



HAL
open science

GÉNÉRALISATION DU CONCEPT DE GAMME POUR MODÉLISER LES PROCESSUS LOGISTIQUES D'UNE SUPPLY CHAIN: LE CAS DE L'OCP

Mohammed Degoun, Amar Drissi, Pierre Féliès, Vincent Giard, Kawtar
Retmi, Janah Saadi

► To cite this version:

Mohammed Degoun, Amar Drissi, Pierre Féliès, Vincent Giard, Kawtar Retmi, et al.. GÉNÉRALISATION DU CONCEPT DE GAMME POUR MODÉLISER LES PROCESSUS LOGISTIQUES D'UNE SUPPLY CHAIN: LE CAS DE L'OCP . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166672

HAL Id: hal-01166672

<https://hal.science/hal-01166672>

Submitted on 23 Jun 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.

GÉNÉRALISATION DU CONCEPT DE GAMME POUR MODÉLISER LES PROCESSUS LOGISTIQUES D'UNE SUPPLY CHAIN : LE CAS DE L'OCP

M. DEGOUN¹, A. DRISSI², P. FENIES³

V. GIARD⁴, K. RETMI⁵, J. SAADI⁶

¹ Université Mohammed VI Polytechnique – EMINES,
Benguerir, Maroc, mohammed.degoun@emines-ingenieur.org

² DGA OCP SA – a.idrissi@ocpgroup.org

³ Université Paris-Nanterre + EMINES
pierre.fenies@u-paris10.fr

⁴ PSL – Université Paris-Dauphine – LAMSADE
UMR 7243, F 75775 Paris Cedex 16 + EMINES
vincent.giard@dauphine.fr

⁵ Université Mohammed VI Polytechnique – EMINES,
Benguerir, Maroc, kawtar.retmi@emines-ingenieur.org

⁶ Université Hassan II – ENSEM – LISER,
janah.saadi@gmail.com

RÉSUMÉ : Cet article propose une approche de modélisation et de formalisation de connaissances recueillies sur le terrain en vue de construire un ensemble d'outils permettant à la fois de piloter et de valoriser la production industrielle. Une approche inductive, issue du terrain est construite à partir du cas réel de l'OCP Tout en présentant le contexte de cette recherche, une formalisation de la connaissance recueillie sous la forme d'une généralisation du concept de gamme est proposée. Cette approche permet à la fois de détailler les problèmes rencontrés mais aussi d'avoir un niveau de granularité suffisant pour plusieurs types de décisions de management ex ante. Plusieurs exemples d'applications des modélisations proposées sont présentés dans le contexte réel du *reengineering* de la *supply chain* de l'OCP et permettent au lecteur d'obtenir un retour d'expérience sur la mise en œuvre d'une double modélisation engendrée par un recueil unique de la connaissance.

MOTS-CLÉS : *Supply Chain, Contrôle de Gestion, Pilotage Opérationnel, Gamme, Nomenclature, Modèle de Connaissance.*

1 INTRODUCTION

L'objet de cet article est d'analyser les réponses apportées aux problèmes méthodologiques rencontrés dans la première étape d'une recherche visant à créer un double système d'aide à la décision (SAD, Keen & Scott Morton, 1978, Stadtler & Kilger, 2007) dédié au pilotage et au contrôle d'une *Supply Chain* (SC). Cette étape concerne le recueil et la formalisation de la connaissance nécessaire à la mise au point des modèles de simulation à la base de ces SAD.

Ce terme de *Supply Chain* s'applique usuellement à un réseau d'unités productives impliquées dans la production d'un ensemble de biens, le plus souvent sous l'impulsion d'une firme pivot ; ces unités productives sont souvent situées dans plusieurs pays. Interviennent dans cette SC principalement les différentes filiales de la firme, mais également de manière « satellitaire » un ensemble de prestataires externes de services logistiques et de sous-traitants dont l'activité est coordonnée par la multinationale (Lee *et al.*, 1997).

La SC étudiée est celle de l'OCP SA, détenue par l'état marocain. Elle est constituée d'une filière complète (décrite en figure 5) allant de l'extraction du minerai (plus de la moitié des réserves mondiales de phosphate appartiennent à l'OCP), à la production d'acide phosphorique

et d'engrais. Le site de Jorf, situé en aval de cette SC a pour particularité d'abriter des unités de production possédées par l'OCP et quelques unités techniquement similaires, gérées conjointement par l'OCP et des partenaires étrangers dans le cadre de *joint ventures* (JV). Par ailleurs, l'évolution en cours de la configuration de cette SC (introduction de 300 km de minéroducts) lui permet de s'orienter vers une production à la commande.

Ces SAD s'appuient sur deux modélisations complémentaires de la SC, permettant d'en simuler dynamiquement le fonctionnement, pour en améliorer le pilotage. Celui-ci s'intéresse, d'une part, aux décisions tactiques visant à déterminer les conditions des nouveaux contrats à passer (clients en nombre limité), dans une logique de maximisation de la marge dégagée par la SC et, d'autre part, aux décisions opérationnelles liées à l'exécution des contrats signés, dans une logique de minimisation de coûts. Dans le cadre de la simulation, la sélection d'alternatives décisionnelles peut mobiliser des approches complémentaires (optimisation...).

Dans cet article, on s'intéresse au recueil des connaissances nécessaires à la modélisation de la SC dans une optique de pilotage opérationnel, socle d'une modélisation élargie, orientée vers la prise de décisions tactiques. L'évaluation *ex ante* des décisions doit être complétée par une évaluation *ex post* réalisée par le contrôle de gestion, par ailleurs à l'origine d'une comptabilité de

gestion à la base d'un éclairage économique des décisions à prendre. Dans une perspective de production à la commande, le référentiel du contrôle de gestion ne peut être efficace s'il se fonde sur des données historiques ; seule la simulation permet de bâtir dynamiquement un référentiel pertinent. Les modélisations / simulations des pilotages opérationnel et tactique doivent être cohérentes avec celles que le contrôle de gestion mobilise pour évaluer les décisions prises au niveau opérationnel ou tactique. Cette volonté d'interfacer le pilotage opérationnel industriel avec le contrôle de gestion (Fenies *et al.*, 2012) par le biais d'une architecture de modélisation / simulation est, à notre connaissance, originale.

On commencera par préciser le contexte de ce travail (§2) ainsi que la nature et la structure de l'information nécessaire à sa réalisation (§3), puis on examinera (§4) le concept-pivot de modélisation des processus logistiques par les gammes, que l'on illustrera (§5) à l'aide d'exemples tirés de la Supply Chain de l'OCP avant de conclure.

2 CADRE DE LA RECHERCHE

Tout travail de modélisation/simulation (M/S) d'un système productif est conditionné par les objectifs poursuivis et les caractéristiques générales de ce système. On commencera donc par préciser les objectifs de ces SAD (§2.1), puis par justifier l'instrumentation de M/S retenue (§2.2) et le choix de la granularité de ces représentations (§2.3).

2.1 Les objectifs de cette modélisation / simulation

Le recueil conjoint d'informations sur le terrain par des spécialistes du pilotage de la SC et ceux de la comptabilité de gestion et du contrôle de gestion doivent permettre de créer deux représentations cohérentes et complémentaires du fonctionnement dynamique de la SC.

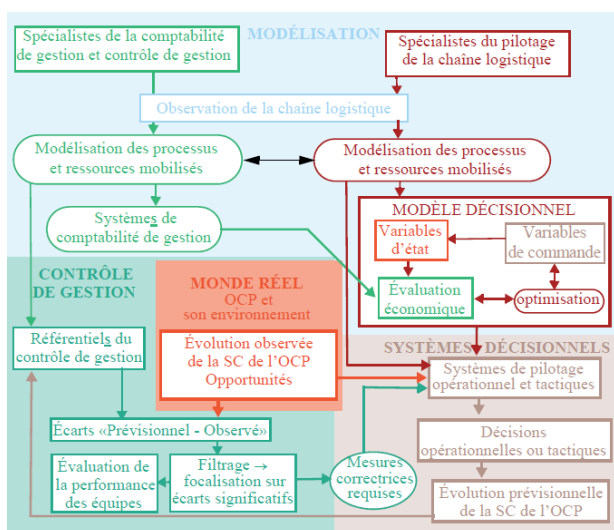


Figure 1. Articulation et usage des modèles de pilotage et de contrôle de gestion

La M/S créée pour le SAD du pilotage ne nécessite pas de représentation très détaillée des processus utilisés par la SC ; elle implique, par contre, une bonne compréhension des principaux leviers d'action mis à la disposition des décideurs et une prise en compte correcte de la propagation des conséquences dans le temps et dans l'espace de ces décisions. Dans un premier temps, c'est donc la reproduction fidèle d'un fonctionnement physique qui est privilégié. Pour éclairer les décisions à prendre, il faut non seulement anticiper les conséquences de décisions alternatives mais aussi en mesurer l'impact économique, ce qui implique de s'appuyer sur une comptabilité de gestion fondée sur la seconde M/S.

La M/S créée pour le SAD du contrôle de gestion repose sur une représentation différente du fonctionnement des entités productives de la SC, dans une perspective de reporting financier périodique. Elle doit permettre de mieux apprécier les inducteurs de coûts et donc de bâtir une comptabilité de gestion pertinente exploitable, à la fois dans la prise de décision pour apporter un éclairage économique et dans le contrôle a posteriori. Cet éclairage économique ne sera pas abordé dans cet article qui ne s'intéressera implicitement qu'aux inducteurs de coûts. Il sera utilisé ultérieurement dans les SADs de pilotage des décisions opérationnelles et tactiques. Par ailleurs, le fait de pouvoir produire à la commande doit conduire la construction d'un référentiel dynamique utilisable par le SAD du contrôle de gestion. L'analyse des écarts significatifs entre ce qui a été prévu physiquement et ce qui s'est passé, complétée par celle fournie par le contrôle de gestion doit permettre dans un développement intérieur des SAD d'améliorer la performance des décisions prises à la suite d'incidents de toutes natures.

2.2 Approche simulatoire retenue

Une brève analyse des approches disponibles en modélisation de systèmes productifs complexes milite en faveur d'une approche basée sur une M/S s'appuyant sur une approche à événements discrets. La production de la SC de l'OCP reposant principalement sur des processus continus, il convient d'établir quelques principes pour pouvoir utiliser une approche définie pour décrire des productions discrètes.

Les approches de modélisation de processus de production, introduites dans les années soixante-dix avec des méthodes basées sur des diagrammes (SADT, diagrammes de flux, IDEF.), se sont rapidement orientées vers des méthodes orientées processus (réseaux de Petri étendus, CIMOSA, ARIS, IDEF3, IEM...) ouvrant la porte à des approches de modélisation / simulation de processus sophistiquées (Vernadat, 1996). Davis *et al.* (2007) montrent l'apport des approches simulatoires dans la production de nouvelles théories, en illustrent l'usage et l'intérêt dans un certain nombre de travaux théoriques récents et proposent une démarche structurée et contextuelle d'utilisation de ces approches dans la construction de nouvelles théories pour en garantir le

caractère scientifique. Certaines de ces recommandations sont applicables dans la construction de la M/S utilisés en appui des SAD.

Dans sa revue approfondie des approches de modélisation de processus, Aguilar-Savén (2004), utilise trois critères (« statique-dynamique », « discret-continu » et « déterministe-stochastique ») pour classer les approches de simulation disponibles. Elle insiste sur l'adéquation de l'approche retenue avec les objectifs poursuivis qui peut être d'ordre descriptif, orientés vers la conception de nouveaux processus, utilisés comme support à la prise de décisions opérationnelles et, enfin, associés aux technologies de l'information. Dans notre cas, c'est le troisième type d'objectif qui est poursuivi, ce qui implique l'usage d'une instrumentation à la fois capable d'anticiper la propagation progressive de l'impact des décisions prises dans différentes unités de la SC, capable de traiter des environnements productifs combinant des processus discrets et continus et, enfin, capable de prendre en compte, si nécessaire, le caractère aléatoire de certains paramètres. De nombreux simulateurs à événements discrets permettent de prendre en compte ce cahier des charges, au prix d'une adaptation permettant de prendre en compte le caractère continu de certains processus.

La SC de l'OCP combine des processus discrets et continus. L'utilisation d'un simulateur à événements discrets pour décrire des processus continus est possible en mobilisant les deux principes suivants de modélisation, qui ont un impact sur le recueil des données nécessaires à la M/S voulue.

- Une *discretisation des flux* doit nécessairement être mise en œuvre. Les flux entrants ou sortant d'un processeur effectuant un traitement (chimique, thermique...) sont fragmentés en lots, caractérisés par le nom du composant et son poids. La cadence d'introduction ou d'émission de ces lots (par exemple, un lot à la seconde) est commune au système productif pour permettre une synchronisation des flux. Dans ce processus de fragmentation, on retrouve la notion de débit (kg/seconde, par exemple), information à obtenir dans le recueil de données.

- Dans les simulateurs à événements discrets, la modélisation utilise classiquement des stocks et des processeurs. Schématiquement, un processeur tire des items d'un stock pour leur faire subir un traitement pendant un certain temps, avant de les expédier vers un autre stock. Un stock accueille des items sans leur faire subir de traitement, pendant un temps séjour, éventuellement borné. Cette durée dépend des autres items en stock et de l'état des processeurs qui ont accès à ce stock. Dans notre contexte, l'utilisation de la convention de fragmentation des flux en lots pose un problème parce qu'un processeur n'admet de nouveaux lots qu'une fois achevé le traitement en cours. Plusieurs solutions techniques sont envisageables. La plus simple consiste à modéliser le traitement par un stock dans lequel un temps de séjour minimal est imposé, cette durée correspondant au temps moyen de traitement. Ce stock est encadré par deux pro-

cesseurs fictifs assurant l'alimentation du stock et le retrait des lots traités ; le temps opératoire de ces processeurs fictifs correspond au cadencement du système (la seconde, dans notre exemple). Le recueil d'informations relatif à un processus continu doit permettre de connaître les temps moyens de séjour.

2.3 Granularité de cette modélisation / simulation

Le niveau hiérarchique des décisions implique une certaine granularité de la représentation sur laquelle se fondent ces décisions. On proposera ensuite quelques principes permettant de limiter l'ampleur de la modélisation de la SC.

Il est habituel de classer et hiérarchiser les décisions en fonction de leurs niveaux (stratégique, tactique, opérationnel, temps réel) ce qui correspond à des périmètres spatio-temporels de plus en plus fins et à des niveaux de responsabilité de plus en plus restreints. Les décisions prises à un certain niveau sont des contraintes à respecter dans la prise de décisions de niveau inférieur. Les M/S sous-jacentes dans les SAD à construire étant destinées à améliorer la prise de décisions des responsables du pilotage opérationnel ou tactique, la granularité de la modélisation du SAD opérationnel doit permettre de prendre en compte les décisions que ces décideurs peuvent prendre et d'en simuler les conséquences dans la chaîne logistique. Les décisions opérationnelles envisagées ici correspondent principalement à des modifications de planning de production et d'utilisation de ressources pour faire face à des incidents remettant en cause la cohérence des décisions antérieurement prises. Les décisions d'ajustement en temps réel (ouverture d'une vanne...) sont prises par d'autres acteurs (opérateurs...) et nécessitent une description plus fine du système productif.

L'analyse des conséquences des décisions opérationnelles peut donc reposer sur une représentation relativement agrégée du système productif, s'appuyant sur des performances moyennes des entités retenues (liées à l'utilisation de routines utilisées dans la prise de décisions en temps réel). Par exemple, il est inutile de descendre au niveau des « constituants » d'une ligne de production d'acide sulfurique (cf. figures 10 & 11) pour étudier les décisions opérationnelles. La définition de ces entités doit cependant permettre l'identification des modifications de débits liées de capacité liées à des pannes ou des opérations de maintenance. Ce principe conduit à privilégier la description d'un atelier d'acide sulfurique comme étant constitué de 6 lignes identiques indépendantes plutôt que comme un sous-système productif agrégé unique. Les informations techniques nécessaires n'existent pas et doivent être « produites » à partir des informations techniques détaillées, cette production étant au cœur de cet article. L'analyse des mécanismes décisionnels (procédures utilisées, informations mobilisées) fait partie du recueil d'information mais les problèmes méthodologiques posés ne seront qu'esquissés.

Le SAD orienté vers la prise de décisions tactiques s'appuiera sur la même M/S que celle retenue pour

éclairer la prise de décision opérationnelle. À ce niveau il s'agit de définir une programmation prévisionnelle cohérente, sur un horizon de quelques semaines, des commandes en cours et de nouvelles commandes à sélectionner dans un ensemble de commandes possibles ; ces décisions pouvant se doubler de décisions de mobilisation de ressources additionnelles. Dans ce contexte, on peut imaginer, dans un premier temps, d'utiliser des « routines décisionnelles » pour prendre des décisions considérées comme relevant du niveau opérationnel dans le SAD orienté vers la prise de décisions opérationnelles. Dans un second temps, des approches plus performantes pourront être envisagées.

3 NATURE ET STRUCTURE DE L'INFORMATION NÉCESSAIRE

On commencera (3.1) par décrire les catégories d'informations nécessaires à la construction du modèle de simulation utilisé en support des SAD de pilotage et de contrôle. On poursuivra (§3.2) par une analyse des démarches de recueil d'informations et de leur structuration, disponibles dans la littérature, ce qui permettra au §4 de mettre en évidence l'originalité de la démarche proposée.

3.1 Informations requises pour cette modélisation / simulation

Les matériaux de base correspondent à des documents techniques divers disponibles sur le terrain, complétés par des observations directes et des interviews. Ces matériaux de base ne sont pas publics et ne sont donc pas référencés en bibliographie. Ce processus de recueil de données primaires et de leur traitement pour établir les informations nécessaires à la M/S souhaitée pose plusieurs problèmes méthodologiques délicats que l'on analysera en détail, ainsi que les solutions retenues. Cette modélisation implique la mobilisation d'informations techniques, d'informations de gestion et d'informations procédurales.

3.1.1 Informations techniques

Les informations techniques décrivent les produits fabriqués ou approvisionnés par le système productif étudié, les ressources disponibles et les modes opératoires, sous la forme de gammes plus ou moins détaillées.

Les produits fabriqués ou approvisionnés sont repérés par une référence laquelle est utilisée dans des nomenclatures. Une *nomenclature* de production est la liste des composants et/ou matières premières requises pour fabriquer une (ou plusieurs) références, ainsi que les quantités impliquées par cette fabrication (les quantités étant à remplacer par des débits dans les processus continus). Pour produire, le système dispose d'un ensemble de *ressources* en équipements, outillages et opérateurs. On distingue classiquement (Giard, 2003) les ressources stockables qui, lorsqu'elles ne sont pas utilisées au cours d'une période, peuvent l'être au cours de la période suivante, des ressources non-stockables. Cette classification

détermine la nature des informations de gestion requises par le pilotage de la production.

La *gamme* est une liste ordonnée d'opérations permettant de fabriquer (ou de transporter ou d'inspecter ou d'acheter) une référence, explicitant les ressources mobilisées et les temps opératoires (ou les temps moyens de transformation, dans les processus continus). Lorsqu'elle est possible, la paramétrisation de certaines informations de la gamme permet de décrire le processus de production d'un ensemble de références ; on parle alors de *gamme paramétrée*. On reviendra sur ce concept de gamme au §4, pour structurer les informations disponibles sur le terrain.

Ces informations techniques sont assez faciles à obtenir, le plus souvent à un niveau de détail trop fin par rapport aux besoins de notre M/S. Les problèmes de transformation de ces informations qui en résultent et les solutions proposées seront analysés au §4.4.

3.1.2 Informations de gestion

Les informations de gestion décrivent, à un instant donné, l'état du système de production ainsi que celui d'avancement des commandes. Cette connaissance peut être considérée comme parfaite dans la simulation dynamique d'un système productif puisqu'il s'agit d'informations produites et utilisées par la simulation. Elle reste cependant conditionnée par la pertinence de la modélisation et la qualité des informations utilisées lors de l'initialisation de la simulation. Il est indispensable alors de se pencher sur la qualité de ces informations initiales.

La description de l'état du système diffère selon que l'on est en présence de ressources stockables ou non-stockables. Pour les premières, la caractérisation d'une référence se définit par la quantité disponible, complétée éventuellement par celle de sa position de stock. À un instant donné, une ressource non-stockable réputée disponible est soit inoccupée, soit utilisée en production. Dans ce dernier cas, l'information est à compléter par la localisation de la ressource si elle est partageable entre plusieurs postes de travail (opérateur, outillage), ainsi que par la mention de la tâche en cours d'exécution (opération d'une commande). Pour terminer, rappelons qu'une ressource présente dans le système peut ne pas être disponible pour la production, (machine en panne ou en maintenance, opérateur en pause ou en formation...).

La connaissance du système productif est à compléter par celle des commandes à exécuter. À un instant donné, ce système est en train de traiter un ensemble de commandes portant chacune sur une référence à produire. À cet instant, une commande peut être en cours d'exécution ou en attente. Dans le premier cas, l'avancement de la commande se définit par l'opération de la gamme en cours et le poste de travail sur lequel elle est réalisée. Dans le second cas, il se définit par la prochaine opération à exécuter et la localisation (stock) de l'encours associé à cette commande. Ces informations peuvent être complétées par celles relatives à l'ensemble des com-

mandes fermes que le système n'a pas commencé à exécuter.

Deux considérations doivent être prises en compte dans la modélisation, pour assurer une représentation fidèle des informations utilisées dans la prise de décision.

- Les modifications de l'état de ces ressources sont rarement connues en temps réel mais plutôt périodiquement (fin de journée...) ou à l'occasion d'un événement (fin d'exécution d'une opération, mouvement de stock...), éventuellement enregistré avec retard. Cette incertitude doit être prise en compte dans la M/S pour assurer la robustesse de l'impact des décisions prises. Si, par exemple, le niveau initial de stock de soufre liquide est connu à 100 tonnes près, une solution conduisant, dans la simulation, à avoir un niveau de stock positif mais inférieur à 100 doit être considérée comme risquée.

- L'existence de ces informations n'implique pas mécaniquement leur utilisation dans la prise de décision, en particulier si elles ne sont pas accessibles aux décideurs. Dans ce cas, les règles de décision mobilisée en simulation ne doivent pas faire intervenir ce type d'information.

Le recueil d'informations sur le terrain doit donc s'attacher à la fois à déterminer quelles informations sont effectivement disponibles, leur degré de fiabilité et leur mobilisation dans la prise de décision. La modélisation doit tenir compte de ces caractéristiques dans la transcription des mécanismes décisionnels.

3.1.3 Informations procédurales

Les informations procédurales décrivent l'ensemble des règles utilisées dans la prise de décision, s'appuyant sur les informations techniques et les informations de gestion. Les événements qui impliquent une prise de décision sont multiples et correspondent à une modification de l'état du système : libération d'une ressource non-stockable pouvant être affectée à une nouvelle opération, occurrence d'un incident (panne, rupture de stock...), modification du niveau d'un stock, arrivée de nouvelles commandes... Les décisions opérationnelles portent donc essentiellement sur l'affectation de ressources et le choix de commandes à passer dans un contexte de fonctionnement normal ou à la suite de perturbations invalidant le bien-fondé de décisions antérieurement prises.

L'identification des acteurs chargés de ces prises de décision et de leur périmètre de responsabilité est indissociable du recueil de ces informations procédurales.

Le recueil de ces règles de décision n'est pas toujours évident, car elles ne sont pas toujours formalisées. Les discussions avec les décideurs, complétées par des séances d'observation sur le terrain, permettent sans doute d'obtenir les principales règles utilisées et les informations de gestion qu'elles mobilisent. Pour les décisions routinières, on peut espérer obtenir une connaissance assez fidèle. Pour les autres décisions, la qualité des informations recueillies est sans doute plus difficile à garantir, car les déclarations d'un décideur peuvent être biaisées son désir de conformité à ce qu'il pense que sa

hiérarchie considère comme approprié. La simulation peut s'appuyer sur les règles recueillies ou sur d'autres susceptibles d'être plus efficaces et/ou efficaces, à des fins d'amélioration du pilotage.

Un dernier point mérite d'être soulevé. L'ensemble des règles de décision mobilisées localement par un décideur peut ne pas être stable dans le temps et dépendre d'un contexte plus général dépassant l'environnement local du preneur de décision. L'explicitation de ces métarègles qui définissent l'ensemble des règles de décision à utiliser est une des difficultés de ce recueil d'informations procédurales.

3.2 Structuration de la démarche de recueil d'information

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, de manière concomitante, plusieurs innovations techniques et managériales conjuguées avec une mutation de l'environnement économique ont conduit à modifier le management des organisations des firmes occidentales en transformant progressivement l'approche hiérarchique et fonctionnelle traditionnelle. *reengineering* des processus (Hammer et Champy, 1993), coûts à base d'activités (Cooper et Kaplan, 1991), management par projets (Giard et Midler, 1993...), progiciels intégrés de gestion sont ainsi diverses avancées managériales et technologiques issues d'une approche par processus de l'organisation et des logiciels associés. Or, les procédures organisationnelles utilisées et la culture des hommes qui les composent, les conduisent, tout du moins dans les firmes traditionnelles, à avoir une vision hiérarchique et fonctionnelle de l'entreprise et de leur travail. Dès lors est apparue la nécessité de modéliser presque systématiquement l'organisation de manière à faire émerger les bonnes pratiques et organiser le recueil de connaissance des processus organisationnels.

Un certain nombre d'auteurs et de praticiens (Weske *et al.*, 2004) ont défini le *Business Process Management* (BPM) comme le processus qui permet de modéliser les processus d'entreprise. À partir du recueil de la connaissance relative au fonctionnement d'un système complexe de type *Supply Chain* (Hult *et al.*, 2004), une représentation des processus organisationnels est réalisée sous la forme d'un modèle de connaissance (MC) de ce système. Ce MC est défini comme une formalisation dans un langage naturel ou graphique de la structure du fonctionnement de ce système. Plusieurs auteurs (Raghu et Vinze, 2005...) proposent de définir le MC des processus d'un système comme l'agrégation d'informations et de données permettant de représenter les interactions, les collaborations et les associations entre les entités du système sous forme de *workflow*.

Concrètement, le BPM est constitué de trois phases (Weske *et al.*, 2004 ; Van der Aalst *et al.* ; 2003 ; Gupta, 2001), notre article se focalisant sur les deux premières.

- La première phase est la phase d'**acquisition** et de **validation** de la **connaissance** sur les processus organisa-

tionnels ; cette phase, dont on détaillera les étapes, est commune au management de la connaissance.

- La deuxième phase est la phase de **formalisation** de la **connaissance** (à l'aide de concepts, d'outils et de méthodes) qui est souvent présentée sous le terme anglo-saxon de *Business Process Modelling* (Holland *et al.*, 2005).

- La troisième phase est la phase d'**analyse** et d'**utilisation** des **modèles formalisés** à l'étape précédente (*Business Process Analysis*, Gartner, 2014). Lors de cette phase d'analyse, les acteurs de l'entreprise analysent, utilisent et enrichissent le MC.

Quatre étapes ont été identifiées pour l'acquisition de la connaissance au travers d'une analyse (non exhaustive) de la littérature du domaine :

- la première étape concerne le choix d'un mode de recueil de la connaissance ; le choix d'un mode est contextuel au système et à l'information existante ; de plus, plusieurs modes sont utilisables simultanément ;
- la deuxième étape concerne la retranscription de la connaissance recueillie sous la forme d'une base documentaire brute numérisée ; il est très important (Seshasai *et al.*, 2005), pour pouvoir bénéficier d'une meilleure productivité et d'une traçabilité de l'information recueillie, de conserver de manière numérique tous les supports de collecte de l'information ;
- la troisième étape consiste à valider la retranscription brute de l'information collectée ;
- la quatrième étape concerne la constitution d'une base de connaissance documentaire qui permettra de formaliser ensuite les processus organisationnels du système. Notons que pour certains, cette base de connaissance documentaire, souvent réalisée dans un langage naturel, constitue en elle-même un modèle des processus d'entreprise.

De manière itérative, la base de connaissance sur les processus est ensuite enrichie chemin faisant en recommençant le processus à la première étape (Madhusudan *et al.*, 2004).

Une étude réalisée par (Davies *et al.*, 2005) sur l'utilisation par les entreprises de la base de connaissance des processus d'entreprise structurée et formalisée montre les cas d'usages suivants (figure 2) :

- le modèle de connaissance est utilisé pour concevoir le Système d'information (Entrepôt de données, base de données, ERP), (Scheer, 2002 ; Solte *et al.*, 2000 ; Hammori *et al.*, 2006...) ;
- le modèle de connaissance est utilisé pour concevoir le système d'aide à la décision (*Advanced Planning and Scheduling*, modèles d'optimisation, modèles de simulation) (Danese *et al.*, 2004 ; Grigorina *et al.*, 2004) ;
- le modèle de connaissance est utilisé pour concevoir le système d'évaluation de performance (systèmes de contrôle de gestion s'inscrivant dans le Supply Chain Costing), (Davies *et al.*, 2005) ;

- le modèle de connaissance est utilisé pour concevoir et valider les processus organisationnels actuels ou futurs d'une organisation par le biais d'échanges avec les acteurs du système cible (Hammer et Champy, 1993) ;

- le modèle de connaissance est utilisé pour permettre une certification des processus organisationnels dans le cadre d'une démarche qualité.

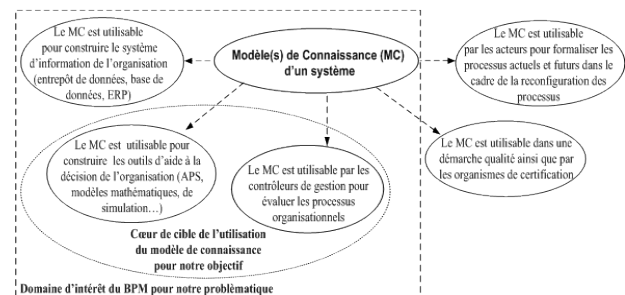


Figure 2. Utilisation multiple des modèles de connaissance d'un système.

L'étude de Davies *et al.* (2005) montre qu'un même modèle pourrait être utilisé de manière conjointe par les différents utilisateurs ; on peut supposer que le processus de formalisation gagnerait en productivité s'il était centralisé et réalisé une fois pour toutes, puisque le modèle de connaissance nécessite la même base de connaissance quelles que soient les utilisations qui en sont faites. En effet, cette cartographie unique des processus réalisée dans le cadre de la modélisation d'un système complexe est utilisable, par rapport à notre problématique, à la fois pour construire le système d'information, construire le système d'aide à la décision, et concevoir le système de valorisation des processus (Raghu et Vinze, 2005). Compte tenu de la complexité d'une SC, la mise en place d'une approche BPM permet de formaliser le processus logistique entre et dans les systèmes composant la SC (Danese *et al.*, 2004) et constitue un préalable nécessaire à la collaboration des activités sur le long terme. Comme le montre la figure 2, l'activité de BPM qui consiste à formaliser la connaissance sur les processus d'un système permet de générer un modèle documenté réutilisable dans plusieurs contextes différents. Cependant, compte tenu de nos objectifs de conception d'applications décisionnelles pour le *Supply Chain Management*, nous nous limiterons à l'utilisation du modèle de connaissance, fondé sur le concept de gamme, d'une SC, permettant de concevoir des SAD intégrant un éclairage économique (Stadtler et Kilger, 2007). En effet, le concept de gamme permet de relier intrinsèquement le niveau opérationnel avec les systèmes de valorisation en contrôle de gestion (on ne pose pas la question de la nature du système de valorisation (Seuring *et al.*, 2011 ; Agyapong-Kodua *et al.*, 2011)) puisque si chaque processus est modélisé comme une gamme, alors sa valorisation n'est plus qu'une question de reliance avec le système d'information issu du contrôle de gestion.

4 FORMALISATION DE LA CONNAISSANCE : UNE MODELISATION DES PROCESSUS LOGISTIQUES PAR LES GAMMES

Le recueil des informations techniques se traduit par la disponibilité de matériaux hétérogènes d'où il faut extraire les informations pertinentes pour la modélisation / simulation désirée. Les problèmes méthodologiques posés conduisent à une analyse plus fine du concept de gamme (§4.1), à se pencher sur sa décomposition et aux usages associés à ces différents niveaux de gamme (§4.2). On examinera (§4.3), différentes projections possibles d'une gamme détaillée, correspondant à des documents rencontrés sur le terrain ; cette typologie permet de mieux structurer la recherche d'informations. Un ensemble de règles d'agrégation permettant de passer d'un niveau de détail dans la description des processus à un niveau moins fin est proposé au §4.4. Quel que soit le niveau de détail retenu, la modélisation de processus complexes par un simulateur peut conduire à une prolifération d'« éléments » nécessaires à leurs descriptions, ce qui en complique la création, la compréhension et la maintenance. On peut limiter fortement cette prolifération en mobilisant quelques principes lors de la création un modèle de simulation (§4.5).

4.1 Les constituants d'une gamme

Le pivot des informations techniques est la gamme. D'une manière générale, la gamme de production d'un produit se définit par l'utilisation d'un ou plusieurs produits possédant des caractéristiques requises, combinés dans des quantités prédéterminées, pour obtenir, au bout d'un certain temps (temps opératoire), à l'aide d'un ensemble de ressources matérielles (machines, outillage...) et humaines (opérateurs) que l'on peut considérer comme constituant un processeur, le produit désiré (ou plusieurs produits dans le cas de productions liées). Cette définition générale amène les remarques suivantes.

- Les caractéristiques morphologiques et/ou spatiales du produit sortant sont différentes de celles des produits entrants, ce qui distingue le processeur d'un stock. Une opération de transport modifie les caractéristiques de localisation d'un ou plusieurs produits.

- La liste des produits entrants et les quantités utilisées dans le processus de transformation définissent la nomenclature associée à la gamme ; les informations de quantités définissent les coefficients de nomenclature. Si des produits de nature différente sont utilisés, on est en présence d'une activité d'assemblage qui, d'un point de vue logique, se définit par l'utilisation d'une relation de type ET dans la combinaison de ces produits entrants. Cette activité d'assemblage peut éventuellement combiner un (ou plusieurs) produit(s) avec un autre choisi dans un ensemble de produits différents (modules alternatifs, par exemple) ; d'un point de vue logique, cette activité d'assemblage se définit alors par l'utilisation combinée de relations de type ET et OU.

- L'activité de production d'un bien s'effectue à l'aide de ressources matérielles (machines, outillage) et humaines.

La localisation des machines est normalement stable et définit le lieu de production. Les ressources humaines et, le cas échéant, en outillage, sont considérées comme nécessairement présents durant toute l'activité. Ils peuvent être rattachés durablement au lieu de production ou partagés par plusieurs activités.

- Dans le cas d'un processus continu, le concept de quantité de produits (entrants ou sortants) est à remplacer par celui de débit de ce produit et celui de temps opératoire, par celui de délai moyen (ou temps de séjour moyen) séparant l'entrée dans le processeur des produits, de leurs sorties.

La figure 3 décrit les constituants d'une gamme et leur « combinaison ». À chaque référence i d'un produit entrant est associé un coefficient de nomenclature q_i ; symétriquement, à chaque référence j d'un produit sortant est associée la quantité q_j produite par l'activité. Ces informations quantitatives (q_i et q_j) sont structurellement cohérentes.

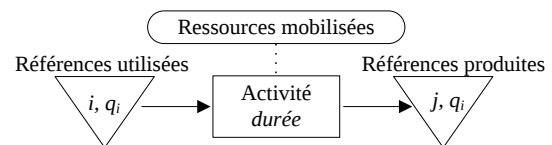


Figure 3. Représentation d'une gamme

4.2 Décomposition d'une gamme

La définition générale présentée ci-dessus permet de décomposer l'activité de production d'un produit, en un ensemble d'activités élémentaires, chacune étant caractérisée par une gamme élémentaire. On parlera alors de *gamme détaillée*. Ces activités élémentaires sont reliées par des relations logiques d'antériorité (une activité - aval ne pouvant commencer qu'une fois achevée l'activité - amont), dans lesquelles un produit créé à l'issue d'une activité élémentaire - amont est utilisé par l'activité élémentaire située en aval.

Ce graphe diffère d'un graphe de projet, lequel mobilise également les concepts d'activité et de relation d'antériorité, par l'explicitation des produits entrants et sortants.

Ce mécanisme de décomposition (zoom) peut se poursuivre, ce qui explique la coexistence de plusieurs types de gammes. Ces différentes gammes sont créées pour répondre à des besoins différents (commande temps réel, ordonnancement, planification). La gamme détaillée peut être considérée comme la description du processus de production du produit.

Ce mécanisme de décomposition ne doit pas occulter le fait que, dans la réalité, la connaissance de base est détaillée et que ces différentes gammes sont obtenues par agrégations successives. Le mécanisme de désagrégation d'un niveau de gamme est en fait un retour à l'information de la gamme détaillée d'origine, qui est généralement l'information de base disponible dans la recherche d'informations.

Nos objectifs de modélisation / simulation de la chaîne logistique étudiée sont différents de ceux qui sont à l'origine des différentes gammes rencontrées ; la création de gammes correspondant à la granularité découlant de nos objectifs (voir §2.3) s'appuie alors sur des gammes détaillées, l'utilisation d'un certain nombre de règles d'agrégation que l'on explicitera au § 4.4 et d'un ensemble de considérations relatives au niveau de détail pertinent.

4.3 Les différentes projections possibles d'une gamme détaillée

La connaissance de la gamme détaillée est au cœur de la modélisation. Les matériaux disponibles sur le terrain ne fournissent le plus souvent qu'une information partielle, éliminant certaines « dimensions » de la gamme détaillée. La présentation rapide de ces « projections » d'une gamme est utile pour pouvoir caractériser les documents recueillis et pointer les informations manquantes. On peut décider de remplacer l'activité par le « processeur » qui l'exécute et traiter les produits entrants ou sortants comme des stocks de ces produits, en distinguant autant de stocks différents qu'il en existe dans la réalité (exigence absente dans la description de la gamme). On aboutit alors à une *cartographie de processus* de production du (ou des) produit(s) rentrant dans le(s) stock(s) n'alimentant aucun processeur. Dans cette représentation, les distances entre processeurs peuvent ne pas être respectées. Les informations de temps opératoires et de coefficients de nomenclature (q_i et q_j) sont généralement omises, ainsi que la liste des ressources partagées. Il convient alors de préciser les informations manquantes et les obtenir par d'autres sources pour pouvoir disposer de toutes les informations techniques nécessaires à la modélisation. La superposition de plusieurs cartographies de processus mobilisant un même ensemble de processeurs conduit à une *cartographie des flux*. Dans cette représentation, les différents arcs entre deux nœuds du graphe (correspondant à autant de références différentes) peuvent être fusionnés pour faciliter la lisibilité de la représentation obtenue. Sans information complémentaire sur les cheminements associés à chaque gamme, il y a perte d'information. Cette information complémentaire peut prendre la forme d'une gamme paramétrée. Un document que l'on obtient facilement est une *cartographie d'implantation*. Cette représentation peut être considérée comme une projection d'une cartographie des flux, dans laquelle les flux sont éliminés pour ne conserver que l'implantation physique des ressources matérielles (machines...). Dans cette représentation, les distances relatives sont normalement conservées. Cette cartographie permet souvent de mieux comprendre le fonctionnement d'un système productif complexe.

4.4 Règles d'agrégation

Les gammes détaillées recueillies sur le terrain ne correspondent généralement pas au niveau de détail souhaité. Une activité agrégée réunit l'ensemble des activités élémentaires de la gamme détaillée, ainsi que les pro-

duits échangés entre ces activités élémentaires. On retrouve ici une problématique d'agrégation proche de celle rencontrée en gestion de projet (Giard, 2003), avec quelques caractéristiques spécifiques induites par le fait que l'on est en présence d'une production répétitive en régime de croisière. Quatre règles doivent être mobilisées dans le mécanisme d'agrégation de gammes élémentaires.

4.4.1 Règle d'héritage sur les relations d'antériorité

Les relations d'antériorité liant des activités élémentaires fusionnées dans une activité agrégée disparaissent, de même que les produits échangés entre ces activités élémentaires. L'activité agrégée hérite des relations d'antériorité liant l'une de ses activités élémentaires à une activité amont ou aval, non-intégrée dans l'activité agrégée, ce qu'illustre la figure 4 où les activités A_1 et A_2 (schéma de gauche) sont fusionnées dans l'activité A (schéma de droite).

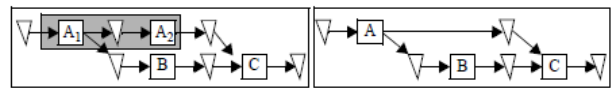


Figure 4. Règle d'héritage des relations d'antériorité

4.4.2 Règles de consolidation des durées

L'analogie pointée plus haut avec la gestion de projet permet de définir la durée de l'activité agrégée τ comme égale à la durée du chemin critique calculé sur le graphe de la gamme détaillée, en l'absence de cycle. On notera τ_0 le temps le plus long de l'activité élémentaire située sur le chemin critique, information que l'on utilisera par la suite. Cette règle de consolidation des durées est à utiliser en tenant compte des trois remarques suivantes.

- En gestion de projet, une activité n'est exécutée qu'une fois. En production discrète, le processeur qui exécute une activité ne traite qu'un seul lot (lequel peut être unitaire) et n'accepte un nouveau lot qu'une fois totalement traité le lot précédent. L'adaptation directe de ce principe à l'activité agrégée conduit à une représentation inexacte la réalité, puisque le processeur exécutant la première activité élémentaire de l'activité agrégée est en mesure d'exécuter un nouveau lot dès qu'il a achevé le lot en cours, sans attendre que le lot qu'il vient de traiter soit sorti du processeur exécutant la dernière activité élémentaire de l'activité agrégée. La modélisation / simulation du sous-système étudié doit nécessairement en tenir compte. Pour les processus discrets, une solution possible consiste à représenter le processus exécutant l'activité agrégée par $n = \lceil \tau / \tau_0 \rceil$ processeurs parallèles identiques : ces processeurs, d'une capacité unitaire, sont caractérisés par la même durée τ ; ils prélèvent tous le produit principal traité par le processus associé à la gamme agrégée dans un stock unique qui alimenté avec un intervalle de temps τ_0 (ce qui conduit à un taux d'utilisation de ces processeurs parallèles égal à $\{n \cdot \tau_0\} / \tau$). La connaissance de τ et τ_0 est indispensable pour pouvoir travailler à ce niveau d'agrégation.

- Pour les processus continus, la solution de discrétisation des flux proposée au §2.2 permet de sommer facilement les durées, à condition que le processus ne comporte pas de cycle.

- Il est évident que la durée τ de l'activité agrégée n'est valide qu'en l'absence de rupture de stock, empêchant l'exécution d'une activité élémentaire se trouvant sur le chemin critique. Par ailleurs, si les stocks intermédiaires accueillant les produits échangés entre les activités élémentaires ne sont pas initialement vides, la durée associée à la gamme agrégée peut être considérée comme inchangée, même si le temps de séjour dans le sous-système étudié, d'un produit progressivement modifié par ce sous-système s'en trouve nécessairement accru. Il suffit, en effet, de considérer que la règle « dernier arrivé - premier sorti » s'applique à tous ces stocks et de considérer les unités excédentaires appartenant à des stocks de sécurité ou des stocks dormants. On peut ajouter que des stocks intermédiaires minimaux peuvent être souhaités pour faire face à des perturbations car, sans cette contrainte, on doit observer une rapide accumulation de ces stocks en amont de l'activité ayant la durée τ_0 .

4.4.3 Règles de consolidation des ressources

Les ressources mobilisées par chaque activité élémentaire sont toutes mobilisées par l'activité agrégée. L'application de ce principe en gestion de projet pose un problème car il est évident que la mobilisation d'une ressource non-stockable par une activité agrégée n'implique pas son utilisation pendant toute l'exécution de cette activité.

Dans le contexte de modélisation / simulation d'un processus de production, cette objection ne doit pas être reprise si les propositions faites au paragraphe précédent pour permettre à ce processus de traiter simultanément n lots sont mobilisées car, à un instant quelconque, toutes les ressources non-stockables sont simultanément utilisées par les n lots.

La prise en considération des ressources non-stockables dans le processus d'agrégation de gammes détaillées conduit à la mise en évidence de deux principes qui limitent les possibilités d'agrégation en raison des caractéristiques de certaines ressources non-stockables.

- Les ressources en personnel (et outillage) doivent être dédiées à l'activité agrégée car la non-disponibilité d'une ressource utilisée par une activité élémentaire et partagée avec d'autres activités n'appartenant pas à l'activité agrégée, interrompt l'exécution du processus.

- Les ressources en prestations d'utilisation de machines sont conditionnées par leurs disponibilités. On a intérêt à isoler les activités mobilisant des machines sujettes à des pannes fréquentes afin de pouvoir intégrer les opérations de maintenance curative dans la modélisation.

4.4.4 Règles de conservation des flux

Ce mécanisme d'agrégation doit respecter le principe de conservation des flux : en régime de croisière, ce qui rentre dans le processus (exprimé en poids ou...) est

nécessairement égal à ce qui en sort, sachant que certains produits sortants peuvent correspondre à des déchets.

4.5 Principe de parcimonie

Pour des raisons de compréhension et de maintenance, la modélisation proposée doit être la plus dense possible, au niveau de détail retenu pour décrire les processus. Trois principes doivent être mobilisés pour contenir cette prolifération et faciliter la création, le contrôle de validité et la maintenance d'une modélisation / simulation.

- Le *principe de paramétrisation* permet de décrire un ensemble de processus mobilisant un même ensemble de ressources productives, par des gammes paramétrées pouvant porter sur des nomenclatures, des temps opératoires et, même, une partie du routage si celui-ci s'écarte à la marge du routage principal dans le processus. À chaque instance de l'ensemble de ces paramètres correspond une gamme particulière de production d'un bien ou d'un service.

- Les outils de M/S permettent de créer un nouveau composant à partir de composants de base (processeurs, stocks...), ce qui présente l'avantage de permettre une modélisation hiérarchique, l'ouverture d'un composant créé correspondant à l'ouverture d'un sous-modèle. Bien évidemment, ces *composants créés* peuvent être répliqués dans la modélisation de processus complexes. Le *principe de récursivité* peut également être mobilisé de manière intéressante, un composant que l'on crée pouvant faire appel à des composants créés préexistants.

- Le *principe de réplique* permet une description unique d'un processeur (ou d'un composant créé) lorsqu'il existe en plusieurs exemplaires dans le système productif étudié.

5 EXEMPLES D'APPLICATION DE CES PRINCIPES DANS LA FORMALISATION DES DONNÉES RECUEILLIES

On illustrera l'application des principes retenus par quelques exemples de recueil et de transformation des informations. Les données présentées ici sont fictives. Faute de place, aucun exemple des données primaire ne sera fourni. Des cartographies d'implantation accompagnent le plus souvent les textes utilisés et ne sont pas présentées en tant qu'exemple, le traitement de l'ensemble des informations permettant d'obtenir une information plus complète. La figure 5 décrit la configuration de la SC de l'OCP et met en perspective les exemples de recueils transformés et formalisés.

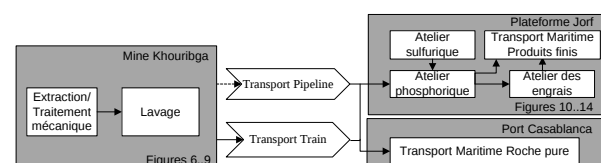


Figure 5. Modélisation macroscopique de la Supply chain de l'OCP

5.1 Exemple 1. Obtention d'une cartographie des flux

Un ensemble de documents a été traité pour tenter une première modélisation de la partie extraction du minerai de la SC étudiée. Les informations primaires sont des textes de description de processus et de ressources mobilisées, sans pouvoir disposer de toutes les informations des gammes implicitement mobilisées. Au final, on obtient une cartographie des flux et une liste d'informations complémentaires à trouver. Dans la représentation suivante, le système étudié traite trois types de flux ; un zoom est proposé sur l'une des activités. Le niveau de granularité présenté ici est donné à titre indicatif.

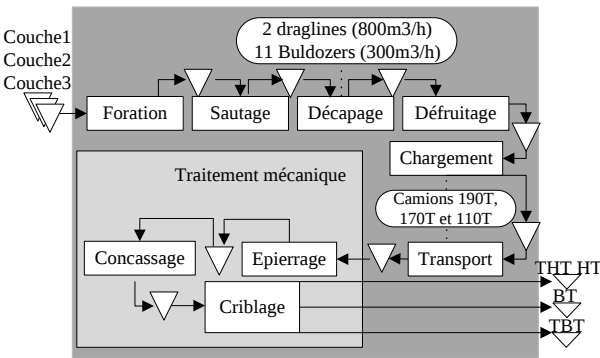


Figure 6. Exemple de cartographie des flux – extraction du phosphate

5.2 Exemple 2. Obtention de gammes détaillées presque complètes – passage à une gamme paramétrée

La documentation relative au processus d'une chaîne de lavage du minerai (texte, tableaux, cartographies) est relativement complète (quelques informations encore manquantes), sachant que le site de lavage comporte six chaînes de lavage identiques. Elle met en évidence des différences liées au type de minerai traité, en termes de procédés et de ressources mobilisées et de circulation des flux. La première étape de traduction de ces données est la création d'une gamme détaillée pour chaque type de minerais entrants, le produit sortant (« concentré de lavage », selon la terminologie utilisée) étant toujours le même. La figure 7 illustre l'une de ces 4 gammes détaillées ; elle comporte les informations de débit et de temps moyen de séjour. Le principe de conservation des flux est respecté ($300 = 33,2 + 59,7 + 169,9 + 37,2$), étant entendu que dans les informations retenues, l'apport en eau n'a pas été pris en compte). Le temps moyen de séjour est approximativement de 26,4' ; la présence d'un cycle rendant ce calcul un peu plus compliqué (ce résultat a été obtenu par simulation). La figure 8 illustre la gamme agrégée qui découle de cette gamme détaillée. On peut ajouter que ces informations sont valables en régime de croisière ; il en sera de même dans les exemples suivants. La juxtaposition des 4 gammes détaillées permet d'établir la figure 9, modélisant une

gamme paramétrée ; la numérotation des arcs permet, dans le tableau 1, de retrouver les informations de débit (par exemple, la ligne C₂ correspondant aux informations de la figure 7) ; la neutralisation possible d'un arc est indiquée par un tiret. Un tableau similaire (non reproduit ici) fournit les temps moyen de séjour des activités pour chacune des productions possibles.

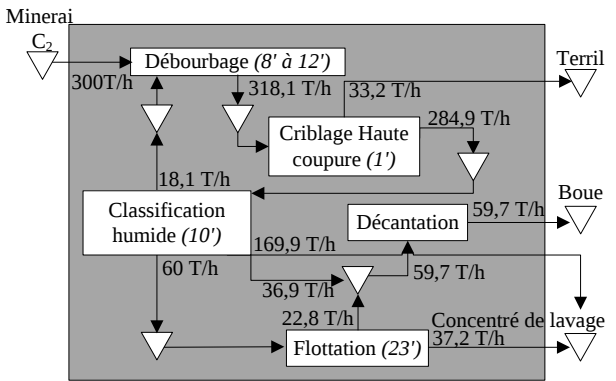


Figure 7. Exemple de gamme détaillée complète - lavage du minerai C₂

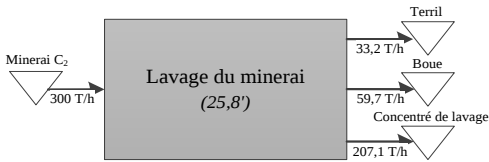


Figure 8. Exemple de gamme agrégée complète - lavage du minerai C₂

Intrant	N°Flux	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
C ₂	300	318	33	285	60	170	37	-	-	-	-	37	-	23	60	18	60	
C ₃₁	300	335	30	305	73	77	60	137	60	77	42	71	18	44	122	35	122	
C ₃₂	300	327	13	314	397	95	36	178	539	882	73	120	35	?	?	27	?	
C ₃₃	300	335	72	328	524	103	51	145	305	94	70	94	32	?	?	35	?	

Tableau 1. Débits (tonnes/heure) de la gamme paramétrée de la figure 8.

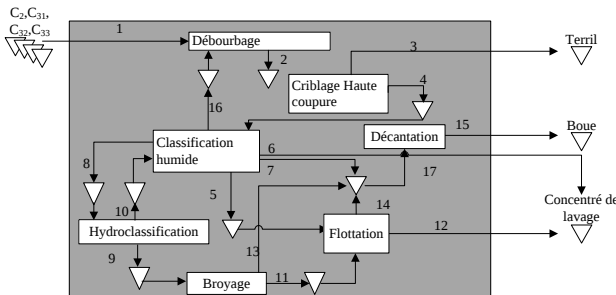


Figure 9. Exemple de gamme paramétrée – lavage des minerais

5.3 Exemple 3. Utilisation des principes d'agrégation et de réplcation

L'analyse des informations (textes, cartographies...) obtenues sur le fonctionnement d'une ligne de production d'acide sulfurique conduit à la figure 10 qui correspond à une gamme détaillée incomplète, en l'absence d'informations sur des durées moyennes des activités.

Les informations de débits sont disponibles et on peut vérifier que le principe de conservation des flux est respecté ($23,4+20,3+26,4 = 0,1+70$).

Deux remarques complémentaires doivent être faites :

- On peut passer de la gamme détaillée à une gamme agrégée (figure 11) respectant les règles d'agrégation énoncées au §3.1, en particulier, ressources dédiées et absence de problème important de fiabilité de certains processeurs. Cette gamme reste incomplète, en raison de l'absence d'information sur les temps de séjour. Cette gamme peut être associée à un composant créé dans le modèle de simulation.

- L'atelier de production d'acide sulfurique comporte six lignes identiques, puisant dans les mêmes stocks en entrée et utilisant les mêmes stocks en sortie. Dès lors, il est inutile de multiplier les modèles, il suffit de déclarer la « réplication » en six exemplaires de ce composant de base venant d'être créé, ce qu'illustre la figure 12.

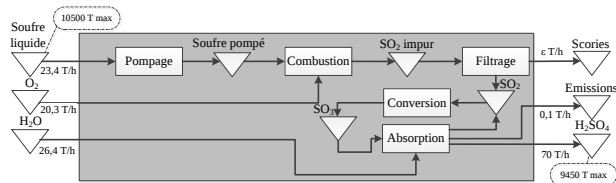


Figure 10. Exemple de gamme détaillée incomplète – ligne de production d'acide sulfurique

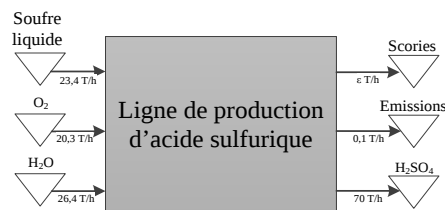


Figure 11. Exemple de gamme agrégée incomplète et de création d'un composant

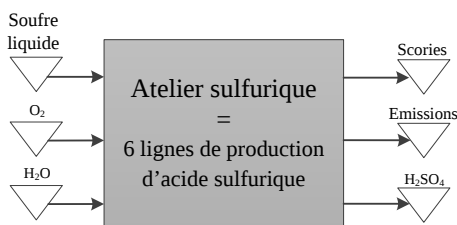


Figure 12. Exemple de réplication d'un composant

5.4 Exemple 4. Application de la récursivité - l'approche Plug & Play

Le concept de récursivité peut être utilisé pour créer des « super-composants », à considérer comme une catégorie particulière de composants. Sur la plateforme de Jorf, l'OCP possède en propre, trois ateliers organisés en *flow shop*, décrits dans la figure 13 ; à droite de ce schéma figurent différentes catégories d'engrais. Les ateliers de production d'acide phosphorique et d'engrais sont représentés chacun par un composant obtenu par le même processus de création que celui utilisé pour créer le com-

posant « atelier sulfurique ». Les productions d'acide sulfurique et d'acide phosphorique sont mises dans des stocks externes car ils peuvent être aussi bien utilisés par les ateliers de l'OCP que par ceux des *Joint Venture* de Jorf.

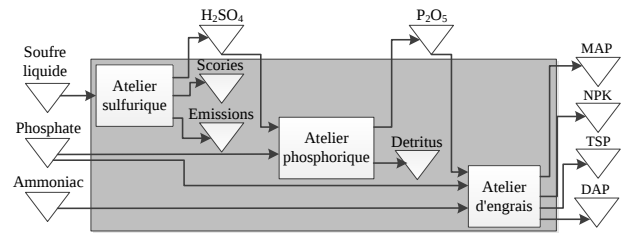


Figure 13. Exemple d'application de la récursivité

Ce super-composant peut être représenté de manière synthétique par la figure 14.

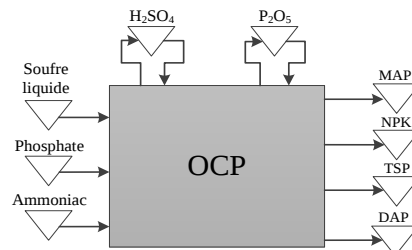


Figure 14. Exemple de super-composant

Les JV de Jorf se caractérisent par des structures de production dérivées de celles de l'OCP. Elles peuvent ne venir se « greffer » que sur le stock d'acide sulfurique, qu'elles ne produisent pas, ou que sur celui d'acide phosphorique, auquel cas, elles ne produisent que des engrais. La plateforme de Jorf est donc composée de l'unité productive de l'OCP sur laquelle viennent se greffer les unités productives des JV. Cette configuration de type *plug and play* conduit à une modélisation décrite par la figure 15, dans laquelle on a intégré la JV indienne (IMACID) productrice d'acide phosphorique, la J.V. brésilienne (BUNGE), productrice d'acide phosphorique et d'engrais et une JV en cours d'étude, à des fins d'illustration de la généralité de la démarche. En termes de modélisation, il suffit d'utiliser une paramétrisation du composant OCP pour être en mesure de décrire ce complexe industriel de Jorf avec une granularité suffisante pour les objectifs de pilotage ; bien évidemment reste à décrire l'alimentation des stocks de matières premières et l'enlèvement des produits destinés à la vente.

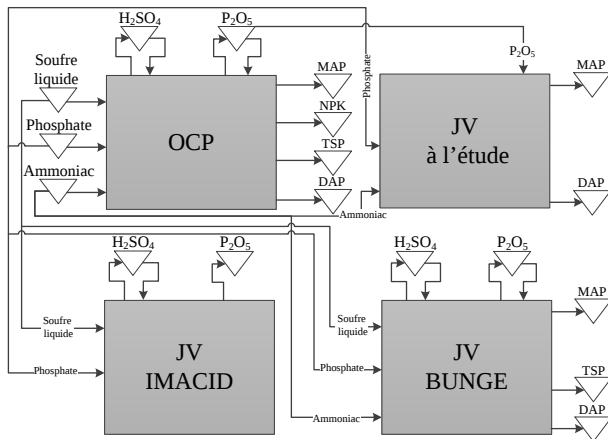


Figure 15. Exemple de *plug and play*

6 CONCLUSION

Nous avons proposé dans cet article de modéliser un processus logistique complexe à l'aide d'une approche par les gammes. Cette démarche s'inscrit ainsi dans le cadre du BPM mais le dépasse car l'usage des connaissances recueillies (une combinaison mixte de contrôle de gestion et de pilotage des flux physiques) constitue une approche innovante, et les implications scientifiques et managériales associées à cette recherche sont multiples. L'approche proposée semble avoir un large spectre d'applications ; il est par contre évident que la pertinence des SAD qui se fondent sur la modélisation du fonctionnement de la SC est liée à la nature de la SC étudiée et à la particularité inhabituelle qu'elle présente d'être constituée réellement d'une seule firme pivot totalement intégrée. Les perspectives sont multiples :

- Le couplage de la modélisation «des niveaux opérationnels» devrait déboucher rapidement sur des applications d'aide à la décision reprenant à la fois des critères physiques et financiers.
- La construction d'un référentiel de performance logistique unique permettant un suivi des opérations du début à la fin du processus de production constitue un autre enjeu du projet.
- La construction de schéma de valorisation des activités en temps réel devrait également modifier les référentiels associés au contrôle de gestion industriel.

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilar-Savén, R.S., 2004. Business process modelling:- review and framework. *International Journal of Production Economics*, 90, p.129-149.
- Agyapong-Kodua K., Wahid B.M., Weston, R.H., 2011. Towards the derivation of an integrated process cost-modelling technique for complex manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 49(24), p. 7361-7377.
- Cooper R., Kaplan R., 1991. *The Design of Cost Management System*, 2nd Ed., Prentice Hall International, London, Englewood Cliffs.
- Danese P., Romano P., Vinelli A., 2004. Managing business processes across supply networks : the role of coordination mechanisms, *Journal of Purchasing & Supply Management*, 10, p. 165-177.

- Davis J.P., Eisenhardt K.M., Bingham C.B., 2007. Developing theory through simulation methods. *Academy of Management Review*, 32(2) , p.480-499.
- Fenies P., Tchernev N., 2012. From Advanced Planning System to Advanced Budgeting System: The Next Step in Supply Chain Management Software, Business, Management and Economics. In *Pathways to Supply Chain Excellence*, Ales Groznik and Yu Xiong éditeurs, ISBN 978-953-51-0367-7, www.intechopen.com.
- Gartner, 2014. Application Development and Maintenance Research Note M-16-8153, The BPA Market Catches another Major Updraft. Available from: <http://www.gartner.com>.
- Giard, V. et Midler, C. (éditeurs), 1993. *Pilotages de projet et entreprises: diversité et convergences*, Economica,
- Giard, V., 2003. *Gestion de la production et des flux*, Economica.
- Grigoria D., Casati F., Castellanos M., Dayal U., Sayal M., Shan M., 2004. Business Process Intelligence, *Computers in Industry*, 53, p.321-343.
- Gupta A., 2001. A four-faceted Knowledge Based Approach to surmounting borders, *Journal of knowledge management*, 5(4), p.291-299.
- Hammer M., Champy J, 1993. *Le Reengineering: Réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances*, Dunod.
- Hammer M., Herbst J., Kleiner N., 2006. Interactive workflow mining - requirements, concepts and implementation. *Data & Knowledge Engineering*, 56, p. 41-63.
- Hult G.T.M., Ketchen Jr. D.J., Slater S.F., 2004. Information processing, knowledge development, and strategic supply chain performance, *Academy of Management Journal*, 47(2), p. 241-253.
- Keen P.G.W., Scott Morton M.S., 1978. *Decision support system: an organizational perspective*, Addison Wesley.
- Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S., 1997. Information distortion in a Supply Chain: the bullwhip effect, *Management Science*, 43(4), p. 546-558.
- Madhusudan T., Zhao L.J., Marshall B., 2004. A case-based reasoning framework for workflow model management, *Data & Knowledge Engineering*, 50, p. 87-115.
- Raghu T.Z, Vinze R., (2005) A business process context for Knowledge Management, *Decision Support Systems*, 33, p. 123-146.
- Scheer A.W., 2002. *ARIS – Des processus de gestion au système intégré d'applications*, Springer, Heidelberg.
- Schulze M., Seuring S., Ewering C., 2011. Applying activity-based costing in a supply chain environment. *International Journal of Production Economics*, 135, p.716 -725.
- Seshasai S., Gupta A., Kumar A., 2005. An integrated and collaborative framework for business design: A knowledge engineering approach, *Data & Knowledge Engineering*, 52, p.157-179.
- Solte D., Stegmann R., 2000. Federated management of distributed data and services, *Computers in Industry*, 43(3), p. 203-210.
- Stadtler H., Kilger K. 2007. *Supply Chain Management and Advanced Planning: Concepts, Models, Software, and Case Studies*, Springer.
- Van der Aalst W.M.P., Hofstede A.H.M., Weske M., 2003. Business process management: A survey, in W.M.P, *Lecture Notes in Computer Science*, 2678, p. 1-12.
- Vernadat, F., 1996. *Enterprise Modelling and Integration: Principles and Applications*, Chapman & Hall.
- Weske M., Van der Aalst W.M.P, Verbeek H.M.W., 2004. Advances in business process management, *Data & Knowledge Engineering*, 50, p. 1-8.