de motifs dialogiques » par Jean-Baptiste Louvet *(*INSA *Rouen)*
- 15h00 « FlexTech : Intégration de l'Humain dans les Systèmes Complexes à Autonomie Croissante » par Guy-André Boy *(*CentraleSupélec *Saclay)*
- 15h30 « Comment créer des Partenariats Humain-Machine ? » par Wendy Mackay *(*INRIA *Saclay)*
- 16h00 Pause / Posters et Démonstrations
- 17h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Nicolas Sabouret pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Baptiste Caramiaux et Jules Françoise pour L'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (AFIHM).

Inscriptions

Les inscriptions gratuites mais obligatoires, sont à réaliser sur https://ihmia.afihm.org/inscriptions/. L'inscription inclut la participation aux pause-café. L'organisation et la prise en charge du déjeuner restent à la discrétion des participants.

EGC & IA 2019

Nous assistons aujourd'hui à une production de données structurées sans précédent, publiées sous la forme de graphes de connaissances accessibles via le Web de données. Bien que incomplets, hétérogènes et pouvant contenir des erreurs, ces graphes de connaissance contiennent un gisement d'informations important qui peut être exploité pour découvrir automatiquement de nouvelles connaissances.

C'est ainsi que cette quatrième journée EXTRACTION ET GESTION DES CONNAISSANCES et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE réunit les deux communautés autour du thème « DECOUVERTE DE CONNAISSANCES DANS LE WEB DES DONNEES ».

Date et Lieu

- Date 10 mai 2019
- Lieu LRI, Bât. 660 Claude Shannon, rue Noetzlin, 91190 Gif-sur-Yvette

Programme

- 09h45 Présentations de l'AFIA et du Collège Sciences de l'Ingénierie des Connaissances, par Yves Demazeau (*Président de l'AFIA*) et de EGC par Arnaud Martin (*Président de EGC*).
- 10h00 Conférence invitée « Explicabilité / Interprétabilité des algorithmes d'apprentissage profond » par Luis Galarraga (INRIA *Rennes*).
- 11h00 « Learning How to Correct a Knowledge Base » par Thomas Pellissier-Tanon (U. Paris Saclay *Paris*), Camille Bourgaux et Fabian Suchanek.
- 11h30 « Towards Interactive Causal Relation Discovery Driven by an Ontology » par Mélanie Munch (INRA Paris) Juliette Dibie, Pierre-Henri Wuillemin, et Cristina Manfredotti.
- 12h00 Pause-Déjeuner
- 13h30 « Enhancing the interlinking quality : A structure-based approach » par Pierre-Henri Paris (Sorbonne Université *Paris*), Fayçal Hamdi et Samira Si-Said Cherfi.
- 14h00 « Scalable Schema Discovery for RDF Data » par Redouane Bouhamoum (U. Paris Saclay *Paris*), Zoubida Kedad and Stéphane Lopes.
- 14h30 « Revealing the Conceptual Schemas of RDF Datasets » par Subhi Issa (CNAM *Paris*), Pierre-Henri Paris, Fayçal Hamdi et Samira Si-Said Cherfi
- 15h00 Pause-café
- 15h30 « Re-descriptions and Formal Concept Analysis for Mining Definitions in Linked Data » par Justine Reynaud (U. Lorraine *Nancy*) Yannick Toussaint et Amedeo Napoli.
- 16h00 « Linkex : A Tool for Link Key Discovery Based on Pattern Structure » par Nacira Abbas (U. Lorraine *Nancy*), Jérôme David et Amedeo Napoli.
- 16h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Nathalie Pernelle et Fathia Sais pour le Collège SIC de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Cyril de Runz pour l'Association Extraction et Gestion des Connaissances (EGC).

Inscriptions

Les inscriptions gratuites mais obligatoires, se font sur https://jtegcafia.sciencesconf.org/registration . Elles incluent le déjeuner et la pause-café, offerts à tous les participants inscrits à la journée.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle

Classification & IA 2019

La classification est au cœur des activités humaines ; lorsque l'on pense le monde, on l'organise et l'on classe les éléments qui le composent. En tant que discipline s'étant initialement fixés pour objet les phénomènes constitutifs de l'intelligence humaine, l'IA s'est naturellement emparée de cette problématique et a produit de très nombreuses approches pour des problèmes variés. Selon les communautés, on distingue la classification de la discrimination, la classification non supervisée de la classification supervisée. La première s'ancre dans la longue tradition de la taxonomie. La seconde, plus récente, est associée à l'essor de l'apprentissage automatique.

Cette deuxième journée CLASSIFICATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, organisée conjointement par l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle et la Société Francophone de Classification dans le cadre des Rencontres de la SFC 2019, vise à faire le point sur des avancées récentes aux frontières de ces communautés.

Date et Lieu

- Date 04 septembre 2019
- Lieu Centre INRIA Nancy, 615 rue du Jardin Botanique, 54600 Villers-lès-Nancy

Programme

- 13h00 Présentations de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle, par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA) et* de la Société Francophone de Classification par Mohamed Nadif *(Président de la SFC).*
- 13h30 « Structure de Treillis : panorama des aspects structurels et algorithmiques » par Karell Bertet *(Université de La Rochelle).*
- 14h30 « Construction de variables pour la classification par échantillonnage de motifs » par Lamine Diop *(Université Gaston Berger, Saint-Louis, Sénégal)*, Cheikh Talibouya Diop, Arnaud Giacometti, Dominique Li et Arnaud Soulet.
- 15h00 « Classification croisée de données tensorielles » par Rafika Boutalbi *(Université Paris 5)*, Lazhar Labiod et Mohamed Nadif.
- 15h30 « Towards a Constrained Clustering Algorithm Selection » par Guilherme Alves *(Université de Lorraine)*, Miguel Couceiro and Amedeo Napoli.
- 16h00 Pause
- 16h30 « Apprentissage et classification par méthodes collaboratives : comment choisir ses collaborateurs et qu'échanger avec eux ? » par Antoine Cornuéjols *(AgroParisTech Paris).*
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Amedeo Napoli pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) et Miguel Couceiro pour la Société Francophone de Classification (SFC).

Inscriptions

Les inscriptions se font via le site : https://project.inria.fr/sfc2019/inscription/.

MACS & IA 2019

Cette quatrième journée entre le GdR MACS et l'AFIA est consacrée à l'INGENIERIE / MODELISATION D'ENTREPRISE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE.

La journée est organisée en trois sessions consacrées à l'Industrie 4.0, aux Systèmes de Santé, et à la Dynamique de Mobilité. Les domaines d'applications des entreprises visées incluent plus particulièrement le domaine manufacturier, et ceux des transports, des services, et de la santé.

Date et Lieu

- Date 7 Novembre 2019
- Lieu Amphithéâtre De Dietrich – INSA Strasbourg – 24 boulevard Victoire – 67000 Strasbourg

Programme

- 08h30 Accueil
- 09h00 Présentations de l'AFIA par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA)* et du GdR Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes, par Isabelle Queinnec *(Directrice du GdR MACS)*. Introduction de la journée par Virginie Goepp, Jean-Paul Jamont, et Néjib Moalla.
- 09h25 « AI for the industry of the future: an interoperability perspective » par Hervé Panetto *(Université de Lorraine, Nancy)*
- 10h10 « CPPS et IA » par Ali Siadat *(ENSAM Metz)* et Virginie Goepp.
- 10h55 « Big Data and AI for Industry 4.0: feedbacks and lessons learned » par Rafiqul Haque *(Cognitus Paris)*
- 11h40 « Approche orientée données pour améliorer l'adhésion des patients au traitement de la PPC durant la phase d'initiation » par Jensen-Selwyn Joymangul *(Linde HomeCare France)*
- 12h25 « Ethique et IA » par Grégory Bonnet *(Université de Caen-Normandie)*
- 13h10 Déjeuner
- 14h30 « Transport Intelligent » par Flavien Balbo *(EMSE Saint Etienne)*
- 15h15 « L'IA au service de la maintenance intelligente ferroviaire : le cas du SurferLab » par Damien Trentesaux *(UPHF Valenciennes)* et Yves Sallez.
- 16h00 « Emotion artificielle et processus cognitifs de résilience » par Clément Raïevsky *(UGA Valence)*
- 16h45 Conclusions
- 17h00 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Jean-Paul Jamont pour le Collège Systèmes Multi-Agents et Agents Autonomes de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), Virginie Goepp et Néjib Moalla pour le Groupe de Travail INE (INgénierie d'Entreprise) du GdR Modélisation, Analyse et Conduite de Systèmes (MACS).

Inscriptions

L'inscription à la journée, gratuite mais obligatoire, inclut la participation au déjeuner (dans la limite des places disponibles) et est à prendre sur le site https://enquetes.univ-lyon2.fr/index.php/414923?lang=fr .

RI & IA 2019

Cette troisième journée RECHERCHE D'INFORMATION et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE prolonge les discussions entre les deux communautés sur le thème des bases de connaissances et plus particulièrement des réseaux sémantiques, graphes qui décrivent les entités du monde réel ainsi que les relations qui les lient, sans thématique particulière, autour desquels les problématiques sont nombreuses.

Date et Lieu

- Date 02 décembre 2019
- Lieu Sorbonne Université, Salle 108, Barre 44-45, 4 place Jussieu 75005 Paris

Programme

- 09h00 Accueil
- 09h30 Présentations de l'AFIA, par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA) et* de l'ARIA par Benjamin Piwowarski *(Président de ARIA).* Présentation de la journée par Haifa Zargayouna *(Université Paris 13)* et Karen Pinel-Sauvagnat *(Université Toulouse 3).*
- 09h40 « Deep learning for knowledge graphs and it's applications » par Mehwish Alam *(FIZ Karlsruhe).*
- 10h40 Pause-café
- 11h00 « Raffinement de graphes de connaissances: découverte de clés et invalidation de liens d'identité » par Fatiha Saïs *(Université Paris 11).*
- 12h00 « Amélioration de l'extraction de relation par l'utilisation de la validation de relation avec une architecture siamoise » par Jose Moreno *(Université Toulouse 3).*
- 12h30 Déjeuner
- 13h45 « Unsupervised Learning with Text » par Ludovic Denoyer *(Facebook Paris).*
- 14h45 « IDELIANCE MENTAL : Les réseaux sémantiques comme outil de travail quotidien » par Jean Rohmer *(ESILV).*
- 15h15 « Supervised Learning for the ICD-10 Coding of French Clinical Narratives » par Clément Dalloux *(Université de Rennes 1)* et al.
- 15h45 Pause-café
- 16h05 « Ancrage conceptuel du texte pour l'apprentissage de représentation: application à la recherche d'information » par Laure Soulier *(Sorbonne Université).*
- 17h05 « Construction de graphes de connaissances à partir des publications scientifiques » par Davide Buscaldi *(Université Paris 13).*
- 17h35 « Détection d'intention : application industrielle d'un projet de recherche » par Christophe Servan *(QWANT Paris).*
- 18h05 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Haifa Zargayouna pour l'AFIA et Karen Pinel-Sauvagnat pour l'ARIA, avec le soutien du Projet FUI PCU et le projet ANR COST.

Inscriptions

Les inscriptions se font sur https://ia-ri.sciencesconf.org/. L'inscription est gratuite mais obligatoire. Elle inclut la participation aux pause-café.

PS & IA 2020

La société de Philosophie des Sciences (SPS) et L'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA) se retrouvent pour une deuxième journée PHILOSOPHIE DES SCIENCES ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE sur le thème de la prédiction et de l'explication des phénomènes sociaux.

Date et Lieu

- Date : 06 février 2020
- Lieu : TOTEM / Institut des Systèmes Complexes Paris IdF, 11 Place Nationale, 75013 Paris

Programme

- 08h30 Accueil des participants
- 09h00 Présentations de l'AFIA par Yves Demazeau *(Président de l'AFIA)* et de la SPS par Francesca Merlin *(Présidente de la SPS)*. Présentation de la journée par Isabelle Drouet (*Sorbonne Université, Paris*), Robin Lamarche-Perrin *(CNRS Paris)* et Marion Worms (*Université Panthéon-Sorbonne, Paris*).
- 09h10 « Silicone prophète. L'IA face aux défis de la prédiction en sciences sociales » par Henri Galinon (*Université Clermont-Auvergne*)
- 10h10 Pause
- 10h30 « Les défis d'une aide à la décision intelligente : de la modélisation des jugements humains à l'explication des recommandations » par Wassila Ouerdane (*CentraleSupélec, Paris*)
- 11h30 « Comprendre et prédire : étude de cas sur la prédiction du vote à l'aide de modèles statistiques du langage » par Denis Bonnay (*Université Paris Nanterre*)
- 12h30 Pause
- 14h00 « Justice & Intelligence artificielle : qu'est-ce que l'informatique se propose d'apporter au droit ? » par Fabien Tarissan (*CNRS Paris*)
- 15h00 « Le succès des algorithmes prédictifs remet-il en cause notre notion de connaissance scientifique ? » par Anouk Barberousse (*Sorbonne Université Paris*)
- 16h00 Pause
- 16h30 « Pourquoi la société ne se laisse pas mettre en équations » par Pablo Jensen (*CNRS Lyon*)
- 17h30 Clôture

Organisation

Cet événement est organisé par Robin Lamarche-Perrin pour l'Association Française pour Intelligence Artificielle (AFIA) et Isabelle Drouet et Marion Worms pour la Société de Philosophie des Sciences (SPS).

Inscriptions

L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : https://iscpif.fr/upcomingevents/journee-philosophie-des-sciences-et-intelligence-artificielle/ . L'inscription inclut la participation aux pause-café.

Santé & IA 2020

Cette quatrième journée INFORMATIQUE MEDICALE et INTELLIGENCE ARTIFICIELLE fait se rencontrer les deux disciplines autour du thème de la SANTE. Les thématiques de la journée concernent le traitement intelligent de données et des connaissances en santé, les représentations et les méthodes de l'IA.

Cette journée Santé et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 29 juin 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 09h00 Ouverture de P. Staccini (*Président de AIM*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Fl. Mougin (*U. Bordeaux*) et L. Soualmia (*U. Rouen Normandie*)
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Apprentissage et fouille de données pour l'optimisation combinatoire: deux études de cas » par Jin-Kao Hao (*U. Angers*)
- 10h00 Pause
- 10h30 « Elémentaire mon cher Watson ? » par Jean Charlet (*APHP Paris*) et Xavier Tannier.
- 11h00 « Utilisation des graphes pour la représentation spatio-temporelle lors d'un examen d'IRM fonctionnelle cérébrale » par Aurélie Leborgne (*U. Strasbourg*) et al.
- 11h30 « Towards a mobile conversational agent for COVID-19 post quarantine psychological assistance » par Nourchene Ouerhani (*U. La Manouba*) Ahmed Maalel et Henda Ben Ghézela
- 12h00 « Diviser pour mieux classifier » par Yves Mercadier (*U. Montpellier*) Jérôme Azé et Sandra Bringay.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « La stratégie nationale pour l'intelligence artificielle (2018-2022) : premiers bilans – engager la deuxième étape » par R. Vedel (*MINEFI Paris*)
- 15h00 Pause
- 15h30 « Literature triage services to support biocuration: from neXtProt to COVID-19 » par Patrick Ruch (*HEG/HESS Genève*)
- 16h00 « Predictive Patient Care: Visualize and Interpret Models Decisions Application to Medication Adherence » par Thomas Janssoone (*SEMEIA Paris*) et al.
- 16h30 « Exploitation de documents médicaux par les techniques d'embedding : application au typage automatique de documents » par Mikaël Dusenne (*CHU Rouen*) et al.
- 17h00 « Graph clustering for hospital communities » par Tu Ngo (*CHU Montpellier*) et al.

Organisation

Cet événement est organisé par Fleur Mougin (*U. Bordeaux*) et Lina Soualmia (*U. Rouen Normandie*) pour *l'Association Française d'Informatique Médicale (*AIM*)* et pour le Collège Science de l'Ingénierie des Connaissances (SIC) de l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA).

Inscriptions

(*) Pour raisons sanitaires, cet événement est finalement virtualisé, et la session d'ouverture, annulée. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

Internet des Objets & IA 2020

L'AFIA, en partenariat avec l'IMT, organise sa première journée « INTERNET DES OBJETS ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE » sur le thème des objets connectés aux intelligences connectées. L'objectif de cette journée est de faire le point sur l'utilisation de l'IA dans le contexte de l'Internet des Objets.

Cette journée Internet des Objets et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 30 juin 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 08h30 Ouverture de J.-Ph. Lagrange (*Directeur de la Recherche IMT*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par P. Albers (*ESEO Angers*) et O. Boissier (*EMSE St Etienne*).
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « *A hitchhiker's guide to Ontology* » par Fabian Suchanek (*Telecom ParisTech*).
- 10h00 Pause
- 10h30 « Reinforcement learning for telecommunication network: from Opportunistic Spectrum Access to IoTs » par Raphaël Féraud (*Orange Rennes*).
- 11h00 « IoT for Supervision and Control of Water Distribution Systems » par Henrique Donâncio (*INSA Rouen*) et L. Vercouter.
- 11h30 « SiCoPAD : Suivi interactif et connecté de patients hospitalisés à domicile » par Salma Ben Dhaou (*Normandie U. Caen*), M. Bourgais, G. Bonnet, L. Vercouter, et B. Zanuttini.
- 12h00 « Vers des collectifs d'objets connectés » par Jean-Paul Jamont (*U. Grenoble Alpes Valence*).
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Harnessing Complex Systems with Agent-based Modeling, Machine Learning and High-performance Computing » par Jonathan Ozik (*ANL Chicago*).
- 15h00 Pause
- 15h30 « Reconnaissance d'actions basée sur des modèles de segmentation » par Catherine Huyghe (*Yncréa et U. Lille*), N. Ihaddadene, Th. Haessle, et Ch. Djeraba.
- 16h00 « Context-Aware Interoperability: Application to the Path Finding Problem » par Taboada-Orozco Adrian (*U. Bourgogne Franche-Comté Dijon*), Y. Kokou et N. Christophe.
- 16h30 « Le Projet ANR CoSWoT (Constrained Semantic Web of Things) » par Frédérique Laforest (*INSA Lyon*) et M. Lefrançois.
- 17h00 « Enriching the oneM2M platform with generic AI capabilities; a proof of concept » par Emmanuel Darmois (*CommLedge Viroflay*)

Organisation

Cet événement est organisé par Patrick Albers (*ESEO Angers*) et Olivier Boissier (*EMSE St Etienne*) pour l'Institut Mines Telecom (IMT) et pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA).

Inscriptions

(*) Pour raisons sanitaires, cet événement est finalement virtualisé, et la session d'ouverture, annulée. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

Agronomie & IA 2020

L'AFIA, en partenariat avec l'INRAE, organise sa première journée « AGRONOMIE ET INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ». L'objectif de favoriser les échanges autour des applications dans les domaines de l'agriculture et de l'agroalimentaire qu'offrent les méthodes d'intelligence artificielle.

Cette journée Agronomie et IA est inscrite au sein de la Plate-Forme IA 2020 (PFIA 2020).

Date et Lieu

- Date : 01 juillet 2020
- Lieu : ESEO, 10 boulevard Jean Jeanneteau, 49100 Angers (*)

Programme

- 08h30 Ouverture de H. Monod (*Chef du Département MathNum INRAE*) et Y. Demazeau (*Président de l'AFIA*). Introduction par Th. Guyet (*Institut Agro Rennes*) et D. Rousseau (*U. Angers*).
- 09h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Experiences in Setting up Ontology Governance Models with Multiple Stakeholders » par Oscar Corcho (*U. Politecnica Madrid*).
- 10h00 Pause
- 10h30 « Livre Blanc sur le numérique en agriculture » par Ludovic Brossard (*INRAE Rennes)*.
- 11h00 « Programmation par contraintes appliquée aux problèmes agro-environnementaux » par Philippe Vismara (*Montpellier SupAgro*).
- 11h30 « AgroPortal: a Vocabulary and Ontology Repository for Agronomy » par Clément Jonquet (*U. Montpellier*).
- 11h50 « Représentation des itinéraires culturaux en maraîchage » par Florence Amardeilh (*Elzeard.co Pessac*).
- 12h10 « D2KAB project taking off: Data to Knowledge in Agronomy and Biodiversity » par Sophie Aubin (*INRAE Versailles*) et al.
- 12h30 Déjeuner
- 14h00 Conférence Invitée PFIA 2020 « Traitement des réseaux de neurones profonds sur puce » par Ghouthi Boukli Hacene (*IMT Atlantique Brest*).
- 15h00 Pause
- 15h30 « Apprentissage Automatique et imagerie agricole embarquée » par Christian Germain (*Bordeaux Science Agro*) et al.
- 16h10 « Remontée automatique du comportement des vaches laitières » par Lucile Riaboff (ESEOTech/*Terrena innovation Angers*) et al.
- 16h50 « Apprentissage profond pour la cartographie de l'occupation du sol à partir de séries temporelles d'image satellitaires » par Dino Ienco (*INRAE Montpellier*)

Organisation

Cet événement est organisé par Thomas Guyet (*Institut Agro Rennes*) et David Rousseau (*U. Angers*) pour l'Association Française pour l'Intelligence Artificielle (AFIA), en partenariat avec l'Institut National de Recherche pour l'agriculture, l'Alimentation, et l'Environnement (INRAE) et son département MathNum.

Inscriptions

(*) Pour raisons sanitaires, cet événement est finalement virtualisé, et la session d'ouverture, annulée. L'inscription est gratuite mais obligatoire sur le site : http://pfia2020.fr/home/inscriptionauxsessions/.

AfIA
Association française
pour l'Intelligence Artificielle
IRIT
Institut de Recherche
en Informatique de Toulouse
CNRS - INP - UT3 - UT1 - UT2J
La rencontre annuelle de la communauté
Intelligence Artificielle
autour de conférences et ateliers thématiques
PFIA
2019
Plate-Forme Intelligence Artificielle
en coopération avec JSAI 2019
TOULOUSE
1 - 5 Juillet 2019
Université Toulouse 1 Capitole
Conférences hébergées :
APIA : Conférence sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle
CAp : Conférence sur l'Apprentissage Automatique
CNIA : Conférence Nationale en Intelligence Artificielle
IC : Journées Francophones Ingénierie des Connaissances
JFPDA : Journées Planification, Décision et Apprentissage
JFSMA : Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents
JIAF : Journées d'Intelligence Artificielle Fondamentale
RJCIA : Rencontre des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle
TALN – RECITAL : Conférence sur le Traitement Automatique des Langues Naturelles
www.irit.fr/pfia2019
Sponsors
AIRBUS ARDANS ENGIE EURODECISION HUAWEI inbenta Inria INTERDIGITAL
MICHELIN nexter onepoint. orange Pactle|Novation probayes SOCIETE GENERALE SPIE Synapse
Soutiens
institutionnels
ANITI
MIAI @ Grenoble Alpes
ONERA
cimi TOULOUSE
Clés
cnrs
INRA
INSA
Occitanie
SCIENCES LANGAGE
UNIVERSITÉ TOULOUSE Jean Jaurès
UNIVERSITÉ TOULOUSE III PAUL SABATIER
MAIRIE DE TOULOUSE

PFIA 2020

Plate Forme Intelligence Artificielle

Angers

29 juin - 3 juillet 2020

Conférences et événements hébergés

- **Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA)**
  Présidents : Stephan Brunessaux (Airbus Defense and Space) & Amal Elfallah-Seghrouchni (LIP6)
- **Conférence Nationale en Intelligence Artificielle (CNIA)**
  Présidente : Isabelle Bloch (Télécom ParisTech)
- **Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC)**
  Président : Sébastien Ferré (IRISA)
- **Journées Francophones sur la Planification, la Décision et l'Apprentissage (JFPDA)**
  Président : Frédéric Maris (IRIT)
- **Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)**
  Président : Nicolas Sabouret (LIMSI)
- **Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle (RJCIA)**
  Président : Alexandre Niveau (GREYC)
- **Tutoriels**
  Responsable : Gauthier Picard (EMSE)
- **Journées thématiques pluridisciplinaires**
  Responsable : Sandra Bringay (LIRMM)

©Angers Loire Tourisme

Organisée par

AFIA Association française pour l'Intelligence Artificielle — ESEO INNOVATION MAKES SENSE — LERIA — université angers

pfia2020.fr

En partenariat avec