



HAL
open science

Ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité des données issues de systèmes sociaux - IA et Altérité radicale

Pierre Saurel

► **To cite this version:**

Pierre Saurel. Ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité des données issues de systèmes sociaux - IA et Altérité radicale. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université Reims Champagne Ardenne, 2014. tel-01118925

HAL Id: tel-01118925

<https://hal.science/tel-01118925>

Submitted on 20 Feb 2015

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.



Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Ecole Doctorale Sciences Technologies Santé

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Domaine de recherche : Informatique – Intelligence artificielle

par

Pierre SAUREL

Soutenue et présentée publiquement le 2 décembre 2014

Ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité
des données issues de systèmes sociaux

IA et Altérité radicale

Devant la commission d'examen composée de :

Michael KRAJECKI	Professeur, CReSTIC, URCA	Président
Hugues BERSINI	Professeur, IRIDIA, U. Libre de Bruxelles	Rapporteur
Frédéric Fol LEYMARIE	Professeur, Goldsmiths, U. of London	Rapporteur
Jean-Guy MEUNIER	Professeur, U. du Québec à Montréal	Rapporteur
Daniel ANDLER	Professeur, SND, U. Paris-Sorbonne & IUF	
Danièle BOURCIER	Directrice de recherche émérite, CERSA, U. Panthéon-Assas	
François PELLEGRINI	Professeur, LaBRI, U. de Bordeaux	
Francis ROUSSEAUX	Professeur, CReSTIC, URCA	



Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Ecole Doctorale Sciences Technologies Santé

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Domaine de recherche : Informatique – Intelligence artificielle

par

Pierre SAUREL

Soutenue et présentée publiquement le 2 décembre 2014

Ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité des données issues de systèmes sociaux

IA et Altérité radicale

Devant la commission d'examen composée de :

Michael KRAJECKI	Professeur, CReSTIC, URCA	Président
Hugues BERSINI	Professeur, IRIDIA, U. Libre de Bruxelles	Rapporteur
Frédéric Fol LEYMARIE	Professeur, Goldsmiths, U. of London	Rapporteur
Jean-Guy MEUNIER	Professeur, U. du Québec à Montréal	Rapporteur
Daniel ANDLER	Professeur, SND, U. Paris-Sorbonne & IUF	
Danièle BOURCIER	Directrice de recherche émérite, CERSA, U. Panthéon-Assas	
François PELLEGRINI	Professeur, LaBRI, U. de Bordeaux	
Francis ROUSSEAU	Professeur, CReSTIC, URCA	

Sommaire

Introduction	9
1 Une intelligence artificielle centrée sur les systèmes individuels de connaissance	11
1.1 L'intelligence artificielle élaborée sur les vestiges de l'étude des formalismes.....	11
1.2 L'intelligence artificielle centrée sur les capacités rationnelles individuelles	12
1.3 Des fonctionnalités nouvelles pour étendre le champ de l'intelligence artificielle : auto-reproduction, apprentissage, cognition	13
1.3.1 L'auto-reproduction	13
1.3.2 L'apprentissage des automates.....	13
1.3.3 Regards critiques sur l'IA classique et la cognition.....	14
2 L'intelligence artificielle collective et systémique.....	19
2.1 Jeux, théorie des jeux et modèles multi-agents	19
2.2 L'intelligence en essaim et l'émergence.....	19
2.3 Les modèles distribués de systèmes sociaux	21
3 Connaissance et altérité radicale pour l'intelligence artificielle : ce que cela fait d'être une chauve-souris.....	23
3.1 Diversité de l'altérité radicale.....	24
3.1.1 L'altérité radicale vue par l'anthropologie.....	24
3.1.2 Paul Feyerabend et l'incommensurabilité des théories scientifiques,.....	25
3.1.3 John von Neumann et les deux mécaniques : refondation axiomatique de la mécanique quantique.....	25
3.1.4 Hétérogénéité des systèmes de normes	26
3.2 Cinq observations sur l'élaboration de systèmes de connaissance artificiels tenant compte de l'altérité radicale	29
3.2.1 La volonté d'englober la totalité des systèmes de connaissance.....	29
3.2.2 L'impossible isomorphisme universel	29
3.2.3 Les illusions de l'intégration de l'altérité réduite.....	30
3.2.4 La complexité des systèmes à trois niveaux.....	30
3.2.5 Les limites gödeliennes à la connaissance totale : systèmes axiomatiques dérivés hétérogènes.....	31
4 Concepts, modèles et outils pour une intelligence artificielle tenant compte de l'altérité radicale	33
4.1 Opérateurs d'altérité	33
4.1.1 Définitions pour les opérateurs d'altérité	33

4.1.2	L'opérateur de plongement ou d'implantation.....	33
4.1.3	L'opérateur d'oscillation par alternance	33
4.1.4	L'opérateur d'annihilation.....	34
4.1.5	L'opérateur de collection	34
4.1.6	Les opérateurs d'hybridation.....	34
4.1.7	Les opérateurs de refondation	35
4.1.8	Les opérateurs d'étrangeté.....	35
4.1.9	Les opérateurs de choix	35
4.1.10	Les opérateurs de trace	35
4.1.11	Les opérateurs de fermeture	36
4.2	Propriétés élémentaires des opérateurs d'altérité	36
4.3	Hétérotopies et intelligence territoriale	37
4.4	Hétérochronies et temporalités dans les systèmes de e-learning.....	37
4.5	Hiérarchies, hétérarchies et données personnelles	38
5	Conclusion et travaux à venir.....	41
5.1	Explorer les opérateurs d'altérité appliqués aux bases de données territoriales accessibles en open data.....	41
5.2	E-learning et parcours d'apprentissage.....	42
5.3	Travaux sur les liens entre données personnelles et processus d'identification.....	43
5.4	Fusionner moteur de recherche, système expert et Machine Learning dans un outil dédié au système judiciaire	43
5.5	Encadrements de thèses en cours et à venir.....	44
5.5.1	E-learning et parcours d'apprentissage	44
5.5.2	Bases de données dialogiques	44
5.5.3	Les hétérotopies et les bases de données territoriales	44
6	Bibliographie.....	45
6.1	Bibliographie générale.....	45
6.2	Bibliographie personnelle.....	53
7	Annexes.....	59
7.1	Annexe A : Hétérotopies et intelligence territoriale.....	61
7.2	Annexe B : Hétérochronies et temporalités dans les systèmes de e-learning.....	123
7.3	Annexe C : Hiérarchies, hétérarchies et données personnelles I.....	131
7.4	Annexe D : Hiérarchies, hétérarchies et données personnelles II	147

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier très chaleureusement le Professeur Francis Rousseaux qui a accepté d'être garant de ce travail d'habilitation. Il m'a permis de parcourir avec lui, sur divers rivages et dans différentes baies, les frontières que dessinent les dernières avancées de l'intelligence artificielle et des humanités numériques.

Je remercie Monsieur le Professeur Michael Krajecki, directeur du Centre de Recherche en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (CRéSTIC) pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie les trois rapporteurs pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire mais aussi pour avoir fait tous les trois un long voyage et être venus respectivement de Bruxelles, Londres et Montréal afin de débattre pendant quelques heures des frontières de l'intelligence artificielle collective et de ses réalisations techniques : Monsieur le Professeur Hugues Bersini, directeur de l'Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle (IRIDIA) de l'Université Libre de Bruxelles, Monsieur le Professeur Frédéric Fol Leymarie du Department of Computing au Goldsmiths College, University of London et Monsieur le Professeur Jean-Guy Meunier du département de l'Université du Québec à Montréal.

Je remercie Monsieur le Professeur Daniel Andler, directeur du laboratoire Sciences, normes, décision (SND) de l'Université Paris-Sorbonne qui a toujours soutenu avec beaucoup de bienveillance les travaux en informatique et en intelligence artificielle que je menais dans son laboratoire.

Je remercie Madame Danièle Bourcier, directrice de recherche émérite au CERSA de l'Université Panthéon-Assas avec laquelle nous avons eu de nombreuses discussions sur les articulations entre l'informatique et le droit et les obstacles particuliers liés à l'application de l'intelligence artificielle à la décision du juge.

Je remercie Monsieur le Professeur François Pellegrini, du Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI) de l'Université de Bordeaux d'avoir accepté de participer à ce jury et y apporter les éclairages particuliers dont il dispose grâce à sa double compétence en informatique et en droit.

Je remercie Eddie Soulier de l'Université de Technologie de Troyes avec lequel nous avons eu de très nombreuses discussions sur les agencements et l'intelligence territoriale.

Je remercie Rémi Jardat et ses longues discussions sur les possibilités d'identifier automatiquement les structures sous-jacentes aux comportements sociaux.

Je remercie aussi les jeunes apprentis chercheurs ou chercheurs plus chevronnés que j'ai encadrés ces dernières années : Guillaume, Yann, Valérie, Barbara, Sonia, Margaux, Virginie, Rémi, Emmanuel, Dalila, Etienne et tous les étudiants de masters qui m'ont beaucoup apporté par les questions qu'ils se posent et nous posent également.

Il est difficile de remercier tous ceux qui ont accompagné professionnellement une vingtaine d'années d'une vie consacrée à l'enseignement et la recherche : étudiants, collègues, que ceux qui ne sont pas cités ne se sentent pas offensés mais au contraire remerciés pour les échanges et les discussions que nous avons pu avoir ensemble.

Je remercie également mes amis et ma famille, Ghislaine, Félicien, Octave et Léon qui doivent parfois supporter avec patience mes sautes d'humeur pour toutes les questions qui se posent à moi et auxquelles je ne trouve pas de réponse.

Mes pensées vont enfin vers Georges Molinié et Pascal Arrigo qui nous ont quitté et qui ont, chacun à leur manière accompagné la maturation de ce travail.

Résumé

Ce mémoire d'habilitation présente l'état de mes travaux sur l'ingénierie des connaissances pour traiter de l'hétérogénéité des données issues de systèmes sociaux.

Mes travaux ont d'abord porté sur des algorithmes d'apprentissage, puis sur des systèmes d'agents en co-évolution avant que je ne modélise et ne simule des systèmes plus sophistiqués d'acteurs sous la forme de modèles spatiaux à trois niveaux correspondant à des phénomènes sociaux réels comme la mobilisation de masse en RDA en 1989. Ces recherches étaient réalisées en coordination avec Wolf-Dieter Eberwein, spécialiste en Sciences Politiques.

Cette modélisation m'a amené à identifier le concept d'hétérarchie pour modéliser des systèmes hétérogènes multi-agents et multi-niveaux.

J'ai également utilisé cette notion d'hétérarchie pour concevoir des modèles d'évolution du système juridique de gestion des données personnelles.

Toujours dans le cadre de l'étude des hétérogénéités des données issues de systèmes sociaux j'ai ensuite travaillé avec Francis Rousseaux et Eddie Soulier sur des modèles d'ingénierie des connaissances s'appuyant sur l'intelligence territoriale et l'hétérogénéité des lieux, les hétérotopies.

Ces travaux se poursuivent avec Francis Rousseaux et Jean Petit, un doctorant nouvellement inscrit.

Mes travaux les plus récents avec Francis Rousseaux et Guillaume Blot, un doctorant que j'encadre, portent sur les hétérogénéités temporelles constatées lors de parcours de contenus de connaissance accessibles en e-learning.

Ces recherches sur les systèmes multi-agents présentant différentes formes d'hétérogénéités m'ont amené à les replacer dans le contexte des systèmes plus classiques d'intelligence artificielle construits sur les capacités rationnelles individuelles des agents.

Je dégage dans ce mémoire la notion d'altérité radicale qui fédère ces travaux sur les systèmes multi-agents hétérogènes et produit des données elles-mêmes hétérogènes pour des systèmes d'agents.

Pour cette hétérogénéité je propose des familles d'opérateurs et je présente brièvement quelques-unes de leurs propriétés.

J'indique enfin des travaux qui pourront faire l'objet de sujets de thèses à venir ou qui sont déjà en cours de traitement par des doctorants et qui mettent en jeu différentes formes d'hétérogénéité présentées ici.

Mots clés

Systemes multi-agents, Gestion des connaissances, Modeles, Systemes complexes adaptatifs, Agrégation de données hétérogènes, Intelligence artificielle, Altérité radicale, Opérateurs d'altérité, Agents cognitifs, Réseau social, Ontologies, Humanités numériques

Introduction

Dans ce travail nous présentons le contexte et la trajectoire de recherche dans laquelle nous analysons comment étendre l'intelligence artificielle en y intégrant l'altérité radicale, dégageant ainsi le projet qui dirige nos travaux.

Pour cela nous présentons tout d'abord certains principes qui sous-tendent l'intelligence artificielle ayant comme objectif de concevoir et d'élaborer des systèmes de connaissance centrés sur les capacités rationnelles d'un individu isolé puis en relation avec un ou quelques autres individus.

Dans un second temps nous montrons que les modélisations récentes de l'intelligence s'appuient parfois sur une intelligence systémique collective mais qui porte dans ce cas sur des individus généralement simplifiés à l'extrême.

Nous présentons ensuite les concepts sur lesquels nous nous appuyons pour élaborer des outils et des méthodes plus sophistiqués permettant de concevoir et d'étudier des systèmes de connaissance collective plus élaborés tenant compte autant que possible, de l'altérité radicale.

Nous dégageons à cette occasion, certaines des difficultés, des enjeux, des limites et des outils permettant de concevoir des systèmes de connaissance artificiels portés par des collectivités sophistiquées d'individus radicalement hétérogènes.

Dans ce travail, nous abordons l'informatique, les systèmes d'information et de connaissance, non pas seulement tels qu'ils sont incarnés ou matérialisés, mais tels qu'ils pourraient l'être, *in abstracto*. Nous ne sommes pas éloignés de ce point de vue, de l'approche de l'algorithmique qui en est faite par Donald Knuth (Knuth, 2011b B1, pp. 1- 3) : « *Ma façon favorite de décrire l'informatique est de dire que c'est l'étude des algorithmes. [...] Il peut arriver que la technologie s'essouffle un jour, disons dans 25 ans, et que les ordinateurs changent alors très peu. Il n'y a pas de signe avant-coureur d'une technologie stable dans le futur proche¹, bien au contraire, mais je crois que l'étude des algorithmes restera un défi important même si les autres phénomènes relatifs aux ordinateurs peuvent un jour être complètement explorés.* »

En l'occurrence nous nous intéressons dans notre travail à l'intelligence artificielle et aux systèmes de connaissance étendus à l'altérité radicale, sans réduire notre démarche aux ordinateurs et aux systèmes d'information artificiels existants.

Cette démarche va dans le sens d'une prise en compte de la culture comme élément constitutif de la connaissance. La connaissance que l'intelligence artificielle prend en compte est alors constitutive non seulement d'un phénomène individuel, mais aussi, tenant compte de la culture, d'un phénomène collectif, systémique, intersubjectif et social.

¹ Le texte original de Knuth date de 1973 avec une reproduction avec ajouts qui date de 1974.

1 Une intelligence artificielle centrée sur les systèmes individuels de connaissance

1.1 *L'intelligence artificielle élaborée sur les vestiges de l'étude des formalismes*

Il convient de rappeler que le programme de l'intelligence artificielle s'est d'abord élaboré sur les vestiges de l'étude des formalismes.

Alan Turing et John von Neumann sont les précurseurs de ce programme ((Ramunni 1989 B1), (Goldstine, 1972 B1) et (Saurel, 1996a B2)).

Leurs travaux s'appuient eux-mêmes sur le programme de Hilbert et la volonté qu'en matière de connaissance, rien ne puisse échapper au scientifique qui s'appuie sur la méthode formaliste. En réponse au pessimisme de Paul du Bois-Reymond, Hilbert affirme en effet, dans une allocution radio-diffusée de 1930 : *« qu'il n'y a pas d'ignorabimus en mathématiques, [...] nous devons savoir, nous saurons. »*

Hilbert n'a pas encore connaissance des limites intrinsèques des formalismes telles qu'elles se déduisent des résultats de Gödel (Gödel, 1931 B1).

Comme l'analyse Daniel Andler (Andler, 1998 B1), en partant de l'étude des possibilités des machines (Turing, 1936-1937 B1) et des limites intrinsèques des formalismes (Gödel, 1931 B1), Turing (Turing, 1950 B1) va définir un programme de recherche pour les possibilités de réalisation des machines, que l'on peut identifier au programme de recherche de l'intelligence artificielle : *« L'un des effets de l'article de 1950 était de montrer que contrairement à d'anciens préjugés, le domaine de la machine s'étendait potentiellement bien au-delà de l'exécution de tâches « mécaniques » — au sens de « stupides », n'impliquant ni pensée ni volonté —, et de manière concomitante que le formalisme concernait bien plus que la pure pensée mathématique ; Turing annonçait ainsi rien de moins que le programme de ce qui allait prendre quelques années plus tard le nom d'« intelligence artificielle ». »*

Ces travaux vont dans un premier temps permettre de définir une architecture pour les ordinateurs ((von Neumann 1945 B1) et (Burks, Goldstine et von Neumann, 1946-47 B1)), cette architecture étant encore celle sur laquelle sont élaborés les ordinateurs actuels (Bersini, Spinette-Rose M.-P. et R., 2008 B1).

Les travaux encyclopédiques de Donald Knuth (Knuth, 2014 B1) sur l'algorithmique et l'art de la programmation des ordinateurs s'appuient principalement sur cette architecture des ordinateurs et sur la construction logique de ces automates généraux issus des limites du programme de Hilbert.

Cette trajectoire dans l'exploitation des possibilités des machines liée principalement à l'ordinateur comme outil isolé de calcul est corroborée par les travaux actuels des historiens. On pourra noter par exemple les résultats des investigations approfondies menées par Pierre-Eric Mounier-Kuhn qui note à plusieurs reprises la mise à l'écart de la cybernétique et de l'élargissement du périmètre de l'informatique associé à ce terme (Mounier-Kuhn, 2010, B1 p. 571) : *« tandis que l'informatique obtient sa reconnaissance officielle dans les instances académiques, associée ensuite dans le cadre du CNRS à l'automatique, à l'analyse des systèmes et au traitement du signal, les aspects « sciences humaines et sociales » de l'ancienne cybernétique refont surface sous deux formes nouvelles : les sciences cognitives et*

les sciences de l'information et de la communication. Seules l'intelligence artificielle et la « systémique » (elle-même avatar de la recherche opérationnelle) font passerelles entre ces champs scientifiques séparés. Simultanément, des fragments de l'analyse des systèmes et diverses techniques informatiques entrent dans la constitution des « sciences de gestion », permettant à celles-ci de se différencier de l'économie ».

1.2 L'intelligence artificielle centrée sur les capacités rationnelles individuelles

S'appuyant ainsi sur les capacités calculatoires des machines, l'intelligence artificielle s'est naturellement construite sur une définition fonctionnelle de l'intelligence compatible avec ce que l'on pouvait attendre de ces machines.

L'intelligence artificielle s'est centrée, voire s'est essentiellement concentrée sur la rationalité individuelle humaine en essayant de la mimer au moyen de dispositifs artificiels tout en s'interrogeant sur les liens entre le calcul par l'homme et la machine (Mc Culloch, 1961 B1).

On retrouve cela dans les projets industriels et dans la constitution de l'informatique comme science (Mounier-Kuhn, 2010 B1) et dans les programmes de recherche ou de recherche-développement, comme ceux de l'INRIA pour lequel les projets, comme le projet GEMO (connaissances distribuées sur le web) (Beltran et Griset, 2007 B1) qui étudient des productions de connaissance qui ne sont pas centrés sur une machine individuelle sont l'exception.

L'intelligence artificielle que peut produire une machine isolée prend la forme de challenges pour ingénieurs. Parmi les situations les plus étudiées, emblématiques de l'intelligence humaine que la machine va chercher à reproduire ou à dépasser, on trouve tout d'abord la résolution de problèmes (Laurière, 1986 B1) et les jeux ; et notamment les jeux pour lesquels les situations sont fermées, comme le jeu d'échec (Samuel, 1957, B1).

L'image retenue est que la logique des automates (von Neumann, 1951 B1) reproduit celle d'un cerveau artificiel dont les fonctionnalités seraient recrées artificiellement (von Neumann, 1958 B1).

L'ordinateur est alors exploité dans un premier temps pour sa rapidité de calcul et d'exploration de l'ensemble des combinaisons de situations (Knuth, 2011a B1). La machine peut très rapidement parcourir de manière exhaustive l'ensemble des cas possibles dans une situation fermée et envisager, plus vite qu'un humain, la situation optimale considérée sous l'angle d'un critère, défini *a priori*, d'optimisation et d'évaluation des situations.

Marvin Minsky (Minsky, 1961 B1) décrit des étapes d'un programme pour la réalisation d'une intelligence artificielle qu'il considère que rien ne peut arrêter.

Au-delà de la diversité des situations dans lesquelles les dispositifs artificiels peuvent battre les humains dans des compétitions fermées, les ingénieurs explorent les situations pour lesquelles la puissance de calcul peut améliorer les performances et permettre d'élaborer des solutions optimales que les humains n'avaient pas identifiées.

La diversité des dispositifs informatiques réalisés par les ingénieurs a amené des chercheurs comme Herbert Simon et Allen Newell à identifier les éléments permettant de les unifier. Ils s'attachent d'abord à une unification par la simulation du raisonnement humain (Newell et Simon, 1961 B1) réalisée au moyen de l'ordinateur. Mais ils en viennent ensuite, eux aussi, à la capacité de résolution de problèmes posés par les humains (Newell et Simon, 1972 B1).

Herbert Simon, ne se limitant pas à l'informatique *stricto sensu*, a cherché à définir des éléments d'unification de toutes les sciences des systèmes et de l'artificiel (Simon, 1969 et 1996 B1).

1.3 Des fonctionnalités nouvelles pour étendre le champ de l'intelligence artificielle : auto-reproduction, apprentissage, cognition

Pour aller au-delà des limites identifiées pour l'élaboration d'une intelligence artificielle, les chercheurs ont rapidement proposé d'étendre le champ des fonctionnalités à explorer.

Dans un premier temps, cette extension porte principalement sur deux fonctionnalités, celle d'apprentissage et celle d'auto-reproduction des automates.

1.3.1 L'auto-reproduction

Burks a permis la publication en 1966 des travaux de von Neumann sur les fonctions d'auto-reproduction des automates (Burks et von Neumann, 1966 B1).

Burks, qui avait également étudié et conçu l'architecture des nouvelles machines générales avec von Neumann et Goldstine (Burks, Goldstine et von Neumann, 1946-1947 B1) a poursuivi de manière approfondie l'étude des automates auto-reproducteurs.

Les travaux et l'influence de Burks ont sans doute été sous-estimés ((Burks, 1956 B1) et (Burks, Wang et Holland, 1959, B1)).

Non seulement Burks a poursuivi seul les travaux sur les automates auto-reproducteurs (Burks, 1970 B1), mais il a également fait travailler ses étudiants sur ces questions (Holland, 1975 B1).

Christopher Langton, citant Burks, (Langton, Taylor et Farmer, 1991, B1, pp. xiv-xv) insiste sur le fait que l'approche fonctionnelle est parfaitement identifiée aussi bien chez Burks que chez von Neumann (Burks, 1970) : « *Quel type d'organisation logique est suffisante pour qu'un automate s'auto-reproduise ? Cette question n'est pas précise et peut recevoir des réponses triviales tout comme des réponses intéressantes. Von Neuman avait à l'esprit le phénomène naturel et familier de l'auto-reproduction lorsqu'il l'a posé, mais il ne cherchait pas à simuler l'auto-reproduction d'un système naturel au niveau de la génétique et de la biochimie. Il voulait abstraire la forme logique de l'auto-reproduction à partir du problème naturel de l'auto-reproduction* ».

Si Christopher Langton cite les travaux de Burks et l'approche de von Neumann, c'est parce qu'il souhaite suivre la même démarche pour étudier et fonder une vie artificielle. L'étude de la vie artificielle est une autre extension des systèmes artificiels à d'autres fonctionnalités et dans la continuité des travaux sur l'auto-reproduction.

Les fonctionnalités associées à l'auto-reproduction continuent à être explorées sous différentes formes dont notamment celle de l'autopoïèse des individus, des systèmes ou des environnements (Varela, 1989 B1).

1.3.2 L'apprentissage des automates

Wiener identifie et adjoint à la résolution de problèmes et à la capacité de calcul, l'importance de l'apprentissage des machines. C'est notable en particulier lorsque l'on constate que le chapitre supplémentaire que Norbert Wiener ajoute en 1961 à son livre de 1948 porte précisément sur l'apprentissage et les machines auto-reproductrices (Wiener, 1948 B1 pp. 169-180).

Cette absence de prise en compte de l'apprentissage est, selon Daniel Andler (Andler, 1998 B1), une des faiblesses de la démarche de Turing. Cette faiblesse n'est au demeurant non pas une absence de prise en compte du nécessaire apprentissage des machines, mais une sous-estimation de la sophistication nécessaire de cet apprentissage (Andler, 1998 B1) : « là où nous sommes le plus fondés aujourd'hui à estimer que Turing s'est égaré, c'est dans l'évaluation de la complexité de l'apprentissage humain, et plus largement des rapports entre l'homme, penseur, organisme, avec l'environnement »

L'extension de l'intelligence artificielle à l'apprentissage et à l'auto-reproduction a permis de sophistication des modalités selon lesquelles nous concevons l'intelligence artificielle.

Parmi les chercheurs français on peut citer Jacques Pitrat ou Jean-Louis Laurière qui adjoignent très rapidement des modalités systématiques d'apprentissage aux méthodes habituelles calculatoires de l'intelligence artificielle. Pitrat (Pitrat, 1962 B1) catégorise les modalités possibles d'apprentissage avec des machines et Laurière aborde cette fonctionnalité au-delà des systèmes experts dont il développe un des prototypes les plus aboutis (Laurière, 1986 B1).

A titre d'exemple s'agissant de l'apprentissage artificiel, les travaux jusque dans les années 1990 portaient principalement sur des modalités déterministes d'apprentissage. Les algorithmes d'apprentissage étaient souvent d'une part déterministes et d'autre part élaborés à partir de l'observation de l'apprentissage des animaux (Rescorla et Wagner, 1986 B1).

A titre personnel nous avons démontré par exemple la convergence de l'algorithme de Q-learning (Watkins, 1989 B1) pour sa version déterministe (Saurel, 1992 B2), une version des algorithmes d'apprentissage par renforcement comme TD(λ).

Mais au même moment, les principaux chercheurs en matière d'apprentissage par renforcement utilisaient des algorithmes d'apprentissage par renforcement stochastiques ou bayésiens (et donc non déterministes) dont ils démontraient la convergence en probabilité et l'efficacité dans l'apprentissage des systèmes artificiels ((Barto et Sutton, 1998) et (Kaelbling, Littmann et Moore, 1996)).

Cette voie d'exploration de l'intelligence artificielle comme extension de son cœur initial en tenant compte de capacités d'apprentissage a montré son efficacité. Désormais, sous le nom de *Machine Learning*, les algorithmes d'apprentissage artificiel sont principalement stochastiques, bayésiens et non déterministes ((Murphy, 2012), (Flach, 2012), (Cornuejols et Miclet, 2010), et (Russell et Norvig, 2010)), ce qui ne correspondait pas du tout aux intuitions initiales en la matière.

1.3.3 Regards critiques sur l'IA classique et la cognition

Le projet et les enjeux de l'intelligence artificielle deviennent plus clairs (Haugeland, 1985 B1) ainsi que la compréhension de la complexité des situations (Hofstadter, 1985 B1).

Malgré les extensions à l'auto-reproduction et à l'apprentissage, certains chercheurs commencent à identifier des limites et des obstacles au programme de l'intelligence artificielle (Winograd et Florès, 1989 B1) voire en font une critique radicale (Dreyfus, 1984 B1).

Les critiques portent notamment sur l'optimisme des spécialistes de l'IA (Feigenbaum et Mc Corduck, 1984 B1) qui s'appuierait sur des postulats philosophiquement et méthodologiquement intenable aboutissant nécessairement à des résultats techniques ne pouvant pas être à la hauteur des objectifs visés.

Les postulats attaqués par Hubert Dreyfus sont biologique, psychologique, épistémologique et ontologique (Dreyfus, 1984 B1, pp. 191-294).

Hubert Dreyfus considère que l'intelligence ne devrait pas être vue de manière aussi limitée et qu'au contraire il faudrait :

- Tenir compte du rôle du corps dans l'exercice de l'intelligence ;
- Faire en sorte que les conduites intelligentes soient menées sans recours à des règles ou à des règles définies dans l'absolu et extérieures à l'entité douée d'intelligence ;
- Tenir compte des besoins de l'être humain ou de l'être intelligent lorsque l'intelligence est faite de la situation.

Hubert Dreyfus en arrive à la conclusion selon laquelle la machine pour être intelligente devra être capable (Dreyfus, 1984 B1 p. 407) de « *traiter des données vagues (concepts ou ressemblances imprécises), cette machine qui saurait pratiquer un langage naturel et identifier des formes complexes devrait également avoir un corps, afin d'être en situation et de s'y sentir chez elle. [...] Nous pouvons à court terme, tâcher de tirer le meilleur parti d'une coopération homme-machine, et c'est seulement à long terme qu'il est permis d'espérer obtenir, chez des automates qui ne seraient pas – ou pas exclusivement – numériques, ces formes de « traitement de l'information » sans lesquelles nous ne pouvons faire face à notre monde informel.* »

Ces critiques portant sur une intelligence artificielle qui ne pourrait pas aboutir car elle serait trop limitative et ne tiendrait pas compte des conditions de possibilité de l'intelligence humaine, ont été en partie entendues.

La tendance, comme nous l'avons déjà mentionné avec les travaux de Simon sur les sciences de l'artificiel (Simon, 1969 B1), consiste à étendre les modalités de l'intelligence. Cette extension de l'ensemble des modalités d'intelligence se retrouve d'abord dans la systémique (Le Moigne, 1986 B1).

Allen Newell définit une unité des théories de la connaissance au moyen des fonctionnalités qui sont réalisées ou au moins visées par les dispositifs artificiels (Newell, 1990 B1). Cette unité prend en compte désormais la fonction d'apprentissage. Mais elle va bien au-delà puisqu'elle intègre par exemple, le langage, la motivation ou les émotions.

Selon Newell, l'intelligence que doit couvrir la machine est alors définie fonctionnellement comme suit (Newell, 1990 B1, *Introduction* p. 15) :

- « *Areas to be covered by a unified theory of cognition, Fig. 1-5:*
- *Problem solving, decision making, routine action*
 - *Memory, learning, skill*
 - *Perception, motor behavior*
 - *Language*
 - *Motivation, emotion*
 - *Imagining, dreaming, daydreaming, ...* »

Newell s'appuie sur les niveaux d'organisation des systèmes pour définir l'intelligence et notamment le niveau social (le social band) (Newell, 1990 B1 pp. 490-498). Pour Newell (Newell, 1990 B1 p. 90) : « *a system is intelligent to the degree that it approximates a knowledge-level system* ».

Dans le chapitre 8 *Along the Frontiers* (Newell, 1990 B1), Newell fait particulièrement référence aux agents sociaux, à la psychologie sociale avec les travaux de Leon Festinger

(Leon Festinger 1954 Social Comparison Theory) sur la *Social Comparison Theory* et à la cognition sociale (Carroll & Payne, 1976).

Newell inaugure une approche très nettement pluridisciplinaire et caractéristique des sciences cognitives (Andler, 1992 B1).

Pour autant, cette extériorité n'est qu'apparente et les algorithmes opérationnels commencent par la réinternaliser. Des « modèles du monde » et des « modèles des autres agents » sont intégrés aux agents apprenants. Les techniques d'apprentissage et d'apprentissage par renforcement par exemple consistent à reconstruire en interne une représentation du monde extérieur.

La représentation, explicite ou implicite, de l'acte de pensée par un homuncule qui serait intégré au cœur même du cerveau ou des algorithmes d'intelligence artificielle, au risque d'une mise en abyme sans issue, n'est pas écartée. Si nos algorithmes doivent intégrer un modèle réinternalisant l'extérieur, n'y-a-t-il pas ici une forme d'auto-référence ou de récursivité qui risque de faire obstacle à la convergence de l'algorithme ou à la stabilisation de la machine programmée ?

L'approche de la connaissance, avec un environnement simplifié à l'extrême aboutit à une conception quasi-autistique de la connaissance. Les autres sont considérés comme des éléments de l'environnement. Lorsqu'ils sont considérés comme des sujets, ils sont vus comme une projection du sujet intelligent dans un autre corps que le sien.

Les études neurobiologiques n'échappent pas à cette critique, même lorsqu'elles cherchent à intégrer les émotions comme une des formes de l'intelligence (Damasio, 1995 B1) parmi d'autres (Gardner, 2010 B1) ou qu'elles étendent le rôle du cerveau à d'autres fonctions que celle du calcul tout en conservant les hypothèses fonctionnalistes et quasi-localistes qui avaient alimenté l'image selon laquelle le cerveau et l'ordinateur pouvaient présenter des similitudes fonctionnelles (Dehaene, 2014 B1). Nous avons été amenés à expliciter certaines limites de cette approche (Saurel et Hénault, 2001 B2).

La nécessaire prise en compte de l'incorporation (embodiment) a été intégrée dans les travaux qui cherchaient à élaborer un apprentissage artificiel de type *bottom-up* qui ne procéderait pas d'une approche symbolique ((Brooks et Maes, 1994 B1), (Kaelbling, 1993 B1), (Steels et Brooks, 1995) et (Bourgine et Varela, 1992)).

Varela a considéré que la déduction et l'abduction n'étaient pas suffisantes mais que l'enaction devait être prise en compte comme capacité d'intelligence artificielle déterminante ((Varela, 1988) et (Varela, 1989)).

La prise en compte de l'environnement ou de l'écosystème dans lequel l'agent intelligent est intégré prend différentes formes. Les théories de la viabilité (Aubin, 1991 B1) prennent en compte cet environnement. Mais même dans ce cas, les théories proposées représentent l'agent dans son environnement et l'évolution de cet environnement sans attribuer à l'extérieur de cet environnement une situation d'évolution équivalente.

Malgré l'extension des fonctionnalités incluses dans la définition de l'intelligence et l'extension des modalités de raisonnement, il n'en demeure pas moins que l'intelligence artificielle continue à donner à la machine une apparence quasi-autistique.

Pour aller au-delà, il était nécessaire de permettre aux automates de produire ensemble une intelligence collective et de leur permettre aussi de mieux tenir compte de leur environnement et de leur incorporation. Le risque autistique de cette intelligence artificielle n'est pas évacué

tant qu'une ouverture complète de l'intelligence artificielle sur l'altérité radicale n'est pas réalisée.

2 L'intelligence artificielle collective et systémique

2.1 *Jeux, théorie des jeux et modèles multi-agents*

Dans la lignée des modèles d'intelligence artificielle que l'on peut désigner comme classiques, de nombreux systèmes ont été proposés pour qu'une intelligence rationnelle soit capable d'optimiser une situation dans laquelle plusieurs acteurs intervenaient, chacun déployant, autant que possible, l'intégralité des capacités rationnelles possibles.

Sans multiplier les exemples, on peut citer notamment les situations dans lesquelles le système artificiel joue à un jeu, que ce soit contre un humain ou contre d'autres joueurs artificiels. Ont été développés dans ce contexte des joueurs d'échec ou de dame artificiels. Deep Blue, par exemple, a battu en 1997 le champion du monde d'échec Garry Kasparov (Hsu, 2002 B1). Dans le film de Stanley Kubrik, *2001 : l'odyssée de l'espace*, l'ordinateur de bord de dernière génération Hal-9000 joue également aux échecs avec les humains du vol habité. L'anticipation du choix rationnel du joueur humain est alors réalisée par la machine qui explore tout ou partie des coups possibles ou probables avant de fixer son choix. Mais cette anticipation peut aussi intervenir dans une situation paradoxale comme celle proposée dans le cadre du dilemme du prisonnier. Cette situation peut soit être réalisée entre un humaine et une machine soit entre deux machines.

La théorie des jeux, qui prend son origine dès les travaux de 1944, de Morgenstern et von Neumann ((Morgenstern et von Neumann, 1944 B1) et (Von Neumann, 1928 B1)) et même chez Emile Borel ((Borel, Ville et al., 1938 B1) et (Borel, 1921 B1)), étudie spécifiquement ces situations pour lesquelles plusieurs acteurs rationnels anticipent les comportements des autres acteurs pour décider d'un choix qui sera ensuite connu, immédiatement ou non, des autres acteurs et les influencera également pour l'étape temporelle suivante.

Ces modèles multi-agents se sont particulièrement développés avec la possibilité de simuler numériquement sur des ordinateurs communs des situations pour lesquelles chaque acteur peut décider d'une stratégie comportementale.

Le développement des langages objets a grandement simplifié la programmation de ces simulations.

De fait les modèles multi-agents sont généralement des systèmes qui permettent d'étudier des confrontations de stratégies mais qui ne constituent pas une modélisation sophistiquée de chaque acteur individuel. Dit autrement les agents ainsi modélisés ne sont en rien réalistes au regard de la complexité des êtres humains rationnels. Les modèles multi-agents sont pertinents pour restituer un jeu multi-acteurs définissant chacun une stratégie qui lui est propre. Ils ne prétendent en revanche pas constituer, pour chaque agent, un modèle sophistiqué de l'agent pris individuellement. Ces modèles s'intéressent à la dynamique des interactions entre agents, sans prétendre à une modélisation sophistiquée ou réaliste des agents individuels.

2.2 *L'intelligence en essaim et l'émergence*

Pour autant ces modèles ont donné lieu à des travaux nombreux car certains systèmes avaient un comportement collectif qui ne pouvait pas être immédiatement déduit du comportement unitaire de chacun des individus.

Ces propriétés collaboratives des individus qui composent le groupe, qu'aucun agent du groupe, seul, n'avait anticipées ou n'aurait pu réaliser et qui semblent donc émergentes ont donné lieu à de très nombreuses simulations (Forrest, 1992 B1).

Lorsque cette émergence apparente est une propriété du groupe, l'intelligence correspondante est dite collective (Bonabeau et Théraulaz, 1994 B1). Cette intelligence collective a été en particulier étudiée pour des colonies de fourmis et plus généralement d'insectes dont certains comportements sont ceux de la ruche ou de l'essaim plus que celui des individus.

Dans certains cas les solutions ainsi obtenues sont également optimales et renvoient à des modes de résolution de problèmes inattendus comme par exemple pour le positionnement idéal d'oiseaux ou de particules (algorithmes d'optimisation par essaim particulière) (Kennedy et Eberhart, 1995 B1).

Les modalités d'auto-organisation donnent une forme d'intelligence au groupe.

Les propriétés d'émergence constatées amènent naturellement à faire un rapprochement avec les modèles de physique et notamment de physique statistique pour lesquels des propriétés d'émergence ont été démontrées ou ont été constatées et sont en accord avec les observations des phénomènes modélisés. Nous avons étudié de manière très systématique ces types de modèles comme le modèle d'Ising (Saurel, 1997 B2) et ses liens avec les états critiques auto-organisés et les milieux désordonnés (Bourgine et Saurel, 1993 B2).

Pour autant ces modèles d'émergence ne fonctionnent correctement et ne sont étudiables que lorsque les éléments qui composent le collectif sont très nombreux et que le nombre de paramètres qui modélise chaque individu est faible.

Toujours dans le même cadre, mais sans émergence, des modèles de co-évolution de population ont été étudiés et simulés. On peut retrouver là encore plusieurs approches. Soit des approches qui constituent des modélisations simplifiées de phénomènes, soit des techniques d'optimisation soit encore des méthodes abstraites d'étude de phénomènes logiques *per se*.

Cette dernière méthode est celle qui a été suivie par exemple par les travaux de type Artificial Life que nous avons déjà cités (Langton, Taylor et Farmer, 1991 B1). Les travaux autour de la co-évolution de systèmes ou de programmes ont été très étudiés pour analyser notamment les liens avec la frontière du chaos mathématique (Kauffman et Johnsen, 1991 B1). Toujours avec cette approche, Langton a établi des liens entre le calcul au bord du chaos, les transitions de phase et le calcul émergent (Langton, 1990 B1). Nous avons également contribué à ce type de travaux (Bourgine, Bonabeau et Saurel, 1994 B2) en établissant des liens entre la co-évolution, les cascades d'événements (avalanches) et les états critiques auto-organisés.

Pour autant si ces modèles sont étudiés exclusivement sous l'angle de la simulation, ce qui est souvent le cas en pratique, des problèmes méthodologiques se posent pour ceux qui souhaitent réaliser une modélisation du système social simulé (Saurel, 1998b B2). Les questions de méthodologie qui se posent en cette matière s'agissant de rendre compte d'un phénomène complexe comme l'intelligence ou le cerveau, au moyen de modèles d'émergence et de simulation de ces modèles, constituent une ligne importante de mon travail de doctorat (Saurel, 1998a B2).

S'agissant enfin des outils d'optimisation on y retrouve notamment la suite des travaux sur l'auto-reproduction (Burks, 1970 B1) et l'adaptation (Holland, 1975 B1). Ces travaux et notamment ceux de Holland, vont donner lieu à la création des algorithmes génétiques qui constituent aussi un outil d'optimisation (Goldberg, 1989 B1) qui sera étudié et utilisé de

manière systématique notamment pour réaliser du *Machine Learning* lorsque l'on souhaite trouver des solutions optimales en explorant l'espace des possibles par hybridation et notamment par hybridation de programmes (Koza, 1990 B1).

2.3 Les modèles distribués de systèmes sociaux

Au-delà des systèmes multi-agents et de l'intelligence collective, on peut également essayer de modéliser et simuler une intelligence collective pour laquelle les agents sont eux-mêmes modélisés soigneusement à partir de données recueillies par des spécialistes du phénomène social correspondant.

C'est ce que nous avons réalisé avec Wolf-Dieter Eberwein.

Les travaux correspondants ont été publiés dans quelques documents et articles ((Saurel, 1998a, Chapitre 4 B2), (Eberwein et Saurel, 1995a B2) et (Eberwein et Saurel, 1995b B2)).

Ces travaux portent sur la modélisation et la simulation du mouvement de masse révolutionnaire en RDA en 1989 qui correspond à la chute du mur de Berlin.

Les simulations ont été réalisées en Smalltalk, la programmation objet facilitant ce type de simulations.

Les données ont été recueillies par Wolf-Dieter Eberwein et ses étudiants, dont c'est la spécialité en sciences politiques.

Nous avons conservé les contraintes des systèmes multi-agents et les propriétés d'émergence de l'intelligence en essaim mais nous avons en plus modélisé des agents qui avaient des comportements individuels en adéquation avec les observations des spécialistes de sciences politiques.

Nous ne rentrerons pas ici dans les détails du modèle et des résultats obtenus.

Nous en avons tiré plusieurs enseignements.

Tout d'abord nous avons réalisé une modélisation d'agents qui restaient extrêmement simplistes avec une demi-douzaine de paramètres environ pour le modèle et deux ou trois pour l'agent et sa catégorie. Un nombre de paramètres de cet ordre de grandeur est suffisant pour les catégorisations de ce type de phénomènes. Nous avons essayé de réduire les plages de valeurs que pouvaient prendre les paramètres et nous avons fait en sorte que ces valeurs soient discrètes et éventuellement finies dès que la continuité et le nombre infini de valeurs possibles ne paraissait pas un élément nécessaire au plan théorique.

Rapidement nous avons constaté par une interaction entre les essais de modélisation et de simulation et la réflexion sur les aspects théoriques, qu'un paramètre global (paramètre de champ) était nécessaire pour qu'apparaissent des boucles de rétroaction qui stabilisent ou dirigent le fonctionnement global du système. Ceci fait écho non seulement aux résultats sur l'émergence et les systèmes auto-organisés mais aussi aux travaux précurseurs de la cybernétique (Wiener, 1948 B1). En l'occurrence le paramètre de champ était lié à la radio libre ouest-allemande, interdite en RDA mais qui était écoutée et permettait aux allemands de l'est et donc aux manifestants, de disposer d'une connaissance globale quant au niveau des manifestations dans le pays.

Le modèle que nous avons proposé était le seul à l'époque qui rendait compte des aspects spatiaux du phénomène dynamique correspondant.

Le modèle comportait trois niveaux hiérarchiques : les individus, les villes et le pays.

Le résultat le plus important selon moi, est d'avoir constaté qu'avec trois niveaux et une demi-douzaine de paramètres, le modèle est déjà d'une complexité telle qu'il est possible de faire apparaître des transitions de phase presque à la demande.

Ces transitions de phase sont la forme d'intelligence collective, extension de la rationalité des décisions individuelles des agents.

Nous avons également mené d'autres travaux sur des agents sociaux en l'espèce en matière d'expertise judiciaire en informatique, pour lesquels nous avons constaté des jeux d'acteurs c'est-à-dire qu'après avoir défini une catégorisation de rôle et une structure des systèmes de rôle dans la lignée structuraliste, on constate que certains agents vont à tour de rôle changer de rôle pour prendre celui de l'adversaire d'un jour ((Saurel et Jardat, 2009 B2) et (Jardat et Saurel, 2011 B2)).

L'expertise judiciaire en informatique est un système social particulièrement intéressant et que nous avons beaucoup étudié en détail du point de vue des phénomènes avant de le modéliser ou de le simuler. Ce domaine social est hétérogène. Il comporte des spécialistes des règles du droit civil et de la procédure civile et des spécialistes de l'informatique, ces deux domaines de règles étant particulièrement étanches alors même que le juge et l'expert sont contraints, par la loi, de dialoguer pour que la solution du litige soit jugée.

3 Connaissance et altérité radicale pour l'intelligence artificielle : ce que cela fait d'être une chauve-souris

Une des limites de l'approche suivie par les développements en intelligence artificielle consiste à avoir tenu compte de manière limitée des interactions sociales et des éléments interindividuels dans la conception des systèmes artificiels.

Les systèmes que nous avons décrits précédemment tiennent compte progressivement et sous différentes formes des interactions, de l'environnement ou des éco-systèmes.

Dès 1974, dans un article fondateur et particulièrement commenté, Thomas Nagel (Nagel, 1974 B1) va interroger le sens que peut prendre la notion d'esprit dans la machine. Il interroge le lecteur en lui demandant s'il peut avoir une idée une seule seconde des sensations que l'on peut éprouver à être radicalement autre que soi et en l'occurrence à être une chauve-souris (*what is it like to be a bat?*).

Il n'est pas anodin que cette interrogation sur la nature de l'autre et ses liens avec l'intelligence artificielle soit le fait d'un professeur de droit dont les travaux ultérieurs porteront notamment sur les questions liées à la répartition des richesses et leurs modalités dans un système pour lequel les règles sont non définies de manière interne à ce système (Nagel, 1994 B1).

Les critiques et les limites de la possibilité que l'esprit vienne aux machines ont été poursuivies et nous avons déjà mentionné les travaux de Dreyfus à titre d'exemple dans cette direction (Dreyfus, 1984 B1). Margaret Boden a regroupé une partie des textes fondateurs traitant de ce débat (Boden, 1990 B1). La question posée par Nagel est de savoir, s'agissant des machines, comment on peut imaginer ce qu'est être autre à soi-même. La machine en est un exemple ne se sachant pas machine et qui devrait se comporter comme un homme intelligent, à savoir un autre que soi.

Pour autant la question posée par Nagel est aussi de savoir comment concevoir des machines intelligentes qui tiennent compte du fait que les altérités radicales au mode de fonctionnement intelligent humain (les chauve-souris en l'occurrence) sont également des formes d'intelligence différente avec lesquelles nous sommes susceptibles d'interagir dont notamment sous la forme de la compassion ou de l'empathie consistant à se plonger par la pensée dans un autre que soi pour l'éprouver dans son entièreté (en l'occurrence un homme dans une chauve-souris).

Ces modalités de fonctionnement intersubjectives sont essentielles selon le juriste pour une intelligence sociale effective (Nagel, 1994 B1) alors qu'elles ne sont pas prises en compte dans le projet d'intelligence artificielle décrié ironiquement par Nagel (Nagel, 1974 B1).

Pour prendre la mesure de ce qui est ici écarté, encore convient-il d'identifier en quoi les contenus sociaux et les éléments culturels sont susceptibles d'avoir une influence déterminante et de fait structurelle sur les systèmes artificiels conçus.

A cet effet nous proposons de présenter quelques éléments de ce que nous désignons ici comme altérité radicale.

L'altérité radicale consiste en ce que deux entités, systèmes ou individus sont d'une nature telle que l'une ne peut pas être réduite à l'autre sans que quelque chose de déterminant dans son mode de fonctionnement ne soit écarté.

Nous en présentons quelques exemples.

Nous commencerons à rencontrer ici les concepts pertinents dans le cadre de l'altérité radicale (hétérotopie, hétérochronie, hétérarchie) qui nous guident par la suite pour instrumenter et concevoir des systèmes artificiels en ingénierie des connaissances de systèmes sociaux de données hétérogènes.

3.1 Diversité de l'altérité radicale

Nous mentionnerons ici quatre exemples d'altérité radicale pour montrer la diversité des formes qu'elle peut prendre.

Dans le cadre de précédents travaux (Saurel, 1998a B2, pp. 315-333) nous avons déjà été amenés à détailler une diversité de certains éléments cérébraux dont nous considérons qu'ils entrent dans ce que nous appelons ici altérité radicale.

3.1.1 L'altérité radicale vue par l'anthropologie

L'anthropologie est un lieu dans le cadre duquel l'interrogation sur l'altérité au sein d'autres cultures est au cœur même du projet scientifique.

L'anthropologie va d'abord identifier et décrire cette altérité en utilisant différentes méthodes qui *in fine* ont pour objet de ne pas réduire l'altérité observée par le regard du sujet observant cette altérité.

Après avoir décrit cette altérité, l'anthropologie peut chercher à en décrire les dynamiques internes et les structures.

Cette recherche peut prendre la forme de l'identification des structures qui assurent le fonctionnement de la filiation, de la transmission des connaissances ou de la parenté (Lévi-Strauss, 1949 B1).

L'anthropologie recherche alors au-delà des altérités radicales constatées, si des structures sous-jacentes permettent d'identifier des invariants.

En l'occurrence Claude Lévi-Strauss identifie avec l'aide d'André Weil des invariants de groupe alors même que les modalités de parenté sont en apparence d'une forme radicalement différente.

Ce qui signifie que lorsque des invariants sont mis à jour les altérités radicales sont rapprochées sur le fond d'une structure commune qui les relie même lorsque les situations observées font apparaître une altérité radicale persistante.

Cette attention portée par l'anthropologie sur l'altérité, même si elle est centrée sur l'homme et les systèmes sociaux dans lesquels il s'insère, porte également sur les relations entre humains et non-humains, chaque culture attribuant des rôles particuliers et des catégorisations ontologiques notamment au sein des non humains entre les êtres vivants ou artificiels, qui ne sont pas nécessairement ceux que nous attribuons dans notre société contemporaine industrielle.

Dans nos travaux sur l'altérité radicale relative à la constitution de systèmes de connaissance en matière d'intelligence territoriale pour des systèmes hétérogènes de données issues de territoires vus par des groupes sociaux, nous nous sommes appuyés notamment sur les catégorisations de Philippe Descola ((Descola 2005 B1) et (Descola 2014 B1)) en quatre grandes familles de cultures (animisme, totémisme, naturalisme et analogisme) qui organisent notamment les relations sociales entre les humains et les non-humains.

Cette catégorisation d'altérités radicales par Philippe Descola nous a été particulièrement utile pour rendre compte de territoires comme ceux du Grand cul de sac marin en Guadeloupe (Rousseaux, Saurel et Petit, 2014, B2 et Annexe A).

3.1.2 Paul Feyerabend et l'incommensurabilité des théories scientifiques,

Paul Feyerabend a longuement défini puis étudié les problématiques posées par l'incommensurabilité des théories scientifiques.

Paul Feyerabend pose le problème pour la première fois dans sa thèse de 1951. Ce problème sera repris dans un article de 1958 (Feyerabend, 1958 B1) mais il le traitera et l'approfondira régulièrement comme par exemple dans son livre synthèse de 1978 (Feyerabend, 1978 B1).

Cette notion d'incommensurabilité des théories sera en particulier reprise et discutée par Thomas Kuhn (Kuhn, 1962 B1).

L'incommensurabilité des théories scientifiques selon Kuhn et Feyerabend ont été comparées (Oberheim et Hoyningen-Huene, 2013 B1) même si elles paraissent incompatibles l'une avec l'autre.

Rejetant les approches pragmatiques et phénoménologiques des théories, Feyerabend interprète les langages d'observation par les théories qui expliquent ce que nous observons. De telles interprétations changent dès que les théories changent. Feyerabend réalise alors que les interprétations de ce genre rendent impossible l'établissement de relations déductives entre des théories rivales. Feyerabend a alors cherché à établir des comparaisons entre théories scientifiques indépendantes de ces relations.

Cette démarche aboutit chez Feyerabend à la notion d'incommensurabilité entre théories lorsqu'il cherche à spécifier (Feyerabend, 1958 B1) les conditions selon lesquelles deux théories du même domaine sont déductivement disjointes.

L'incommensurabilité de certaines théories scientifiques peut paraître constituer un obstacle à la mise en œuvre d'une connaissance objective et scientifique.

Il n'en est rien selon Feyerabend, bien au contraire.

Feyerabend va plus loin encore et considère que (Feyerabend, 1979, p. 46) : *« l'unanimité dans l'opinion peut convenir à une Eglise, aux victimes terrorisées ou ambitieuses de quelque mythe (ancien ou moderne) ou aux adeptes faibles et soumis de quelque tyran. Mais la variété des opinions est indispensable à une connaissance objective. Et une méthode qui encourage la variété est aussi la seule méthode compatible avec des idées humanistes ».*

L'altérité et l'altérité radicale prennent ici la forme des théories et des systèmes d'idées qu'elles articulent et qui ne peuvent pas être réduites l'une à l'autre.

3.1.3 John von Neumann et les deux mécaniques : refondation axiomatique de la mécanique quantique

Deux approches de la mécanique quantique radicalement opposées et dont tout laisse à penser qu'elles sont incompatibles se font face au début des années 1930 lorsque John von Neumann cherche à en proposer une approche et un fondement axiomatiques.

Les objets quantiques, d'un point de vue phénoménologique se présentent soit sous une forme corpusculaire soit sous une forme ondulatoire. Or la physique depuis le milieu du XIX^{ème} siècle oppose ondes et corpuscules. Les ondes relèvent des lois de l'électro-magnétique (Maxwell) alors que les corpuscules relèvent de la mécanique. Les formalismes permettant de

rendre compte de ces deux domaines de la physique sont à l'opposé l'un de l'autre tout comme la matière qui fonde ces deux domaines relève pour les contemporains de deux parties du monde qui sont d'une nature hétérogène.

John von Neumann a conscience de cette hétérogénéité entre les théories qui se complètent en rendant compte des phénomènes observés, rapprochées par Dirac et Jordan dans une théorie nouvelle dont il va parachever le fondement (von Neumann, 1932 B1 pp. 4-5 de la traduction française) : « [...] Il n'existait pas, à l'époque dont nous parlons, une théorie physico-mathématique des quanta, rendant compte de tous les faits connus, envisagés d'un point de vue unique. [...] Malgré ses tendances à l'universalité, [...] l'ancienne théorie des quanta manquait totalement d'un ensemble homogène de conceptions fondamentales et d'une méthode unitaire de calcul. [...] Born, Heisenberg et Jordan, et peu après Dirac, purent développer une idée de Heisenberg et en déduire une nouvelle théorie des quanta, la première théorie quantique complète que la Physique ait jamais connue. [...] Parti d'un point de vue tout à fait différent, Schrödinger découvrit un peu plus tard la « mécanique ondulatoire », qui pouvait rendre les mêmes services et qui se trouva être équivalente, (au moins du point de vue mathématique) à la théorie de Heisenberg, Born, Jordan et Dirac. [...] Dirac et Jordan réussirent à fondre ensemble les deux théories en une seule. [...] au moins pouvons-nous dire maintenant qu'il existe une discipline applicable à tous les cas, dans laquelle les lois de quanta trouvent automatiquement leur place et qui rend compte d'une façon satisfaisante de la plus grande partie des résultats expérimentaux connus. »

Une des formes du rapprochement de ces deux théories dont les conceptions sont fondamentalement opposées consiste donc en la création d'une nouvelle théorie, autre, et qui pourra, au-delà de ces oppositions, rendre compte « de la plus grande partie des résultats expérimentaux connus » et, en l'espèce, être axiomatiquement fondée ou sinon proposer une cohérence globale scientifiquement satisfaisante.

Il en est de même pour les systèmes d'information ou de connaissances en général pour lesquels, lorsque deux d'entre eux sont essentiellement hétérogènes, une des possibilités consiste à en constituer un troisième dont les concepts constitutifs et les formes normatives ne seront ni ceux du premier ni ceux du deuxième mais ceux d'un troisième, à définir, et qui pourra intégrer suffisamment les éléments dont le premier et le deuxième système rendent compte (en terme de données et de processus par exemple).

L'altérité et l'altérité radicale prennent ici la forme de deux théories scientifiques opposées qui ne peuvent pas être réduites l'une à l'autre et pour lesquelles en l'occurrence une nouvelle axiomatique va être proposée qui rendra compte « d'une façon satisfaisante de la plus grande partie des résultats expérimentaux connus » (von Neumann, 1932 B1).

3.1.4 Hétérogénéité des systèmes de normes

Le droit comme exemple de système de normes n'est pas à proprement parler un système formel. Il comporte en son sein des ensembles de systèmes de règles différentes dont le nombre est particulièrement élevé et évolue tous les jours.

Nous avons déjà été amenés à étudier les ensembles de systèmes de règles formelles et ses différentes formalisations sous forme notamment de systèmes d'automates (Saurel, 1996b B2).

Mais avec le droit les systèmes de règles associés sont sans pareil actuellement dans l'univers des systèmes formels et de l'informatique.

Certains juristes ne s'y sont pas trompé et ont depuis longtemps pris le droit comme terrain de mise en œuvre de l'intelligence artificielle. Danièle Bourcier, avec d'autres (Bourcier et Bench-Capon, 2012 B1) a tracé les grandes étapes des exemples d'application de l'intelligence artificielle au droit.

Les théoriciens du droit eux-mêmes ont repris certaines des idées de l'intelligence artificielle pour l'appliquer à l'interprétation du système juridique. On peut citer à titre d'exemple les travaux sur le flou du droit (Delmas-Marty, 1986 B1) qui interviennent au moment où la logique floue prend son essor ou encore les travaux sur le droit comme système autopoïétique (Teubner, 1993 B1), en référence aux travaux sur l'auto-poïèse. L'étude des modalités temporelles dans lesquelles s'inscrit le droit ont fait également l'objet de travaux spécifiques (Ost, 1999 B1) que l'on peut là encore rapprocher des travaux sur les modalités temporelles et notamment de causalité que l'on retrouve dans les travaux sur les machines et l'intelligence artificielle.

L'univers juridique est un système d'une grande densité de règles qui comporte non seulement des règles mais aussi des règles indiquant comment les règles doivent être appliquées (les règles de procédure) et des instances d'application des règles (les juridictions).

Entre systèmes juridiques nationaux, on trouve des points communs et des influences réciproques, mais aussi des différences dont certaines peuvent être radicales de sorte que ce qui est interdit dans un système de droit peut être obligatoire dans l'autre. On peut citer à titre d'exemple la collecte de données relatives par exemple à la religion ou à l'origine ethnique qui sont très encadrées et en général interdites en France et en Europe alors qu'elles sont non seulement autorisées mais même parfois obligatoires aux Etats-Unis par exemple lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre en pratique le principe de discrimination positive.

Dans un système juridique donné, cet ensemble est hétérogène mais les théoriciens du droit ont identifié des principes organisateurs de ces règles.

Il convient tout d'abord de citer les principes qui organisent les normes dans une hiérarchie dite pyramidale, les règles les plus abstraites étant au sommet de cette pyramide et les règles d'interprétation ou de précision se trouvant de plus en plus bas au sein de cette pyramide. Kelsen est le théoricien qui a le plus systématiquement développé cette idée (Kelsen, 1962, B1).

Les règles sont alors ordonnées dans un grand ensemble au sein de chaque grand système de droit national.

Il n'en demeure pas moins qu'au sein de chaque système de droit, les dynamiques et les relations entre règles sont d'une extrême sophistication et même présentent les caractéristiques attribuées aux systèmes complexes (Bourcier, Boulet et Mazzega, 2010 B1).

Au-delà des sophistications des relations entre règles et des dynamiques d'évolution se pose également celle de l'applicabilité effective de ces règles par le juge et plus généralement par toute instance dont le rôle au sein de ce système consiste à arrêter une décision en rendant un jugement qui tranche une situation conflictuelle entre deux positions opposées et toutes deux rationnellement argumentées et cohérentes.

Ronal Dworkin (Dworkin, 1994) et Chaïm Perelman (Perelman et Olbrechts-Tyteca, 1958) ont, chacun à leur manière, montré que ce gigantesque système de règles articulées nécessitait aussi des modalités d'interprétation, la sémantique d'ensemble n'étant pas suffisante pour déterminer les solutions d'application des règles dans les situations suffisamment sophistiquées.

Au sein de chaque système juridique national on peut identifier des îlots de rationalités hétérogènes.

C'est le cas notamment de l'articulation rencontrée, en particulier dans le système judiciaire français, lors des expertises judiciaires et notablement lors des expertises judiciaires en informatique.

Les systèmes de règles juridiques entrecroisent des compétences juridiques qui sont entre les mains du juge et des compétences techniques, notamment en informatique qui sont entre les mains de l'expert judiciaire en informatique.

L'ensemble est un système hétérogène qui, de loin, paraît décomposé en deux grands ensembles, l'un juridique et l'autre technique (informatique), mais dont les entrecroisements sont dans la pratique beaucoup plus sophistiqués et reliés les uns aux autres.

Nous avons procédé pendant une dizaine d'années à un travail important et approfondi d'étude des modalités selon lesquelles le système judiciaire français tient compte des connaissances techniques en informatique.

Ce sont notamment des règles de gouvernance qui s'inscrivent au plus bas niveau de la hiérarchie des normes qui vont détailler les modalités pratiques de pilotage de l'articulation entre les règles de droit et les compétences techniques de l'expert ((Saurel et Charpentier, 2006a B2), (Saurel et Charpentier, 2006b B2), (Saurel et Pétrone, 2006c B2) et (Saurel, 2008 B2)).

On peut pointer à cette occasion les problématiques de mise en abyme (et de récursivité) qui apparaissent dans ces questions. Par exemple les contrats d'intégration informatique comportent des Plans Assurance Qualité (PAQ) en annexe, mêlant et organisant les relations entre les équipes techniques et les obligations juridiques (Saurel et Pétrone, 2006a B2), relations que le juge et l'expert devront analyser avec leurs compétences juridique et technique respectives. Les expertises dans l'expertise ou après l'expertise sont possibles et pratiquées, seuls le temps et les moyens financiers et techniques étant susceptibles de limiter l'inventivité de l'exploitation des règles procédurales articulant informatique et droit. Nous avons déjà pointé que ces situations aboutissent à des relations d'acteurs dynamiques et d'échanges de rôles notamment ((Saurel et Jardat, 2009 B2) et (Jardat et Saurel, 2011 B2)).

L'hétérogénéité du système de normes apparaît également au lieu de la confrontation entre systèmes juridiques nationaux différents.

C'est cette hétérogénéité qui est particulièrement pointée par les théoriciens du droit comme Mireille Delmas-Marty. Elle utilise à ce propos le terme de pluralisme.

Mireille Delmas-Marty précise comment entre l'un et le multiple, diverses formes de pluralisme juridique sont actuellement en jeu (Delmas-Marty, 2006a B1, pp. 7-38). Elle montre notamment que les systèmes juridiques divers ne peuvent pas s'ignorer en cherchant à rester autonomes, l'autonomie étant illusoire selon elle (Delmas-Marty, 2006a B1 pp. 20-25). Bien au contraire Mireille Delmas-Marty montre que ces systèmes juridiques sont en interactions (Delmas-Marty, 2006b B1).

Ces interactions, par exemple au niveau européen, réorganisent par fertilisations communes les éventuelles pyramides de normes des systèmes de règles nationales et mettent en place des organisations de règles qui semblent désormais davantage en réseaux (Bernardi, 2004 B1).

Au niveau international entre grands ensembles juridiques, ces interactions des systèmes de règles oscillent entre plusieurs modalités dont on ne sait si l'une va l'emporter ou si tout

simplement les dynamiques ne vont pas simplement se poursuivre sans que l'une ou l'autre ne devienne dominante.

Martine Delmas-Marty emploie le terme de pluralisme ordonné (Delmas-Marty, 2006a, B1) tout en souhaitant qu'un droit commun international minimal se mette en place notamment en matière de droits de l'homme.

Au sein de cette dynamique des systèmes de normes et de ce pluralisme ordonné, Martine Delmas – Marty identifie à tout le moins trois types d'interactions inter-systèmes :

- La coordination par entrecroisements (Delmas-Marty, 2006a, B1 pp. 39-68) ;
- L'harmonisation par rapprochement comme intégration imparfaite (Delmas-Marty, 2006a, B1 pp. 69-99) ;
- L'unification par hybridation sous trois formes de transplantation, d'hybridation ou d'unification (Delmas-Marty, 2006a, B1 pp. 101-129).

L'altérité et l'altérité radicale prennent ici la forme de deux ou plusieurs systèmes de normes qui ne peuvent pas être réduits l'un à l'autre et pour lesquels des dynamiques d'interactions entre systèmes sont à l'œuvre en plus des dynamiques internes propres à chacun de ces systèmes de normes.

3.2 Cinq observations sur l'élaboration de systèmes de connaissance artificiels tenant compte de l'altérité radicale

Nous identifions cinq points particuliers à relever pour des systèmes de connaissance artificiels tenant compte de l'altérité radicale.

3.2.1 La volonté d'englober la totalité des systèmes de connaissance

Nous avons déjà indiqué que l'ambition initiale et fondatrice de l'intelligence artificielle s'appuie sur le programme de Hilbert qui avait lui-même pour ambition une connaissance totale s'appuyant sur la méthodologie axiomatique.

Il serait erroné de croire que les limites théoriques d'une connaissance totale par la méthode axiomatique freine les meneurs de l'intelligence artificielle qui continuent à poursuivre l'objectif consistant à mettre en place une intelligence artificielle capable non seulement de remplacer l'intelligence humaine mais aussi de se substituer, de compléter ou d'appréhender toutes les formes d'intelligence.

Or l'altérité radicale est le support d'une des formes de l'intelligence, à savoir l'intelligence interpersonnelle ou sociale dont une des manifestations est la capacité d'empathie, de coopération ou de tolérance avec des tiers (Gardner, 2010 B1).

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle doit tenir compte des éléments portés par la diversité du groupe. Nous avons vu que cette altérité peut prendre différentes formes dont des groupes de systèmes axiomatiques (ou de programmes).

3.2.2 L'impossible isomorphisme universel

Un des moyens d'écarter l'altérité consiste à ne retenir qu'un ou quelques modèles prototypes auxquels les autres systèmes axiomatiques peuvent être ramenés.

Lorsque plusieurs systèmes logiques présentent les mêmes caractéristiques fonctionnelles, il est habituel de les ramener, à un isomorphisme près, au représentant prototype de la classe.

Nous avons démontré dans le cadre des espaces de Hilbert (Saurel, 1998a B2, pp. 337-338), que cette méthode d'utilisation des isomorphismes présente des difficultés car elle contraint, dès que l'on a trois espaces différents mais isomorphes, à exhiber ces isomorphismes, ce qui n'est que rarement possible.

Dit autrement, lorsque l'on sait qu'un système logique correspond à une classe on peut se contenter d'étudier cette classe.

Mais dès que deux systèmes logiques différents appartiennent à une même classe et correspondent au même prototype, il est nécessaire d'exhiber la transformation qui permet de s'y ramener. En dehors des cas triviaux d'identité, cela nécessite d'exhiber les transformations qui permettent de s'y ramener.

Or ces transformations seront en général différentes et si l'on veut tenir compte du système global comportant à la fois les deux systèmes, aucune de ces deux transformations ne permettra, en l'appliquant à cet ensemble, de le ramener au prototype.

Il n'existe ainsi pas d'isomorphisme universel et dès que nous souhaitons travailler ensemble sur plusieurs systèmes différents, même si leur fonctionnement est isomorphiquement identique, le fait de souhaiter les étudier ensemble ne permet plus de se contenter d'analyser le système prototype qui les représente.

Là encore cela signifie que nous devons être capables de développer une forme d'intelligence artificielle qui tienne compte de la diversité des systèmes, lesquels, quoique fonctionnant de la même manière, devraient être étudiés ensemble comme un tout.

3.2.3 Les illusions de l'intégration de l'altérité réduite

Une des manières intuitives et simples de tenir compte de l'altérité consiste à la réduire puis à l'intégrer.

Soit un système d'intelligence artificielle S (système axiomatique ou formel par exemple). On suppose que, vu de ce système on constate une altérité A (radicale ou non). La première étape consiste à la mettre au format, c'est-à-dire à en retenir (par exemple sous forme d'un modèle) des éléments qui peuvent tous être exprimés dans S . Cette première étape, de mise au format, peut être considérée comme une réduction car elle laisse de côté tous les éléments de l'altérité qui précisément n'entraient pas dans cette mise au format.

La deuxième étape consiste à adjoindre à S les éléments de l'altérité après mise au format. Cette deuxième étape est celle que nous appelons intégration.

Formellement l'altérité a ainsi été intégrée dans le système S .

Dans les faits, cette intégration après réduction ne tient pas compte des éléments qui n'ont pas été conservés au moment de la mise au format. Il s'agit de fait d'une négation de ce qui faisait l'altérité de A du point de vue de S .

Cette intégration n'est donc pas satisfaisante en ce qu'il s'agit non pas d'une prise en compte de ce qui fait l'altérité de A pour S qui permettrait effectivement d'étendre S en tenant compte de l'altérité de A , mais seulement d'un recadrage et d'une mise au format de A .

3.2.4 La complexité des systèmes à trois niveaux

Nous avons constaté en modélisant puis en simulant un système à trois niveaux d'éléments issus de systèmes sociaux ((Eberwein et Saurel, 1995a B2) et (Eberwein et Saurel, 1995b B2)) que dès que l'on atteint trois niveaux hiérarchiques (individus, groupes et champ global par

exemple) et même avec un nombre restreint de paramètres, on peut voir apparaître des transitions de phase presque pilotables.

En terme de modélisations et de simulations cela a pour conséquence que nous devons réduire *a minima* nos modèles et nos simulations si nous voulons pouvoir les étudier et qu'en tout état de cause il ne faut pas intégrer dans le modèle plus de trois niveaux faute de quoi on verrait apparaître dans la simulation des transitions de phase et donc des niveaux de complexité supplémentaires non nécessairement maîtrisés ou sollicités.

Cette situation amène à réaliser des choix lorsque nous définissons nos modèles et nos systèmes de connaissance. Si nous souhaitons pouvoir étudier leurs simulations nous devons réduire le nombre de paramètres.

Mais dans ce cas nous ne pouvons pas facilement modéliser et simuler des situations simples pour lesquelles les agents seraient de types très variés.

Nous sommes dans de tels cas, contraints de faire un compromis entre la volonté de simuler l'altérité et la volonté de l'analyser.

3.2.5 Les limites gödeliennes à la connaissance totale : systèmes axiomatiques dérivés hétérogènes

Les systèmes axiomatiques sont le socle minimal de l'intelligence artificielle, socle qui ne recouvre pas nécessairement l'intelligence humaine.

Or les théorèmes de Gödel nous indiquent que tout système axiomatique A (suffisamment puissant) permet d'énoncer dans A des propositions indécidables, par exemple P.

Dérivons de A et P deux systèmes axiomatiques A_0 et A_1 . Considérons A_0 et A_1 deux systèmes axiomatiques dérivés de A avec A_0 qui est constitué du système axiomatique A auquel on a adjoint la proposition P considérée comme vraie et A_1 auquel on a adjoint la proposition P considérée comme fausse.

Réitérons le procédé. Il s'agit pour A_0 de dériver A_0 à partir d'une proposition indécidable P_0 et A_1 avec une proposition indécidable P_1 .

On obtient des axiomatiques que nous notons désormais respectivement A_{00} et A_{01} pour celles dérivées de A_0 et A_{10} et A_{11} pour celles dérivées de A_1 .

Itérons cette opération de dérivation un nombre fini mais élevé de fois à partir de A. On va obtenir des systèmes axiomatiques dérivés dont nous savons que pris deux à deux ils comportent au moins une proposition qui les contredit mais qui peuvent même être très différents l'un de l'autre compte tenu de toutes les propositions qui peuvent être déduites dans chacun de ces systèmes et qui sont liées d'une part aux propositions qui sont contredites de l'un à l'autre et d'autre part aux propositions qui sont la conséquence d'une décision réalisée dans un système et qui n'a pas nécessairement le même statut dans l'autre.

Dans le cas que nous venons de décrire les axiomatiques comportent toutes un socle commun A, ce qui n'est pas toujours le cas des relations entre deux axiomatiques.

Un système d'intelligence artificiel tenant compte des altérités radicales devrait être capable d'anticiper non seulement les possibilités dans un espace axiomatique donné mais également tenir compte des possibilités qui pourraient découler des dérivations d'axiomatiques que nous venons de décrire.

Ce système d'intelligence artificielle devrait ainsi tenir compte de cette forme d'altérité.

Les théoriciens du droit ont intégré les conséquences de ces théorèmes.

Cornu par exemple (Cornu, 2005 B1) identifie ce qu'il appelle la tragédie des trois C, à savoir que dans un système de normes suffisamment complexe, on doit renoncer soit à la complétude soit à la cohérence.

4 Concepts, modèles et outils pour une intelligence artificielle tenant compte de l'altérité radicale

Nous présentons ici quelques concepts, modèles et outils permettant de tenir compte de l'altérité radicale en ingénierie des connaissances.

4.1 Opérateurs d'altérité

Nous présentons tout d'abord des opérateurs d'altérité qui sont selon nous un moyen abstrait d'identifier les compositions possibles entre systèmes de connaissance radicalement autres entre eux.

Les questions posées portent notamment sur les possibilités de composition des systèmes axiomatiques susceptibles d'être autres voire incompatibles, par exemple si des propositions indécidables ont été décidées comme vraies dans un système axiomatique dérivé et comme fausses dans l'autre.

Avec ces opérateurs dont nous décrivons ici quelques propriétés nous nous interrogeons sur la possibilité d'une grammaire des systèmes axiomatiques (et donc de connaissance) qui résulterait par exemple des différents modes de composition de ces opérateurs.

4.1.1 Définitions pour les opérateurs d'altérité

Soient deux systèmes axiomatiques A et B dont les axiomes ou règles sont respectivement les a_i et b_i . On note D_A et I_A respectivement l'ensemble des propositions décidables dans A et I_A l'ensemble des propositions indécidables dans A.

Les opérateurs que nous définissons ci-dessous ne sont pas nécessairement uniques et ne définissent pas nécessairement une unique axiomatique comme résultat de leur opération, mais éventuellement une famille d'axiomatiques.

Nous essaierons autant que possible de présenter des exemples de mises en œuvre de ces opérateurs d'altérité, même si ces exemples ne portent pas directement sur des systèmes axiomatiques au sens strict.

Nous précisons d'ores et déjà que les opérateurs définis ci-dessous sont des familles d'opérateurs. Nous utiliserons abusivement le terme d'opérateur au lieu de famille d'opérateurs par souci de simplification de la présentation.

4.1.2 L'opérateur de plongement ou d'implantation

Les opérateurs P de plongement sont des opérateurs (la famille \mathcal{FP} des opérateurs de plongement) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B comporte tous les axiomes de A, toutes les propositions décidables de A qui sont connues comme telles (qui ont déjà été formulées) ainsi que toutes les propositions décidables de B qui sont connues comme telles et qui sont des propositions de A décidables sans être nécessairement connues comme telles.

4.1.3 L'opérateur d'oscillation par alternance

Les opérateurs O d'oscillation sont des opérateurs (la famille \mathcal{FO} des opérateurs d'alternance) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B évolue dynamiquement en boucle entre A et B. C correspond par exemple à A pendant un certain temps puis à B avant de revenir à A.

Nous avons déjà rencontré ces opérations d'oscillation dans le cadre des expertises judiciaires en informatique pour lesquelles les acteurs prenaient alternativement un rôle puis un autre parmi la structure des rôles identifiée ((Saurel et Jardat, 2009 B2) et (Jardat et Saurel, 2011 B2).

4.1.4 L'opérateur d'annihilation

Les opérateurs A d'annihilation sont des opérateurs (la famille $\mathcal{F}A$ des opérateurs d'annihilation) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B correspond soit à A soit à B.

Il s'agit en quelque sorte de ne tenir compte en aucune manière de l'un des deux systèmes.

Typiquement en matière de fusion de deux bases de données, par exemple, dont les champs seraient identiques, cela consisterait dans le cadre d'une reprise de données, à ne prendre systématiquement que les données issues d'une des deux bases sans tenir compte des valeurs présentes dans l'autre base de données.

4.1.5 L'opérateur de collection

Les opérateurs C de collection sont des opérateurs (la famille $\mathcal{F}C$ des opérateurs de collection) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B est telle que les propositions dans A ainsi que les propositions dans B peuvent être formulées comme des propositions dans C. Ceci n'est pas possible pour toutes les axiomatiques.

4.1.6 Les opérateurs d'hybridation

Les opérateurs H d'hybridation sont des opérateurs (la famille $\mathcal{F}H$ des opérateurs d'hybridation) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B comporte un mélange et une hybridation des éléments de A et de B.

Cette opération d'hybridation peut prendre différentes formes.

A tout le moins, C comportera des axiomes et des propositions décidables de D_A ainsi que des axiomes et des propositions décidables de D_B . Rien n'indique que les propositions retenues ne constitueront pas un système C soit dont certaines propositions seront contradictoires soit dont certaines conséquences feront de C un ensemble inconsistant. Dans la pratique, on fera en sorte de modifier C, si nécessaire, et d'évacuer les propositions susceptibles de générer des inconsistances.

On peut citer trois exemples.

Tout d'abord l'hybridation de programmes telle qu'elle a été développée au moyen des algorithmes génétiques ((Holland, 1975), (Goldberg, 1989) et (Koza, 1990)). Les programmes obtenus au fur et à mesure de l'évolution du système sont des hybridations des programmes actifs dans le système.

Ensuite on peut citer les hybridations identifiées dans l'évolution des systèmes de normes. Mireille Delmas-Marty donne de tels exemples (Delmas-Marty, 2006a B1 p. 113) : « *ni le Corpus juris [portant dispositions pénales pour la protection des intérêts financiers de l'UE] ni le statut des TPI [Tribunaux Pénaux Internationaux], puis de la CPI [Cour Pénale Internationale], n'ont vocation à se substituer au droit national ; ils sont destinés à entrer dans un jeu plus complexe d'interactions où l'harmonisation et les entrecroisements horizontaux ont aussi leur rôle, démontrant que l'hybridation est un processus non linéaire et que la figure qui en résulte (celle de l'hybride) n'est pas la figure parfaite dessinée par le peintre, mais une forme composite et instable* ».

On peut également citer le mode de fonctionnement du Tribunal Pénal International pour l'ex-Yougoslavie (TPIY) dont les règles de procédure et d'administration de la preuve étaient un subtil mélange idiosyncratique entre les règles des juridictions anglo-saxonnes et celles du droit continental mélangeant procédure accusatoire et procédure inquisitoire (Saurel, 2000 B2). Ce dosage avait pour conséquence de fixer les règles mais de ne pas connaître les conséquences nécessaires de la juxtaposition des règles définies, contraignant le TPIY à gérer de très nombreux incidents de procédure consistant à trancher des situations indécises du fait de l'hybridation définie.

4.1.7 Les opérateurs de refondation

Les opérateurs R de refondation sont des opérateurs (la famille \mathcal{FR} des opérateurs de refondation) pour lesquels l'axiomatique C issue de la confrontation des deux systèmes A et B est totalement distincte de A et de B.

Potentiellement C peut être tel que les propositions formulées dans C ne sont ni des propositions dans A ni des propositions dans B.

Un exemple d'un tel opérateur de refondation est l'opération qui a permis à von Neumann de formuler l'axiomatique de la mécanique quantique à partir des formulations antérieures (von Neumann, 1932 B1). Dans cette nouvelle axiomatique, le spectre par exemple est l'ensemble des valeurs propres des opérateurs définis dans un espace de Hilbert. Ce spectre, tel que défini peut comporter à la fois un sous-ensemble discret et un sous-ensemble continu.

Les axiomatiques antérieures ne permettaient pas ces formulations lesquelles sont rendues possibles par la nouvelle axiomatique.

4.1.8 Les opérateurs d'étrangeté

Les opérateurs E d'étrangeté sont des opérateurs (la famille \mathcal{FE} des opérateurs d'étrangeté) qui permettent à un système A d'identifier que le système B comporte des éléments d'altérité radicale à A.

La composition d'un opérateur de choix après un opérateur d'étrangeté permet d'identifier un sous-système de B qui comporte une altérité radicale pour A.

L'opérateur d'étrangeté peut consister par exemple à constater qu'une proposition ou un axiome de B ne peut pas être formulé dans A.

4.1.9 Les opérateurs de choix

Les opérateurs de choix X sont des opérateurs (la famille \mathcal{FX} des opérateurs de choix) qui permettent de procéder, pour un système A, à l'identification soit d'un de ses sous-systèmes soit d'un sous-système de B.

L'opérateur de choix permet par exemple de saisir une proposition ou un axiome de A.

Un opérateur de choix peut permettre également d'identifier et d'isoler une proposition de B parmi celles qui ne peuvent pas être des propositions que l'on peut formuler dans A.

Cet opérateur est particulièrement utile si les systèmes A et B sont tels que de nombreuses propositions formulables dans B ne le sont pas dans A.

4.1.10 Les opérateurs de trace

Les opérateurs T de trace dans A sont des opérateurs (la famille \mathcal{TA} des opérateurs de trace dans A) qui permettent de conserver les modifications d'un système A.

La composition des opérateurs d'altérité sur un système A peut avoir pour conséquence de modifier ce système. C'est le cas par exemple des opérateurs d'hybridation. Après hybridation de A et B, C est un système distinct. Les opérateurs de trace permettent d'adjoindre, à un système A (comme sous une forme de produit \otimes), A ou un de ses sous-systèmes, permettant de créer une sorte de système produit qui peut conserver les états successifs de A aux côtés de son état courant.

4.1.11 Les opérateurs de fermeture

Les opérateurs F de fermeture ou d'isolement sont des opérateurs (la famille \mathcal{F} des opérateurs de fermeture) qui permettent à un système de ne plus tenir compte des influences des systèmes B qui lui sont extérieurs.

Un opérateur de fermeture permet par exemple, en composition après un opérateur d'étrangeté E et de choix X, de ne pas tenir compte pour A de l'étrangeté choisie par X dans B après identification par E.

Les opérateurs de fermeture sont susceptibles d'être normatifs en ce qu'ils permettent à A de ne retenir des interactions avec B que des effets qui sont déjà des propositions de A.

4.2 Propriétés élémentaires des opérateurs d'altérité

Les opérateurs d'altérité ont pour vocation de restituer dans un cadre unique, toutes les interactions pouvant intervenir entre deux systèmes présentant une altérité radicale voire les évolutions de ces systèmes dans le même cadre.

Par construction les opérateurs d'altérité sont donc tels que l'on peut toujours appliquer un opérateur d'altérité après un opérateur d'altérité qui le précède.

Les opérateurs d'altérité sont composables (et donc itérables) sous réserve d'appliquer à ces opérateurs une éventuelle hybridation. Il s'agit d'une hybridation particulière qui a précisément pour vocation de permettre cette composabilité. Le socle de cette hybridation et ce qui dans cette hybridation relève de A ou B mérite sans doute une étude particulière pour chaque relation entre systèmes.

Au sein de la famille des opérateurs d'hybridation, l'identité est un élément neutre pour la composition des opérateurs.

La composition des opérateurs d'altérité, notée \bullet , est associative.

La composition des opérateurs d'altérité est en générale non commutative.

Au moyen des opérateurs de trace une deuxième opération sur les opérateurs est proposée, celle d'adjonction, notée \otimes .

Nous disposons en conséquence de deux opérations (\bullet et \otimes) sur les opérateurs d'altérité ainsi que d'un élément neutre pour la composition.

Ces deux opérations portent sur des familles d'opérateurs.

Disposant de deux opérations sur un ensemble et d'un élément neutre, des propriétés de structure, de type algébrique peuvent être envisagées comme existantes pour certaines sous-familles des opérateurs d'altérité.

L'étape suivante consiste :

- A étudier les sous-familles pour lesquelles des propriétés algébriques de structures sont identifiées ;
- Inversement, partant d'un type de structure algébrique donné, caractériser l'existence ou non de sous-familles d'opérateurs présentant cette structure.

4.3 Hétérotopies et intelligence territoriale

Le concept d'hétérotopie a été proposé et étudié par Michel Foucault (Foucault, 1967 B1).

Les hétérotopies sont fondamentalement des lieux qui définissent un espace hétérogène à son environnement et pour lequel les règles de fonctionnement sont propres. On peut citer à titre d'exemple le jardin, l'église, l'école, le cimetière, le navire ou le tribunal.

Nous avons mis en place une intelligence territoriale en utilisant le concept d'hétérotopie et les graphes et hypergraphes pour identifier des agencements et des liens entre données hétérogènes associées aux territoires.

Du point de vue des outils, nous avons utilisé la notion mathématique de complexe simplicial pour identifier des agencements au sein des hétérotopies.

La notion de complexe simplicial a été définie par Atkin ((Atkin, 1972 B1), (Atkin, 1974 B1), (Atkin, 1976 B1), (Atkin, 1977 B1) et (Atkin, 1981 B1)) pour identifier des propriétés de structure notamment dans le cadre de relations sociales entre agents.

Fondamentalement la notion de complexe simplicial est construite sur la base d'un hypergraphe (Berge, 1970 B1) pour lequel on étudie dans une sorte d'espace multi-dimensionnel des propriétés qui sont des extensions de propriétés de graphes ((Bollobas, 1978 B1) et (Minoux et Bartnik, 1986 B1)).

Les complexes simpliciaux permettent de mettre en place un algorithme de Q-analyse ((Legrand, 2002 B1) et (Legrand et al. 2012b B2)).

Les complexes simpliciaux et la Q-analyse permettent d'identifier des propriétés de structure des territoires étudiés et plus précisément des structures de données récoltées.

Ces analyses s'inscrivent dans ce que Johnson, qui utilise les hypergraphes et les travaux de Atkin, désigne sous le terme d'hyper-réseaux dans la science des systèmes complexes (Johnson, 2013 B1).

Les agencements obtenus permettent d'identifier des proximités ou des chemins entre entités que les topologies et les métriques naturelles et spatiales n'avaient pas fait apparaître. L'analyse des hypergraphes reliant les données associées à ces lieux, permet de les mettre en évidence.

Les agencements et réorganisations identifiées s'inscrivent comme des exemples de rapprochements entre altérités.

Une illustration autour de l'intelligence territoriale est présentée dans un article en annexe (Annexe A : Rousseaux, Saurel et Petit, 2014 B2).

4.4 Hétérochronies et temporalités dans les systèmes de e-learning

Allen Newell (Newell, 1990 B1) s'appuie sur les échelles de temps pour distinguer des niveaux de complexité des systèmes.

Les échelles de temps, selon les valeurs, définissent des bandes qui correspondent à des niveaux de complexité. Newell n'y recherche pas un mode explicatif particulier mais plutôt une causalité d'ingénierie, les mécanismes les plus complexes étant ceux composés d'éléments dont les latences temporelles sont plus réduites et les déterminent.

Mireille Delmas-Marty élabore quant à elle la notion de polychronie (Delmas-Marty, 2006a B1 pp. 227-254) en se plaçant dans des situations pour lesquelles les temporalités et les échelles de temps ne sont pas trop éloignées.

Dans l'univers du droit du numérique, des temporalités hétérogènes sont déjà à l'œuvre. Les contrats s'échangent désormais sur les plateformes de trading à haute fréquence sur des durées de l'ordre de 10^{-6} secondes. Le e-marketing permet de suivre la navigation des internautes sur des échelles de temps de 10^{-2} secondes permettant de produire des publicités rémanentes qui ne sont pas toujours sollicitées. Les grands acteurs du numérique (GAFA) développent de nouvelles fonctionnalités en environ 6 semaines. Les procédures au fond devant les juridictions spécialisées prennent au moins 18 mois en première instance. Les expertises judiciaires en informatique se déroulent sur environ 30 mois. Les procédures d'appel à Paris prennent environ 30 mois également. Une procédure devant la Cour de cassation se déroule sur environ 18 mois. Une directive ou un règlement européen se préparent pendant environ 5 ans et sont parfois retranscrits en droit national (pour les directives parfois plus de 5 ans après).

Ainsi pour la directive 95/46CE en matière de données personnelles, plus de 10 ans ont été nécessaires pour transposer en droit français cette modification européenne de la loi nationale du 6 janvier 1978. Dans la même matière un procès au fond peut durer près de 10 ans, cette durée se déroulant nécessairement après le vote de la loi. Pendant le même temps les acteurs qui exploitent ces données développent de nouvelles fonctionnalités en moins de 6 semaines.

Entre les 10^{-6} secondes du trading à haute fréquence et les 15 ans du vote d'une loi suivie d'un plein contentieux se déroulent des échelles de temps (facteur 10^{14}) qui justifient d'évoquer des hétérochronies et non pas seulement des polychronies.

L'identification et l'analyse des hétérochronies est un axe que nous développons en matière d'intelligence artificielle et notamment pour les apprentissages.

Nous avons combiné l'analyse de ces temporalités avec les graphes d'utilisation de contenus didactiques mis en ligne sur des plate-formes collaboratives de e-learning.

Dans cette perspective, le « time-graph » constitue une analyse temporelle des interactions dans les graphes et réseaux d'apprentissage d'utilisateurs apprenants chacun à leur rythme et suivant leur propre chemin.

Nous présentons une illustration de cette démarche autour du graphe temporelle d'une plate-forme collaborative d'apprentissage à distance (Annexe B : Blot, Saurel et Rousseaux 2014)

4.5 Hiérarchies, hétérochronies et données personnelles

La notion de hiérarchie au sein des systèmes complexes est un élément essentiel pour Simon (Simon, 1996 B1 pp. 183-216). Il insiste tout particulièrement sur cet aspect dans la troisième édition de son ouvrage *Sciences of the Artificial*.

Cette question de la hiérarchie des organisations est identifiée comme structurelle mais ne doit pas être imposée par le haut ou prédéfinie selon Hubert Dreyfus par exemple (Dreyfus, 1984 B1). Il s'agit pour lui d'un point essentiel et la hiérarchie doit être une conséquence intrinsèque du modèle d'organisation.

Il s'agit naturellement d'une difficulté particulière pour les approches *bottom-up*. Les modèles et les simulations émergentistes ou situationnistes doivent donc non seulement faire apparaître des organisations d'un niveau supérieur mais elles doivent également permettre de faire apparaître des structures au niveau supérieur.

Si l'on combine cette approche structurelle avec des hiérarchies d'une part et le fait que ces structures soient logiquement différentes, d'autre part, nous voyons la nécessité du concept d'hétérarchie.

Nous avons défini cette notion d'hétérarchie dans notre travail sur les structures hiérarchiques hétérogènes nécessaires pour simuler la structure matérielle cérébrale (Saurel, 1998a B2).

Cet exemple lié aux systèmes hétérogènes identifiés et structures en niveaux organisationnels est le premier qui nous a permis de dégager et d'identifier la notion d'altérité radicale ainsi que celle d'opérateur d'altérité dont les effets, dans le cas du cerveau, sont des processus d'interaction entre ces systèmes autres entre eux et qui se préservent comme tels.

Le concept d'hétérarchie est proposé semble-t-il pour la première fois par Mc Culloch (Mc Culloch, 1945) en relation avec la topologie des réseaux de neurones.

Cette notion d'hétérarchie a été reprise dans plusieurs travaux en anthropologie dans la description d'organisations hiérarchiques et hétérogènes (Crumley, 1995 B1).

Nous présentons ici deux illustrations du concept d'hétérarchie à savoir d'une part un modèle hétérarchique du système de gestion des données personnelles (Annexe C : Saurel 2012) et d'autre part une catégorisation des données personnelles (Annexe D : Saurel, Rousseaux et Danger 2014).

5 Conclusion et travaux à venir

Les exemples que nous allons citer ci-dessous, lorsqu'ils sont effectivement programmés, implémentés, mis en œuvre dans une machine, utilisent presque systématiquement les structures de données existantes, ce qui peut paraître en contradiction avec les hypothèses et les principes émis précédemment relativement à l'altérité radicale.

Cette méthodologie de développement est effectivement la plus simple et la plus immédiatement opératoire de sorte que les exemples développés ressortent bien de l'informatique et des sciences du numérique telles qu'elles sont aujourd'hui.

Il ne s'agit là que d'une éventuelle réduction méthodologique de l'altérité radicale.

Mais les réductions possibles sont alors multiples. Partant d'une même situation théorique intégrant plusieurs formes d'altérités, plusieurs réductions sous forme de modèles ou de simulations deviennent possibles.

Ce type de réduction explique que les exemples développés ou à venir puissent relever de structures de données ou de mises en œuvre en apparence éloignés du fait qu'il s'agit là d'instanciations et d'études différenciées des concepts pointés précédemment autour de l'altérité radicale.

5.1 Explorer les opérateurs d'altérité appliqués aux bases de données territoriales accessibles en open data

Nous allons continuer à mener nos travaux de recherche sur les opérateurs d'altérité appliqués aux territoires.

Concrètement, le plus simple consistera à examiner des bases de données territoriales, par exemples celles issues de l'open data et d'identifier les usages qui en sont fait lorsqu'elles sont intégrées à d'autres bases de données issues des mêmes territoires.

Il convient à cet égard de noter que les bases de données publiques en open data sont actuellement directement accessibles sur le site www.data.gouv.fr. Ce portail donne accès à de nombreuses bases de données territoriales accessibles en opendata. Pour autant, s'agissant de données issues de collectes autonomes, elles ne correspondent pas au même modèle de données.

En croisant les bases on doit donc retrouver toutes les difficultés en matière de bases hétérogènes ou comportant un historique de données non maîtrisé : doublons, données incohérentes ou corrompues, formats de données incompatibles avec les flux recherchés, etc.

Les utilisateurs de ces bases de données ne seront pas non plus nécessairement les concepteurs de ces mêmes bases. Les usages qu'ils définiront nécessitent des traitements et des types d'information qui ne sont pas nécessairement celles qui ont été définies dans le modèle de données des bases exploitées.

L'ouverture de ces bases de données en libre accès au public étant récente, de nombreux services seront sans doute proposés prochainement dans le cadre des appels à projets réalisés en particulier par les pouvoirs publics.

Le moment est donc particulièrement bienvenu pour suivre et accompagner les difficultés qui seront rencontrées dans l'alignement et l'exploitation de ces bases hétérogènes en en profitant

pour identifier, parmi les opérateurs d'altérité que nous avons définis, ceux qui seront utilisés et au contraire ceux qui ne le seront pas ainsi que les raisons de ces usages.

Les opérateurs d'altérité décrits ci-dessus permettent dans ce contexte d'étudier les liens entre bases de données hétérogènes. Ils permettent plus précisément de catégoriser les opérations réalisées lorsque des bases de données sont construites à partir de bases de données distinctes.

Nous allons dans ce contexte poursuivre notre étude systématique de l'utilisation des complexes simpliciaux appliqués aux territoires.

Nous avons déjà réalisé des travaux utilisant les complexes simpliciaux appliqués à des bases de données territoriales.

Mais actuellement les calculs ont été réalisés au cas par cas sans avoir programmé un outil systématique de calcul des complexes simpliciaux.

Ces travaux ont déjà été entamés dans une série d'articles et notamment ((Legrand et al. 2012a, B2) et (Legrand et al. 2012b B2)).

Ces articles utilisaient les complexes simpliciaux et la Q-analyse mais ils ne portaient pas spécifiquement sur les problématiques de calcul posées par les algorithmes décrivant les complexes simpliciaux.

Nous allons étudier plus systématiquement les résultats de cette méthode d'agencement en l'appliquant aux bases de données territoriales en libre accès.

Nos travaux à venir vont donc porter ici sur le développement d'un programme permettant de calculer systématiquement, par le biais de la Q-analyse, les agencements possibles pour une base de données territoriale donnée.

5.2 E-learning et parcours d'apprentissage

Les plateformes d'apprentissage sont un des lieux privilégiés permettant d'étudier plus particulièrement les concepts qui guident notre travail et notamment ceux de temporalité.

Dans cet esprit nous étudions actuellement les parcours réalisés par des étudiants sur des plateformes collaboratives déployées dans l'enseignement supérieur.

Cette analyse des traces est réalisée au moyen d'outils développés spécifiquement (time-graphe pour Moodle par exemple (Blot, Saurel et Rousseaux, 2014)).

Nous allons poursuivre cette direction de travail en développant :

- un module Moodle de recommandation de contenus permettant aux apprenants de personnaliser leurs parcours d'apprentissage ;
- une base de donnée catégorisant les contenus déposés sur les plateformes collaboratives en fonction de leur intérêt défini au regard des trajectoires d'apprentissage constatées à partir des parcours des apprenants.

Dans ce contexte, les opérateurs d'altérité permettent par exemple de catégoriser des transformations qui seraient faites sur des contenus de connaissance en ligne qui comporteraient ou non des parties communes ou rapprochables et qui donneraient lieu à la production à partir par exemple de deux séries de contenus de connaissance (deux cours en ligne), d'une troisième série (un troisième cours).

5.3 Travaux sur les liens entre données personnelles et processus d'identification

Dans la lignée des travaux que nous avons menés sur la catégorisation des données personnelles nous allons chercher à identifier des caractéristiques des bases de données anonymisées pour lesquelles des traitements et notamment des traitements de *Machine Learning* permettent une identification des personnes.

Les questions scientifiques posées sont nombreuses :

- Selon quels critères une base de données permet une identification simple ou au contraire est trop complexe ou consiste en une identification trop incertaine ne permettant pas de considérer que la donnée est personnelle au sens de la réglementation européenne ?
- Quelles sont les caractéristiques d'un sous-ensemble de taille maximal au sein du big data qui ne pourrait pas être calculé avec un quelconque algorithme par une machine de Turing pour identifier une personne ?

Là encore les opérateurs d'altérité peuvent nous fournir une grille de lecture. Deux bases de données qui ne permettent pas d'identification peuvent être rapprochées de sorte qu'après rapprochement, des processus permettent une identification de sorte que les données sont désormais personnelles. Le dispositif ainsi mis en place consiste précisément à partir de deux systèmes hétérogènes à procéder à une opération d'altérité qui fournit comme résultat des données personnelles et donc d'une nature autre.

5.4 Fusionner moteur de recherche, système expert et Machine Learning dans un outil dédié au système judiciaire

Nous avons également un projet de développement d'un outil dédié au système judiciaire et en particulier aux formes d'hétérogénéité que nous avons mentionnées ci-dessus.

Selon nous un tel outil pour recouvrir les hétérogénéités mentionnées devrait précisément reprendre une sorte de combinaison d'outils et plus précisément :

- Un moteur de recherche ;
- Un système expert ;
- Et des algorithmes de *Machine Learning*.

Le *Machine Learning* permettrait de procéder à la qualification juridique c'est-à-dire à la proposition d'un choix restreint de règles qui pourrait être appliqué au cas d'espèce.

Le système expert permettrait d'intégrer progressivement les milliers de règles qui seraient progressivement intégrées en mode semi-automatique, des humains spécialistes qualifiant la pertinence des règles correspondantes.

Les opérateurs d'altérité permettraient de donner une grille de lecture des règles progressivement exploitées ou intégrées dans la base de règles parmi l'ensemble des règles possibles dans le dispositif (lois et réglementations).

Un tel système semi-artificiel, permettrait de répondre à des besoins fonctionnels bien identifiés comme la prédictibilité des conséquences de l'insertion de nouvelles règles de loi dans un dispositif normatif existant.

5.5 Encadrements de thèses en cours et à venir

5.5.1 E-learning et parcours d'apprentissage

J'encadre un doctorant depuis novembre 2013 dont les recherches portent sur les systèmes collaboratifs d'apprentissage (e-learning et parcours d'apprentissage). C'est avec cet étudiant que les travaux ont été menés sur l'hétérogénéité de systèmes d'apprentissage et sur le suivi des contenus.

Cet encadrement a donné lieu à la mise en place d'outils développés spécifiquement pour analyser et exploiter les données issues de Moodle sous des formes temporelles et de parcours (time-graph).

Ces travaux donnent lieu à des publications régulières en fonction des avancements et des difficultés rencontrées (voir la bibliographie B2 sur le time-graph).

5.5.2 Bases de données dialogiques

J'encadre un deuxième thésard (Yann Girard), en reprise de thèse, qui travaille actuellement sur des bases de données de dialogues de plusieurs interlocuteurs.

Yann Girard utilise des outils de Machine Learning pour identifier et catégoriser, au sein des dialogues, ce sur quoi les interlocuteurs s'accordent ou non.

Ces travaux devraient donner lieu à publications dans les prochains mois.

5.5.3 Les hétérotopies et les bases de données territoriales

Je souhaite encadrer un troisième thésard pour travailler sur des bases de données territoriales et leurs désynchronisations.

Si nous obtenons le financement pour cela nous souhaitons encadrer un prochain thésard pour travailler sur les bases de données territoriales accessibles en open data.

Comme indiqué ci-dessus un tel sujet permettrait d'explorer les opérateurs d'altérité radicale et d'approfondir leurs propriétés algébriques.

L'idéal pour cet approfondissement serait de pouvoir tester les désynchronisations de bases de données modifiées par des agents intervenant localement comme elles sont constatées dans les territoires. L'idéal serait de simuler ces désynchronisations avec des outils permettant de réaliser du calcul parallèle ou localisé sur ces agents.

6 Bibliographie

Nous proposons ci-dessous deux bibliographies. La première est générale alors que la deuxième est spécifique et reprend exclusivement les publications dont nous sommes auteur ou co-auteur.

La première bibliographie est citée B1 et la deuxième B2, ce qui donne par exemple pour la première bibliographie (Beltran et Griset, 2007 B1).

6.1 Bibliographie générale

- ANDLER Daniel (dir.) (1992) *Introduction aux sciences cognitives*. Paris : Gallimard, Folio essais, 509 p.
- ANDLER Daniel (1998) Turing : pensée du calcul, calcul de la pensée. In Nef Frédéric (dir.) et Vernant Denis (dir.) *Le formalisme en question : le tournant des années 1930*. Paris : Vrin, pp. 13-35.
- ATKIN Ronald Harry (1972) From Cohomology in Physics to Q-connectivity in Social Science. *International Journal of Man-Machines Studies* vol. 4, pp. 341-362
- ATKIN Ronald Harry (1974) *Mathematical Structure in Human Affairs*. London : Heinemann, 212 p.
- ATKIN Ronald Harry (1976) An algebra for Patterns on a Complex II. *International Journal of Man-Machines Studies* vol. 8, pp. 483-498
- ATKIN Ronald Harry (1977) *Combinatorial Connectivities in Social Systems*. Bâle : Birkhäuser Verlag, 241 p.
- ATKIN Ronald Harry (1981) *Multidimensional man*. Londres : Penguin, 196 p.
- AUBIN Jean-Pierre (1991) *Viability Theory*. Boston : Birkhäuser
- BARTO Richard S. et SUTTON Andrew G. (1998) *Reinforcement learning: an introduction*. Cambridge : MIT Press, 322 p.
- BELTRAN Alain et GRISET Pascal (2007) *Histoire d'un pionnier de l'informatique – 40 ans de recherche à l'INRIA*. Paris : EDP Sciences, 287 p.
- BERGE Claude (1970) *Graphes et hypergraphes*. Paris : Dunod, 516 p.
- BERNARDI Alessandro (2004) Entre la pyramide et le réseau : les effets de l'eupéanisation du droit sur le système pénal. *Revue Interdisciplinaire d'Etudes Juridiques RIEJ*, 2004, pp. 1-48
- BERSINI Hugues (2006) *De l'intelligence humaine à l'intelligence artificielle*. Paris : Ellipses, 192 p.
- BERSINI Hugues, SPINETTE-ROSE Marie-Paule, SPINETTE-ROSE Robert (2008) *Les fondements de l'informatique : du bit à l'Internet*. Paris : Vuibert, 342 p.
- BODEN Margaret A. (1990) *The Philosophy of Artificial Intelligence*. Oxford : Oxford University Press, 452 p.
- BOLLOBAS Bela (1978) *Extremal Graph Theory*. Londres : Academic Press, 488 p.
- BONABEAU Eric et THERAULAZ Guy (coordonnateurs) (1994) *Intelligence collective*. Paris : Hermès, 288 p.

- BOREL Emile (1921) La théorie du jeu et les équations intégrales à noyau symétrique. Comptes rendus de l'Académie des sciences, vol. 173, 1921, pp. 1304-1308
- BOREL Emile, VILLE Jean et collaborateurs (1938), Traité du calcul des probabilités et de ses applications, volume IV, 2 : Applications aux jeux de hasard. *Sur la théorie générale des jeux où intervient l'habileté des joueurs*. Paris : Gauthier-Villars, pp. 105-113
- BOURCIER Danièle, BENCH-CAPON Trevor (2012). A history of AI and Law, in fifty papers : 25 years of the International Conference on AI and law. In *Journal of Artificial Intelligence and Law*, Springer
- BOURCIER Danièle, BOULET Romain et MAZZEGA Pierre (éditeurs) (2010) *Politiques publiques et systèmes complexes*. Paris : Hermann, 290 p.
- BOURCIER Danièle et VAN ANDEL Pek (2008) *De la sérendipité dans la science, la technique, l'art et le droit : leçons de l'inattendu*. Chambéry : L'Act Mem, 298 p.
- BOURGINE Paul et VARELA Francisco J. (éd.) (1992) : Introduction. In *Toward a Practice of Autonomous Systems*. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. Cambridge : MIT Press, 534 p. p. xi-xvii
- BROOKS Frederick P. (1975) *The Mythical Man-Month: Essays on Software Engineering*. Addison-Wesley, Reading, 342 p.
- BROOKS Rodney A. et MAES Pattie (éd.) (1994) *Artificial Life IV*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 444 p.
- BURKS Alice Rowe (2003) *Who Invented the Computer? The Legal Battle That Changed Computing History*. Amherst, New York : Prometheus, 415 p.
- BURKS Alice Rowe et BURKS Arthur Walter (1988) *The First Electronic Computer: The Atanasoff Story*. University of Michigan Press, 387 p.
- BURKS Arthur Walter (1956) *The Logic of Fixed and Growing Automata*. Ann Arbor : Engineering Research Institute, University of Michigan, 34 p.
- BURKS Arthur Walter (1970) *Essays on Cellular Automata*. Urbana : University of Illinois Press, 375 p.
- BURKS Arthur Walter et BURKS Alice Rowe (1981) The ENIAC: First General-Purpose Electronic Computer. In *Annals of the History of Computing*, vol. 3, n°4, pp. 310-399
- BURKS Arthur Walter, GOLDSTINE Herman Heine et VON NEUMANN John (1946-1947) *Preliminary Discussion of the Logical Design of an Electronic Computing Instrument*. Boston : The Institute for Advanced Study, 42 p.
- BURKS Arthur Walter et VON NEUMANN John (1966) *Theory of Self-Reproducing automata*. Urbana Illinois : University of Illinois Press, 388 p.
- BURKS Arthur Walter et WANG Hao (1956) *The Logic of Automata*. Ann Arbor : Engineering Research Institute, University of Michigan, 60 p.
- BURKS Arthur Walter, WANG Hao et HOLLAND John (1959) *Application of Logic to the Design of Computing Machines. Final Report*. Ann Arbor : Engineering Research Institute, University of Michigan, 13 p.
- CARD Orson Scott (1987) La voix des morts. *Le cycle d'Ender*, vol. 2. Paris Opta, 464 p.

- CARROLL J.S. and PAYNE J. W. (éd.) *Cognition and Social Behavior*. Hillsdale, New Jersey : Erlbaum
- CHAMOIX Jean-Pierre (1986) *Menaces sur l'ordinateur*. Paris : Seuil, 225 p.
- CORNU J. M. (2005) « Une régulation complète et cohérente dans un monde complexe, la tragédie des 3 C », in *Gouvernance de l'Internet*. coord. F. Massit – Folléa, Vox internet, rapport 2005, MSH, 2006, p. 119
- CORNUEJOLS Antoine et MICLET Laurent (2010) *Apprentissage artificiel : concepts et algorithmes*. Paris : Eyrolles, 2^{ème} édition, 803 p.
- CRUMLEY Carole L. (1995) Heterarchy and the Analysis of Complex Societies. In *Archeological Papers of the American Anthropological Associations*, vol. 6, n°1, pp. 1-5
- DAMASIO Antonio Rosa (1995) *L'erreur de Descartes : la raison des émotions*. Paris : Odile Jacob, 368 p.
- DEHAENE Stanislas (2014) *Le code de la conscience*. Paris : Odile Jacob, 427 p.
- DELAHAYE Jean-Paul (1994) *Information, complexité et hasard*. Paris : Hermès, 275 p.
- DELMAS-MARTY Mireille (1986) *Le flou du droit*. Paris : Presses Universitaires de France, 388 p.
- DELMAS-MARTY Mireille (2006b) Le pluralisme ordonné et les interactions entre ensembles juridiques. *Recueil Dalloz* : Paris : Dalloz, pp. 951-957.
- DELMAS-MARTY Mireille (2006a) Le pluralisme ordonné. *Les forces imaginantes du droit* vol. 2. Paris : Seuil, 305 p.
- DESCOLA Philippe (2005) *Par-delà nature et culture*. Paris : Gallimard, 623 p.
- DESCOLA Philippe (2014) *La composition des mondes*. Entretiens avec Pierre Charbonnier. Paris : Flammarion, 379 p.
- DREYFUS Hubert L. (1984) *Intelligence artificielle – mythes et limites*. Paris : Flammarion, 443 p.
- DWORKIN Ronald (1994) *L'empire du droit*. Paris : Presses Universitaires de France, 468 p.
- FEIGENBAUM Edward et MC CORDUCK Pamela (1984) *La cinquième génération. Le pari de l'intelligence artificielle à l'aube du XX^{ème} siècle*. Paris : Interéditions, 310 p.
- FESTINGER Leon (1954) A theory of social comparison processes. *Human Relations* 1954, vol. 7, pp. 117-140
- FEYERABEND Paul Karl (1958) An attempt at a Realistic Interpretation of Experience, *Proceedings of the Aristotelian Society*, 1957-1958, vol. 58, pp. 143-170
- FEYERABEND Paul Karl (1978) *Science in a Free Society*. Part one incommensurability pp. 65-70, Londres, 1978, NLB, 221 p.
- FEYERABEND Paul Karl (1979) *Contre la méthode. Esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*. Paris : Seuil, 350 p.
- FEYERABEND Paul Karl (2014) *La tyrannie de la science*. Paris : Seuil, 189 p.
- FLACH Peter (2012) *Machine Learning: The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Cambridge : Cambridge University Press, 396 p.

- FORREST Stephanie (ed.) (1991) *Emergent Computation: Self-Organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 452 p.
- FOUCAULT Michel (1967) Des espaces autres. In *Dits et écrits*, Conférence au Cercle d'études architecturales, 1967/03/14, Architecture, Mouvement, Continuité, n°5, pp. 46-49
- GARDNER Howard (2010) *Les formes de l'intelligence*. Paris : Odile Jacob, 480 p.
- GÖDEL Kurt (1931) Über formal unentscheidbare Sätze des Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik* 1931, vol. 38, pp. 173-198
- GOLDBERG David Edward (1989) *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Reading, Massachusetts : Addison Wesley 412 p.
- GOLDSTINE Herman Heine (1972) *The computer: from Pascal to von Neumann*. Princeton, New Jersey : Princeton University Press, 378 p.
- HAUGELAND John (1985) *Artificial Intelligence: The Very Idea*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 302 p.
- HOFSTADTER Douglas (1985) *Gödel Escher Bach : les brins d'une guirlande éternelle*. Paris : Dunod (première édition française Masson, 1985), 2000, 884 p.
- HOLLAND John Henry (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, Michigan : University of Michigan Press, 183 p.
- HSU Feng-Hsiung (2002) *Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion*. Princeton : Princeton University Press, ISBN 0-691-09065-3
- JOHNSON Jeffrey H. (2013) *Hypernetworks in the Science of Complex Systems*. Londres : Imperial College Press
- KAELBLING Leslie Pack, LITTMANN Michael L. et MOORE Andrew W. (1996), « Reinforcement Learning: A Survey ». *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 4, 1996, pp.237-285.
- KAELBLING Leslie Pack (1993) *Learning in Embedded Systems*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 176 p.
- KAUFFMAN S. et JOHNSEN S. (1991) Coevolution to the edge of chaos: coupled fitness landscapes, poised states and coevolutionary avalanches. *Journal of theoretical biology* 1991, vol. 149, pp. 467-505
- KELSEN Hans (1962) *Théorie pure du droit*. Paris : Dalloz, 496 p.
- KENNEDY J. et EBERHART R. (1995) Particle Swarm Optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, IV, pp. 1942-1948
- KNUTH Donald Ervin (2014) *The Art of Computer Programming*. Troisième édition. Quatre volumes (652 p., 764 p., 782 p. et 882 p.). Boston : Addison Wesley
- KNUTH Donald Ervin (2011b) *Algorithmes*. Traduction de Patrick CEGIELSKI. Paris : Société Mathématique de France, 510 p.
- KNUTH Donald Ervin (2011a) *Eléments pour une histoire de l'informatique*. Traduction de Patrick CEGIELSKI. Paris : Société Mathématique de France, 371 p.

- KOZA John R. (1990) *Genetic Programming: a Paradigm for genetically breeding populations of computer programs to solve problems*. Rapport technique STAN-CS-90-1314. Standford, Californie, 127 p.
- KRAJECKI Michael, JAILLET Christophe et BUI Alain (2005) Parallel Tree Search for Combinatorial Problems: a Comparative Study between OpenMP and MPI. In *Studia Informatica Universalis*, vol. 4, n°2, pp. 151-190
- KUHN Thomas Samuel (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago : University of Chicago Press, 264 p.
- LANGTON Christopher (1990) Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation. *Physica D*. 1990, vol. 42, pp. 12-37.
- LANGTON Christopher, TAYLOR Charles, FARMER J. Doyne et RASMUSSEN Steen (1991) *Artificial Life II*. New Jersey : Addisson-Wesley, 880 p.
- LAURIERE Jean-Louis (1986) *Intelligence artificielle. Résolution de problèmes pour l'homme et la machine*. Deuxième édition. Paris : Eyrolles. 467 p.
- LE MOIGNE Jean-Louis (sous la direction de) (1986) *Intelligence des mécanismes, mécanismes de l'intelligence*. Collection : Nouvelle encyclopédie des sciences et des techniques, Paris : Fayard, 367 p.
- LEGRAND Jacky (2002) How far can Q-analysis go into social systems understanding ? *Res-Systemica*, vol. n°2, *Special Issue: Proceedings of the fifth European Systems Science Congress*, October 2002, Crete
- LEVI-STRAUSS Claude (1949) Les structures élémentaires de la parenté. Paris : Presses Universitaires de France, 639 p.
- LEYMARIE Frédéric Fol, APARAJEYA P., MC GILLIVRAY C. (2014) Point-based for Movement Computing. In *ACM International Workshop on Movement and Computing MOCO'14*, (IRCAM : Paris : France, 2014/06/16-17), pp. 31-36
- LEYMARIE Frédéric Fol et KIMIA Benjamin B. (2007) The Media Scaffold of 3D Unorganised Point Clouds, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, février 2007, vol. 29, n°2, pp. 313-330
- LEYMARIE Frédéric Fol et LEVINE M. D. (1990) Skeleton from Snakes. In *Proceedings of the 5th International Conference on Image Analysis and Processing: Progress in Image Analysis and Processing*. Cantoni V. (ed.), Cordella L. P. (ed.), Levialdi S. (ed.) et Sanniti di Baja G. (ed.) (Positano : Italie, 1989/09/20-22). Singapore: World Scientific, 1990, 787 p. pp. 186-193
- MC CULLOCH Warren S. (1945) A heterarchy of values determined by the topology of neural nets. *Bulletin of mathematical Biophysics* 7:89-93, 1945
- MC CULLOCH Warren S. (1961) What is a number, that a man may know it, and a man that he may know a number. *General Semantics Bulletin*, n°26-27, 1961, pp. 7-18
- MEUNIER Jean-Guy (2014) Computers as Cognitive Models of Computers and Vice Versa. *Epistemologia*, XXXVI, pp. 18-36
- MEUNIER Jean-Guy, POIRIER Pierre, DANIS Jean et PAYETTE Nicolas (2012) Theoretical Grounding for Computer Assisted Scholarly Expert Text Reading (CASTR). *New Knowledge Environments Scholarly And Research Communication* vol. 3 n°2 pp. 1-36

- MEUNIER Jean-Guy, BISKRI Ismail et FOREST Dominic (2005) Classification and Categorization in Computer Assisted Reading and Analysis of Texts. In *Handbook on Categorization*. Lefebvre Claire (ed.) et Cohen Henri (ed.). Amsterdam (Pays-Bas) : Elsevier, 1 136 p., pp. 955-978
- MINOUX Michel et BARTNIK Georges (1986) *Graphes, algorithmes et logiciels*. Paris : Dunod, 428 p.
- MINSKY Marvin (1961) Steps toward Artificial Intelligence. *Proceedings of the IRE*, 1961, vol. 49, pp. 8-30
- MORGENSTERN Oskar et VON NEUMANN John (1944) *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton : Princeton University Press, 641 p.
- MOUNIER-KUHN Pierre-Eric (2010) *L'informatique en France – de la seconde guerre mondiale au plan calcul – L'émergence d'une science*. Paris : Presses de l'université Paris-Sorbonne, 718 p.
- MURPHY Kevin P. (2012) *Machine Learning: a Probabilistic Perspective*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 1071 p.
- NAGEL Thomas (1974) What is it like to be a Bat ? *The Philosophical Review* LXXXIII 4 (October 1974): 435-450
- NAGEL Thomas (1994) *Egalité et partialité*. Paris : Presses Universitaires de France, 199 p.
- NEWELL Allen (1990) *Unified Theories of Cognition : The William James Lectures, 1987*. Cambridge, Massachusetts : Harvard University Press, 549 p.
- NEWELL Allen et SIMON Herbert Alexander (1961) Computer Simulation of Human Thinking. *Science*, 1961, vol. 134, pp. 2011-2017
- NEWELL Allen et SIMON Herbert Alexander (1972) *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall
- OBERHEIM Eric et HOYNINGEN-HUENE, Paul (2013) The Incommensurability of Scientific Theories. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Zalta Edward N. (ed.), printemps 2013, 45 p.
- OST François (1999) *Le temps du droit*. Paris : Odile Jacob. 376 p.
- PELLEGRINI François et HER Jun-Ho (2008) Efficient and Scalable Parallel Graph Partitioning. In *5th International Workshop on Parallel Matrix Algorithms and Applications (PMAA'08)* (Neuchâtel (Switzerland), 2008/06/20-22).
- PELLEGRINI François et HER Jun-Ho (2008) Towards Efficient and Scalable Graph Partitioning Methods. In *SIAM Conference on Parallel Processing for Scientific Computing (SIAM'08)* (Atlanta : Georgia (USA), 2008/03/12-14).
- PERELMAN Chaïm et OLBRECHTS-TYTECA Lucie (1988) *Traité de l'argumentation*. 5^{ème} édition 2000. Première édition 1958. Bruxelles : Editions de l'Université de Bruxelles, 734 p.
- PITRAT Jacques (1962) Diverses méthodes d'apprentissage des machines. 2^{ème} congrès de l'*AFCALTI*, 1962, Paris, pp. 209-219
- QUEMENER Myriam (2013) *Cybersociété – entre espoirs et risques*. Paris : L'Harmattan, 241 p.

- RAMUNNI Jérôme (1989) *La physique du calcul. Histoire de l'ordinateur*. Paris : Hachette. 287 p.
- RESCORLA Robert A. et WAGNER Allan R. (1972) A theory of pavlovian conditioning: variations in the effectiveness of reinforcement and non reinforcement. In *Classical Conditioning II: Current Research and Theory*. Black A. (ed.) et Prokosal W. (ed.). New York : Appleton Century Crofts
- ROUSSEAUX Francis (2012) From Alan Turing's Imitation Game to Lifestreaming Attempts. In *International Meeting Turing in Context II, Historical and Contemporary Research in Logic, Computing Machinery and AI*, (Bruxelles (Belgique), 2012/10/10-12)
- ROUSSEAUX Francis (2010) Phenomenological Issues. In *Virtual Reality: Technical Gestures Directed like Virtual Pieces of Performing Art*. Revue Studia UBB, 2010, LV, 3
- ROUSSEAUX Francis (2006) La collection, un lieu privilégié pour penser ensemble singularité et synthèse. *EspacesTemps.net*, février 2006, Paris
- ROUSSEAUX Francis (2005) Parcours chorégraphique dans l'espace a-touristique de la baie de Tunis. *L'espace géographique*, Paris : Belin-Reclus
- ROUSSEAUX Francis et BOILY Lise (2010) Sémiotique des Collections figurales. *Recherches Sémiotiques/Semiotic Inquiry*, janvier 2010
- ROUSSEAUX Francis et BONARDI Alain (2010) Que signifie désormais collectionner ? Collection, reproduction, multiplication, catégorisation à l'heure des arts numériques. *SO MULTIPLES*, janvier 2010
- ROUSSEAUX Francis et PETIT Jean (2014) Une analyse anthropologique des mutations territoriales. *URBIA. Les cahiers du développement urbain durable*. GUINAND Sandra (dir.) et DA CUNHA Antonio (dir.). Neuchâtel (Suisse) : Alphil.
- RUSSELL Stuart et NORVIG Peter (2010) *Intelligence artificielle, traduction française de Artificial Intelligence: a modern approach*, 3^{ème} édition, 2010, Pearson, 1 199 p.
- SAMUEL A. I. (1957) Some studies in Machine Learning using the Game of Checkers. *IBM Journal of Research and Development*, 3, p. 211-219
- SIMON Herbert Alexander (1969, 1996) *The Sciences of the Artificial*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, Third edition 1996 231 p.
- STEELS Luc et BROOKS Rodney Allen (1995) *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Embodied, Situated Agents*. Hillsdale, New Jersey : Laurence Erlbaum Associates, 288 p.
- TEUBNER Gunther (1993) *Le droit, un système autopoïétique*. Paris : Presses Universitaires de France, 296 p.
- TURING Alan Mathison (1936-37) On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society* vol. 42, p. 230-265. Corrections, *ibid.*, vol. 43, 1937, p. 544-546
- TURING Alan Mathison (1950) Computing machinery and intelligence. *Mind Quarterly Review of Psychology and Philosophy*. LIX, 236, p. 433-460
- VARELA Francesco Javier (1988) *Connaître les sciences cognitives. Tendances et perspectives*. Paris : Seuil, 123 p.

- VARELA Francesco Javier (1989) *Autonomie et connaissance, essai sur le vivant*. Paris : Seuil, 247 p.
- VON NEUMANN John (1928b) Die Axiomatisierung der Mengenlehre. *Mathematische Zeitschrift*. 1928, vol. 27, pp. 669-752
- VON NEUMANN John (1928a) Zur Theorie der Gesellschaftspiele. *Mathematische Annalen*. 1928, vol. 100, pp. 295-320
- VON NEUMANN John (1932) *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin, 1932, traduction par Alexandre Proca, Les fondements mathématiques de la mécanique quantique, 1946, Paris : Félix Alcan
- VON NEUMANN John (1945) *First Draft of a Report on the EDVAC*. Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, 43 p.
- VON NEUMANN John (1951) The General and Logical Theory of Automata. In *Cerebral Mechanisms in Behavior – The Hixon Symposium. Pasadena 1948*. Jeffress L. (ed.). New York : John Wiley. pp. 1-31
- VON NEUMANN John (1958) *The Computer and the Brain – The Silliman lectures*. New Haven : Yale University Press, 82 p.
- WATKINS Christopher (1989) *Learning from delayed rewards*. PhD thesis, Université de Cambridge, Angleterre, 234 p.
- WIENER Norbert (1948) *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York : John Wiley and Sons, 194 p.
- WINOGRAD Terry et FLORES Fernand (1989) *L'intelligence artificielle en question*. Paris : Presses universitaires de France, 295 p.

6.2 Bibliographie personnelle

Cette bibliographie reprend les travaux réalisés seuls ou en coopération. Ils sont classés dans l'ordre chronologique inversé de leur publication.

- BLOT Guillaume, SAUREL Pierre et ROUSSEAUX Francis (2014c) Pattern Discovery in E-learning Courses: a Time-based approach. Session spéciale : Adaptive E-learning systems with social interactions. In *International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT'14*, (Metz (France) 2014/11/03-05)
- BLOT Guillaume, ROUSSEAUX Francis et SAUREL Pierre (2014) Time-weighted social network: predict when an item will meet a collector. In *14th International Conference on Innovations for Community Services* (Reims (France), 2014/06/04-06)
- BLOT Guillaume, SAUREL Pierre et ROUSSEAUX Francis (2014b) Analyse et modélisation de la participation et du e-learning au moyen d'outils collaboratifs. *32^{ème} Congrès INFORSID'14 - INFormatique des ORganisations et Systèmes d'Information et de Décision* (Lyon, 2014/05/20-23)
- BLOT Guillaume, SAUREL Pierre et ROUSSEAUX Francis (2014a) Ressource Connectivism in E-Learning Courses Based on an Analytical Time-Graph. In *International Conference on Telecommunications, ICT 2014*, (Lisbonne (Portugal), 2014/05/04-07)
- BOURGINE Paul, BONABEAU Eric et SAUREL Pierre (1994) Coévolution, cascades d'événements et états critiques auto-organisés. In *Conférence Chaos and Society*. University of Québec at Hull (Hull (Canada), 1994/06/01-02)
- BOURGINE Paul et SAUREL Pierre (1993) Etats critiques auto-organisés et milieux désordonnés. *Deuxième Congrès Européen de Systémique CES'93*. (Prague (Tchécoslovaquie), 1993/10/05-08), vol. 2, pp.496-505.
- EBERWEIN Wolf-Dieter et SAUREL Pierre (1995b) The dynamics of collective behavior: modeling mass mobilization in the GDR. *Panel Formal Theory at the Second Pan-European Conference in International Relations* (Fondation Nationale des Sciences Politiques (Paris), 1995/09/13-16)
- EBERWEIN Wolf et SAUREL Pierre (1995a) La genèse d'un mouvement révolutionnaire : la RDA en 1989. In *Journées Evolution et Organisation : Hasard et Contraintes dans la Genèse des Formes Collectives*. Actes des journées de Rochebrune. (Rochebrune (France), 1995/03/20-24), pp. 119-141
- JARDAT Rémi et SAUREL Pierre (2011) Institutionalization of roles through inter-organizational conflicts: a proposal of typology. ISBN 978-9985-9824-7-1. In *European Academy of Management (EURAM 2011) Conference*. (Tallin (Estonie), 2011/06/01-04)
- LEGRAND Jacky, SOULIER Eddie, BUGEAUD Florie, ROUSSEAUX Francis, SAUREL Pierre et NEFFATI Houda (2012b) A Methodology for Exploiting Oceans of Data within Territorial Dynamic Applications. In *2nd IEEE International Workshop on Advanced Information Systems for Enterprises* (Constantine (Algeria), 2012/11/10-11)
- LEGRAND Jacky, SOULIER Eddie, BUGEAUD Florie, ROUSSEAUX Francis, SAUREL Pierre et NEFFATI Houda (2012a) A New Methodology for Collecting and Exploiting Vast Amounts of Dynamic Data. In *3rd International Conference on Emerging*

- Intelligent Data and Web Technologies* (Bucharest, 2012/09/19-21), <http://voyager.ce.fit.ac.jp/~eidwt2012/>)
- NEFFATI Houda, SOULIER Eddie, ROUSSEAUX Francis, LEGRAND Jacky, BUGEAUD Florie, SAUREL Pierre et CALVEZ Philippe (2012) Collective Intelligence Modeling throughout Territorial Agencements. In *ECOMOD'12. Conférence internationale Modeling with Impact*. (Séville, 2012/07/4-6), (<http://ecomod.net/conferences/ecomod2012>)
- NEFFATI Houda, SOULIER Eddie, BUGEAUD Florie, ROUSSEAUX Francis, SAUREL Pierre, LEGRAND Jacky (2012) Penser et produire une réserve naturelle comme confluence participative : le cas du Grand Cul-de-Sac Marin de Guadeloupe (Ville des Abymes). In *Mondes en Développement XXVIIIèmes Journées ATM*. (Orléans, 2012/06/11-13). (<http://www.mondesendveloppement.eu/pages/xxviiemes-journees-atm/>)
- ROUSSEAUX Francis, SAUREL Pierre et PETIT Jean (2014) Knowledge Engineering or Digital Humanities? Territorial Intelligence, a Case in Point. In *Studies in Computational Intelligence, vol. 514, Innovations in intelligent machines – 4. Recent Advances in Knowledge Engineering: Paradigms and Applications*. Faucher Colette (éd.) et Jain Lakhmi (éd.). USA: Springer International Publishing, pp. 129-187
- ROUSSEAUX Francis, NEFFATI Houda, SAUREL Pierre, SOULIER Eddie, LEGRAND Jacky et PETIT Jean (2012) Une rurbanité rhizomique pour figurer la modernité du territoire Cap Excellence en Guadeloupe. In *MoFix'12. Valeur de l'imaginaire, mobilité/fixité et territorialité*. (Nantes, 2012/06/12-13). (http://www.fabula.org/actualites/poetique-du-numerique-3-valeur-de-l-imaginaire-mobilite-fixite-et-territorialite_50343.php)
- ROUSSEAUX Francis, NEFFATI Houda, SAUREL Pierre, SOULIER Eddie et PETIT Jean (2012) Une vision hétérarchique du territoire Cap Excellence en Guadeloupe : vers un pilotage opérationnel par les crises et les controverses. In *Colloque international APERAU 2012 : Penser et produire la ville au XXIème siècle, Modernisation écologique, qualité urbaine et justice spatiale*. (Lausanne, 2012/06/06-07), (<http://www3.unil.ch/wpmu/aperau/>)
- ROUSSEAUX Francis, SOULIER Eddie, SAUREL Pierre et NEFFATI Houda (2012) Agencement multi-échelle de territoires à valeur ajoutée numérique : des hétérotopies focaldiennes aux complexes simpliciaux. In BOURCIER Danièle (éd.), BOULET Romain (éd.) et MAZZEGA Pierre (éd.). *Politiques publiques, Systèmes complexes*. Paris : Hermann, pp. 169-192.
- ROUSSEAUX Francis, SAUREL Pierre et TATSOS Patrice (2006) Towards new on-line cultural possibilities. In *IEEE First International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area*. ISEIMA, juillet 2006, pp. 430-435
- SAUREL Pierre, ROUSSEAUX Francis et Marc DANGER (2014b) On the Changing Regulations of Privacy and Personal Information in MIR. In *The 15th International Society for Music Information Retrieval, ISMIR 2014*, (Taipei (Taiwan) 2014/10/27-31)
- SAUREL Pierre, ROUSSEAUX Francis et Marc DANGER (2014a) Music Information Retrieval as a Key Framework to Explore Legal Issues Linked to Personal Data Computation. In *Position papers of the 2014 Federated Conference on Computer*

- Science and Information Systems, FedCSIS 2014*, (Warsaw (Poland) 2014/09/07-10), vol. 3, pp. 259-264
- SAUREL Pierre et ROUSSEAUX Francis (2013) La sophistication de la preuve judiciaire dans les contentieux informatiques. In *Journées ayant pour thème : L'incertitude, la preuve et ses moyens*. Actes des journées de Rochebrune. (Rochebrune (France), 2013/01/13-19).
- SAUREL Pierre (2012) Modélisation macroscopique de l'écosystème politique de gestion des données personnelles en France. In BOURCIER Danièle (éd.), BOULET Romain (éd.) et MAZZEGA Pierre (éd.). *Politiques publiques, Systèmes complexes*. Paris : Hermann, p. 259-272.
- SAUREL Pierre et OYHAMBERRY Amaïa (2010) Ce que la cyberjustice nous apprend de la justice des signes distinctifs. *Gazette du Palais, Gazette du droit de la propriété industrielle*, 18-19 juin 2010, pp. 21-28
- SAUREL Pierre et JARDAT Rémi (2009) Procédure judiciaire inter-entreprise et liaisons / déliaisons paradoxales : le cas des contentieux informatiques. *Revue Management & Avenir*, décembre 2009, 2009/9 n°29, pp. 132-149
- SAUREL Pierre (2009b) Le sort des exclusions de garantie – contrats d'intégration de systèmes et assurances. *Revue Expertises des systèmes d'information*, juin 2009, pp. 226-229
- SAUREL Pierre (2009a) Téléphones portables Bluetooth : la CNIL concilie publicité et droit à la tranquillité. *Gazette du Palais*, 6 janvier 2009, n°6, p. 31
- SAUREL Pierre, BENSOUSSAN Alain et MENAY Alexandre (2008) *Livre blanc sur les mesures de filtrage de contenus*. Paris, 2008/10/14, 291 p.
- SAUREL Pierre (2008) Les règles de gouvernance de l'expertise préconisées par la CNEJITA. *Gazette du Palais*, juillet 2008, n°206, pp. 25-29
- SAUREL Pierre et OHAYON Benjamin (2008b) Note sous cassation commerciale 19 juin 2007. *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, 22 janvier 2008, n°22, p. 31
- SAUREL Pierre et OHAYON Benjamin (2008a) Note sous TGI Paris (3ème chambre, 1ère section) 28 mars 2007. *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, 22 janvier 2008, n°22, p. 35
- SAUREL Pierre (2007b) The legal framework for electronic records storage in France. *Premier colloque international du projet CASPAR (Cultural, Artistic and Scientific knowledge for Preservation, Access and Retrieval)* (IRCAM (Paris), 2007/04/19)
- SAUREL Pierre (2007a) Les audits IP/IT dans le cadre des fusions acquisitions : un instrument indispensable. *Juristendances Informatique & Telecom*, Cabinet Alain Bensoussan Avocats, mars 2007 n°62 spécial sécurité informatique
- SAUREL Pierre et PETRONE Julien (2006d) La prise en compte juridique des technologies émergentes : une nécessité en informatique. *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, octobre 2006, n°106 à 110, pp. 10-14
- SAUREL Pierre et PETRONE Julien (2006c) Les règles de gouvernance s'appliquant aux expertises civiles en nouvelles technologies : la Convention du 4 mai 2006. *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, juillet 2006, n°200 à 201, pp. 14-17

- SAUREL Pierre et CHARPENTIER Philippe (2006b) Vers l'amélioration du déroulement de l'expertise judiciaire en informatique et nouvelles technologies. *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, avril 2006, n°106 à 110, pp. 10-14
- SAUREL Pierre et CHARPENTIER Philippe (2006a) Un décret, une charte nationale : vers l'amélioration du déroulement de l'expertise judiciaire en informatique et nouvelles technologies ? *Gazette du Palais, Gazette du droit des technologies avancées*, janvier 2006, n°25 à 26, p. 5
- SAUREL Pierre et PETRONE Julien (2006b) Technologies émergentes : quel impact juridique ? *L'œil expert*, novembre 2006, n°35, p. 22
- SAUREL Pierre et PETRONE Julien (2006a) Assurer la gouvernance d'un projet informatique d'ampleur par un PAQ ! *Juristendances Informatique & Telecom*, Cabinet Alain Bensoussan Avocats, juillet 2006, n°54-55
- SAUREL Pierre (2006) L'audit de sécurité d'un système d'information – La cartographie du SI, un pré-requis à l'audit ... pour assurer une parfaite opposabilité du SI. *Juristendances Informatique & Telecom*, mars 2006, Cabinet Alain Bensoussan Avocats, n°50 spécial sécurité informatique
- SAUREL Pierre et TELLIER Isabelle (2005) L'anticipation de la gestion des éléments de preuve dans les projets informatiques. *Juristendances Informatique & Telecom*, Cabinet Alain Bensoussan Avocats, novembre 2005, n°46 spécial préjudice
- SAUREL Pierre (sherpa) (2003) *La maîtrise et la diffusion des Technologies de l'Information et de la Communication*. Rapport de la Commission TIC à l'Académie des technologies, Paris, juillet 2003
- SAUREL Pierre (2001) Diversité de l'argumentation et de la démonstration en mathématique : un sujet d'actualité pour les enseignants du second degré. *Présence de la Recherche, IUFM de Paris*, septembre 2001, n°3
- SAUREL Pierre et HENAULT Anne (2001) La théorie des émotions de Damasio : une occasion pour expliciter certaines hypothèses en neurosciences. Séance plénière. In *Des théories aux problématiques, Congrès International de Sémiotique SEMIO 2001*. (Limoges, 2001/04/04-08)
- SAUREL Pierre (2000) *La déontologie de l'avocat français devant le Tribunal Pénal International pour l'ex-Yougoslavie*. Mémoire de CAPA : CRFPA (Versailles), 2000/10/01, 29 p.
- SAUREL Pierre (1998b) La modélisation ne se réduit ni à l'étude des modèles ni à celle de leurs simulations. In *Journées ayant pour thème : Quelles relations entretenons-nous avec nos modèles ? Actes des journées de Rochebrune*. (Rochebrune (France) 01-07 février 1998/02/01-07), pp. 45-60
- SAUREL Pierre (1998a) *Nécessité des modèles en sciences cognitives : de la modélisation à la mise en parangon*. Thèse de doctorat : Sciences cognitives : Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (Paris), 1998/01/16, 381 p.
- SAUREL Pierre (1997) *La complexité : des théories de la quantité ?* Rapport technique du CREA n° 9701, Paris, janvier 1997, 94 p.
- SAUREL Pierre (1996b) *Comment les Sciences Cognitives conçoivent l'étude des processus*. Rapport technique du CREA n° 9627, Paris, octobre 1996, 45 p.

- SAUREL Pierre (1996a) *L'évolution de la notion d'axiomatisation et ses relations avec l'étude du cerveau 1903-1996*. Rapport technique du CREA n° 9612, Paris, mars 1996, 50 p.
- SAUREL Pierre (1992) *Q-learning et apprentissage par renforcement*. Mémoire de DEA : Sciences cognitives : Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (Paris), 1992/08-04, 43 p.
- SOULIER Eddie, NEFFATI Houda, ROUSSEAUX Francis, BUGEAUD Florie, COBOS-PEREZ Augusto, SAUREL Pierre, CALVEZ Philippe, LEITZMAN Mylène, LEGRAND Jacky (2012) Towards a Territorial Intelligence Based on Territorial Assemblages Theory: Urban Community Case of Cap Excellence in Guadeloupe. In *11^{ème} Conférence Internationale Annuelle d'Intelligence Territoriale, CIIT'12 « Intelligence territoriale et mondialisation. Tensions, transition et de transformation »*. (La Plata (Argentine), 2012/10/17-20)
- SOULIER Eddie, ROUSSEAUX Francis, NEFFATI Houda, LEGRAND Jacky, BUGEAUD Florie, SAUREL Pierre et CALVEZ Philippe (2012) Performativité organisationnelle des outils d'agencements territoriaux : vers une intelligence territoriale à base d'engagements ? In *Conférence internationale ACFAS 2012, « Organisations, performativité et engagement »*, (http://www.crpcm.uqam.ca/pages/docs/Actes_colloque_ACFAS_2012.pdf). (Montréal, 2012/05/7-11) p. 150-173