Modèles d'aide à la décision en supply chain : management et valorisation économique : principes méthodologiques et applications

Najat Bara

▶ **To cite this version:**

Najat Bara. Modèles d'aide à la décision en supply chain : management et valorisation économique : principes méthodologiques et applications. Gestion et management. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2020. Français. NNT : 2020PA01E028 . tel-03295942

HAL Id: tel-03295942

https://theses.hal.science/tel-03295942

Submitted on 22 Jul 2021

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 PARIS 1
PANTHÉON SORBONNE

UNIVERSITE PARIS I PANTHÉON SORBONNE
IAE PARIS

Laboratoire de rattachement : GREGOR

THÈSE
Pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de Gestion
Présentée et soutenue publiquement
Le 10 DÉCEMBRE 2020 par

Najat BARA

Titre de la thèse
Modèles d'aide à la décision en Supply Chain Management et valorisation économique : principes méthodologiques et applications

Sous la direction de M. Frédéric GAUTIER
Professeur, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Membre du Jury
Mme. Catherine Kuszla, Professeur, Université Paris Nanterre
M. Pierre Fénièss, Professeur, Université Paris 2 Panthéon-Assas
M. Nicolas Cheimanoff, Professeur, EMINES-Université Mohammed VI Polytechnique
M. Vincent Giard, Professeur émérite, Université Paris Dauphine
M. Olivier de La Villarmois, Professeur, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
M. Jean-Loup Richet, Maître de Conférences, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

EMINES
School of Industrial Management
UNIVERSITÉ MOHAMMED VI POLYTECHNIQUE

UNIVERSITÉ PARIS 1
PANTHÉON SORBONNE

UNIVERSITE PARIS I PANTHÉON SORBONNE
IAE PARIS

Laboratoire de rattachement : GREGOR

THÈSE
Pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences de Gestion
Présentée et soutenue publiquement
Le 10 DECEMBRE 2020 par

Najat BARA

Titre de la thèse
Modèles d'aide à la décision en Supply Chain Management et valorisation économique : principes méthodologiques et applications

Sous la direction de M. Frédéric GAUTIER
Professeur, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Membre du Jury
Mme. Catherine Kuszla, Professeur, Université Paris Nanterre
M. Pierre Féniès, Professeur, Université Paris 2 Panthéon-Assas
M. Nicolas Cheimanoff, Professeur, EMINES-Université Mohammed VI Polytechnique
M. Vincent Giard, Professeur émérite, Université Paris Dauphin
M. Olivier de La Villarmois, Professeur, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
M. Jean-Loup Richet, Maître de Conférences, IAE Paris Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

EMINES
School of Industrial Management
UNIVERSITÉ MOHAMMED VI POLYTECHNIQUE

Remerciements

Je commence par exprimer ma gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse le Professeur Frédéric Gautier d'avoir accepté de diriger ma thèse. Je souhaite le remercier profondément pour son encadrement. Son aide et ses critiques m'ont été très constructives. J'ai énormément appris à ses côtés. Son expertise, sa disponibilité, sa gentillesse et sa modestie m'ont permis d'être très épanouie pendant ma thèse. Je lui adresse tous mes respects.

J'adresse mes vifs remerciements aux Professeurs Catherine Kuszla et Pierre Féniès, qui ont bien voulu rapporter sur mon travail de thèse. Grâce à leurs remarques lors de la présoutenance, j'ai pu améliorer la qualité du manuscrit final.

Grand Merci également aux Professeurs Nicolas Cheimanoff, Olivier de La Villarmois, Vincent Giard et Jean-Loup Richet d'avoir accepté d'être membres du jury de ma thèse. Le Professeur Giard m'a non seulement initiée au monde de la recherche, mais m'a prodigué de conseils pendant toute ma thèse. Je le remercie infiniment pour son aide, réactivité et générosité permanentes. Je lui suis reconnaissante.

Je remercie particulièrement le Professeur Frédéric Fontane pour ses conseils, ses encouragements, son écoute et son suivi permanent.

Je remercie également Madame Selwa El Firdoussi, Enseignant Chercheur à l'EMINES, pour son aide et sa bienveillance.

Je tiens à adresser mes remerciements à Monsieur Ilyas Rakhis, Vice-Président Supply Chain de l'OCP, de m'avoir ouvert la porte pour réaliser ma thèse dans un terrain réel à savoir celui de la chaîne logistique du site de Jorf de l'OCP.

Je remercie vivement les opérationnels de l'entité MP34 à Jorf, en particulier le secrétariat technique des engrais, pour le temps qu'ils m'ont accordée pour effectuer les entretiens.

Je tiens par la même occasion à remercier Monsieur Mohamed Amine Bousseta, manager contrôle de gestion et facturation à Jorf, et son équipe pour leur disponibilité.

Je tiens à remercier l'IAE Paris et l'Université Paris 1 Panthéon Sorbonne de m'avoir accueillie pour faire mon doctorat.

Mes vifs remerciements et ma gratitude vont à l'EMINES, dirigée par le Professeur Nicolas Cheimanoff, de m'avoir offert l'opportunité de réaliser mes recherches dans un environnement très stimulant et d'avoir financé ma thèse, séminaires et congrès scientifiques internationaux auxquels j'ai pu participer. Je remercie également tout le personnel de l'EMINES.

Je remercie mes meilleures amies : Camelia pour son écoute et sa bienveillance ; les jumelles Meryem et Mouna pour leur gentillesse et la bonne compagnie pendant ces quatre années passées au campus de l'EMINES.

Finalement, je remercie ma mère, mes sœurs et frères et mes beaux-frères Lahcen et Said pour leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À ma chère mère : quoi je dise je ne saurai pas exprimer mes remerciements comme il se doit. Je suis très fière de la personne que tu es. Tu m'es toujours une école de sagesse, de patience et d'affection.

À la mémoire de mon père disparu trop tôt. Merci de m'avoir mise sur ce bon chemin qui m'a menée aux belles aventures que je vis.

À mes chères sœurs et mes chers frères que j'aime beaucoup. Les moments qu'on a vécus ensemble depuis l'enfance ont fait de moi la personne que je suis.

Et à mon beau-frère Lahcen pour qui j'ai une grande estime.

Résumé

Pour améliorer leurs processus de prise de décision, les managers aux différents niveaux hiérarchiques peuvent utiliser des modèles de décision. Un modèle embarque une représentation du système physique et un critère de choix pour la comparaison des décisions alternatives, ce critère est souvent fondé sur une valorisation économique. Chaque modélisation physique donnée nécessite une valorisation économique adéquate. La représentation faite d'un système physique dans un modèle diffère d'un niveau de décision à un autre (ex. objectifs, niveau de granularité, étendue de l'horizon temporel, du périmètre physique). Ces différences peuvent engendrer des problèmes d'infaisabilité et d'incohérence dans le processus de planification. L'incohérence des décisions peut avoir lieu également quand le modèle est fondé sur une valorisation économique qui n'est pas appropriée aux décisions étudiées. Notre thèse a deux objectifs : le premier consiste à pointer les défis posés par les modèles de décision, en termes de représentation et de cohérence dans une chaîne logistique. Le second consiste à identifier les principes que doivent fonder l'utilisation de la valorisation économique dans ces modèles de décision et qui participent à la cohérence.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une Recherche-Intervention conduite au sein de la chaîne logistique du site de Jorf du Groupe OCP. La mission confiée consiste à améliorer l'efficacité et l'efficience globales par l'aide à la décision au niveau opérationnel. Dans le cadre de ce projet, deux modèles d'aide à la décision au niveau opérationnel ont été développés : le premier est un simulateur de la production, il part d'un ensemble de décisions prises par les opérationnels et en vérifie la cohérence. En cas d'incohérences, le simulateur aide, en faisant appel à l'expertise des opérationnels, à une exploration rapide des décisions alternatives. Le deuxième modèle est un optimiseur encapsulé dans un système interactif d'aide à la décision d'ordonnancement des lignes de production des engrais. Notre document vise à expliquer comment ces modèles peuvent améliorer le processus de prise de décision opérationnel dans le site de Jorf, et favoriser son alignement avec la planification tactique (assurée par un modèle d'optimisation). Concernant le volet valorisation économique, cette thèse présente les principes d'une approche de valorisation économique appropriée aux décisions à court terme. La description d'une étude de cas, montrant la pertinence de cette approche pour le système interactif d'aide à la décision à l'ordonnancement, est présentée. Cette réflexion sur la

valorisation économique montre la forte dépendance entre la modélisation physique et la valorisation économique et souligne la nécessité de la coopération entre les spécialistes de la modélisation, les managers de la chaîne logistique et les spécialistes de la comptabilité de gestion afin de pourvoir définir à chaque contexte décisionnel modélisé la valorisation économique pertinente.

Summary

To improve their decision-making processes, managers at different hierarchical levels can use decision models. A model embeds a representation of the physical system and a choice criterion for the comparison of decision alternatives, this criterion is often based on an economic evaluation. Each physical modeling requires an adequate economic evaluation. The representation made of a physical system in a model differs from one decision level to another (e.g. objectives, level of granularity, extent of time horizon, physical perimeter). These differences can lead to problems of infeasibility and inconsistency in the planning process. Decision inconsistencies can also occur when the model is based on an economic evaluation that is not appropriate for the decisions under review. Our thesis has two objectives: the first one consists in addressing the challenges of decision models in terms of representation and supply chain alignment. The second objective consists in identifying the principles that should underlie the use of economic evaluation in decision models and which contribute to coherence.

This thesis fits in a clinical research project carried out within the supply chain of OCP Group's Jorf site. The mission is to improve the global efficiency and effectiveness through decision making support at the operational level. Two operational decision models have been developed during this project: the first one is a production simulation model, it starts from a set of operational decisions taken by the operational managers and checks their consistency. In the case of inconsistencies, the simulation model helps, by relying on the operational staff expertise, to quickly explore alternative decisions. The second model is an optimization model encapsulated in an interactive decision support system of fertilizer production lines scheduling. Our manuscript aims to explain how these models can improve the operational decision-making process at the Jorf site and favors its alignment with the tactical planning (provided by an optimization model). Concerning the economic evaluation aspect, this thesis presents the principles of an economic evaluation approach bespoke for operational decisions. The

description of a case study, showing the relevance of this approach for the scheduling interactive decision support system, is presented. This reflection on economic evaluation shows the strong dependency between physical modeling and economic evaluation and underlines the necessity of cooperation between modeling specialists, supply chain managers and management accounting specialists in order to be able to define the relevant economic evaluation for each modeled decision context.

Mots-clés

Chaîne logistique – Management de la chaîne Logistique – Recherche-Intervention

Cohérence – Modèle de décision – Optimisation – Simulation

Valorisation économique – Coût pertinent – Coût différentiel – Coût d'opportunité

Keywords

Supply Chain – Supply Chain Management – Clinical research

Coherence – Decision model – Optimization – Simulation

Economic evaluation – Relevant cost – differential cost – Opportunity cost

Table des matières

Remerciements 7

Dédicace 9

Résumé 10

Summary 11

Mots-clés 12

Keywords 12

INTRODUCTION GÉNÉRALE 17

CHAPITRE 1 22

CADRE SCIENTIFIQUE – L'APPORT DES MODÈLES DE DÉCISION EN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT 22

1. INTRODUCTION 23

2. LA CHAÎNE LOGISTIQUE DOMAINE D'ÉTUDE 23

2.1 Les flux d'une chaîne logistique 24

2.2 La structure d'une chaîne logistique 26

2.3 La nature d'une chaîne logistique 26

2.4 Modes de production dans une chaîne logistique 27

3. LE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT 28

3.1 Mesure de la performance 29

3.2 Prise de décision en Supply Chain Management 29

4. MODÈLES D'AIDE À LA DÉCISION 42

4.1 Modèles de décision 42
4.2 Systèmes d'Aide à la Décision 45
4.3 Les défis de la modélisation physique 49
4.4 Les enjeux de la valorisation économique dans l'alignement par les modèles 53
5. CONCLUSION 55
CHAPITRE 2 57
MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODOLOGIE RECHERCHE-INTERVENTION POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE GLOBALE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE INTÉGRÉE DE JORF DE L'OCP 57
1. INTRODUCTION 58
2. RECHERCHE-INTERVENTION 58
3. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE MIS EN ŒUVRE 61
3.1 Présentation du terrain 62
3.2 Modélisation physique 71
3.3 Valorisation économique 84
3.4 Validation et expérimentation 88
4. CONCLUSION 92
CHAPITRE 3 93
DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES DÉCISIONNELS POUR LE PILOTAGE OPÉRATIONNEL DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE CHIMIQUE DE JORF 93
1. INTRODUCTION 94
2. NIVEAU DE GRANULARITÉ RETENU DANS LA MODÉLISATION 94
2.1 Concept de la gamme opératoire 95

2.2 Règles d'agrégation 96
2.3 Exemple d'application des principes d'agrégation 98
3. MODÉLISATION D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE HYBRIDE PAR LA SIMULATION À ÉVÉNEMENTS DISCRETS 99
3.1 Problèmes méthodologiques posés par la modélisation/simulation d'une Chaîne Logistique Hybride 101
3.2 Revue de littérature 109
3.3 Principes de modélisation d'une chaîne logistique hybride par la SED 112
3.4 Simulateur de la production de Jorf 122
4. SYSTÈME INTERACTIF D'AIDE À LA DÉCISION D'ORDONNANCEMENT 130
4.1 Revue de littérature 131
4.2 Description du DSS et du modèle d'ordonnancement encapsulé 136
4.3 Exemple 142
5. CONCLUSION 145
CHAPITRE 4 148
ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES DÉCISIONS 148
1. INTRODUCTION 149
2. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES MODÈLES DE DÉCISION : REVUE DE LITTÉRATURE CRITIQUE 149
2.1 Cadre théorique 149
2.2 Méthodologie de la revue de littérature 160
2.3 Résultats de la revue 163
2.4 Discussion des résultats : pertinence et usage d'un système de coûts dans les modèles décisionnels 179

3. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU PILOTAGE OPÉRATIONNEL - UNE APPLICATION AUX DÉCISIONS D'ORDONNANCEMENT DES ATELIERS DES ENGRAIS 184

3.1 Description du contexte décisionnel 184

3.2 Principes retenus pour l'évaluation économique des décisions opérationnelles .. 187

3.3 L'utilisation des principes proposés pour l'évaluation économique des décisions d'ordonnancement des lignes de production parallèles 189

4. CONCLUSION 207

CONCLUSION GÉNÉRALE 210

1. SYNTHÈSE 210

2. RÉPONSE A LA QUESTION DE RECHERCHE 213

3. LIMITES PERSPECTIVES 214

LISTE DES FIGURES 217

LISTE DES TABLEAUX 220

RÉFÉRENCES 222

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'émergence des concepts de la Supply Chain et du Supply Chain Management (en français Chaîne Logistique et Management de la Chaîne Logistique respectivement) concurrence, depuis plusieurs années, les approches traditionnelles orientées gestion locale des systèmes de production. En effet, en raison des interdépendances fortes existant entre les entités d'une même organisation ou de différentes organisations, les entreprises deviennent de plus en plus conscientes de la nécessité de la coopération entre les maillons de leurs chaînes logistiques et de l'adoption d'une vision intégrée dans leurs approches de gestion. Soulignons qu'en matière de terminologie, nous avons choisi d'utiliser les termes de Chaîne Logistique (CL) et *Supply Chain Management* (SCM), qui sont moins ambigus dans les écrits français.

Dans la vision SCM ce qui est recherché c'est l'efficacité et l'efficience globales. Les décisions étant prises en différents lieux de la CL et à des niveaux hiérarchiques différents, le défi de la cohérence des décisions est essentielle : cohérence horizontale, visant la coordination ou l'intégration géographique des décisions, et cohérence verticale (cohérence entre stratégique, tactique et opérationnel) visant à articuler les différentes temporalités des décisions. Cette cohérence verticale entre les différents niveaux de décision avant l'action est qualifiée de phase de finalisation (Bouquin, 1994) et consiste à définir les finalités et à les traduire en objectifs quantifiés sur un horizon déterminé. Ayant déterminé sa stratégie, l'entreprise la transcrit en plan pluriannuel lequel va être décomposé en plans généralement annuels. Les plans annuels (plans d'action) décrivent les objectifs poursuivis, les moyens concrets qui seront mis en œuvre pour les atteindre, les responsables qui en auront la charge, les calendriers de ce déroulement. Ce n'est qu'une fois ces plans d'action définis qu'ils peuvent être traduits en programme d'activités (production, programme de prospection de clients, de réduction de coûts, de formation, etc.), au niveau des différentes entités, internes et externes, qui composent la CL.

De surcroît, pour améliorer leurs processus de prise de décision, les managers font souvent appel à des modèles de décision (généralement fondés sur une modélisation mathématique ou sur la simulation). Un modèle de décision consiste en une représentation simplifiée d'un système productif et d'un ou plusieurs problèmes décisionnels liés à la gestion de ce système productif. La représentation faite du système physique dans un modèle diffère d'un niveau de décision à un autre en termes d'objectifs, de périmètre physique couvert par le

modèle, de niveau de granularité des informations retenues, de l'horizon temporel considéré ou des contraintes considérées, etc. Dans le cadre du processus de planification, les résultats d'un modèle à un niveau de décision constitue, après désagrégation, l'entrée du ou des modèles du niveau de décision inférieur. Les différences en termes d'objectifs et d'agrégation, entre les modèles, peuvent conduire à des problèmes d'incohérence des plans d'action. Par ailleurs, pour choisir entre les alternatives de décision, un modèle a un objectif à *optimiser*, souvent fondé sur un critère économique (ex. marge, coûts). Un modèle embarque alors une description physique du système à piloter et un critère de choix. Les décisions fournies peuvent être incohérentes soit parce que le modèle est mal conçu (description retenue n'est pas adaptée) soit parce que la valorisation économique qui y est utilisée n'est pas appropriée aux décisions étudiées et la description physique retenue. Dans cette thèse nous nous intéressons à l'alignement, par les modèles, des niveaux tactique et opérationnel. Le niveau opérationnel a pour mission de mettre en œuvre les objectifs définis au niveau tactique. Nous avons pour objectif de comparer les modèles entre ces deux niveaux de décision afin de relever les défis des modèles de décision au niveau opérationnel vis-à-vis de l'atteinte d'une performance globale (efficacité et efficience) et d'alignement de la CL. Ci-dessous les deux questions principales de notre travail de recherche :

1. **Quels sont les défis de cohérence décisionnelle liés à l'utilisation des modèles d'aide à la décision à différents niveaux de la chaîne logistique ?**
2. **Quels principes doit fonder le recours à la valorisation économique dans les modèles de décision ?**

Notre contribution par rapport à ces questions était dans le cadre d'un projet Recherche-Intervention mené au sein du site de Jorf du Groupe OCP ; leader mondial dans le marché du phosphate et de ses dérivées. La CL de l'OCP est verticalement intégrée depuis l'extraction des couches de phosphate jusqu'à l'expédition des produits finis. Elle comporte plusieurs sites miniers, suivis des unités de traitement physique des minerais, par la suite des sites chimiques (ex. Jorf) de transformation connectés à des ports pour l'exportation des produits finis et l'importation de quelques matières premières nécessaires. Au niveau tactique, l'OCP assure une planification intégrée de toute sa CL. Il s'appuie sur un modèle d'optimisation agrégé. Le modèle considère le périmètre de toute la CL de l'OCP et prépare le planning de production sur trois horizons : annuel, trimestriel et mensuel. Il prescrit les objectifs à atteindre en termes des quantités de production (produits finis et produits intermédiaires), des niveaux des stocks,

d'approvisionnement en matières premières et des expéditions des produits finis. Ces objectifs sont envoyés aux différents sites pour leur mise en œuvre au niveau opérationnel. Parce que le modèle intègre tous les sites de l'OCP, cela assure une certaine cohérence horizontale au niveau tactique. Cependant, la cohérence verticale est plus compliquée, les opérationnels remontent des difficultés quant à la réalisation de ces objectifs. Notre projet a émané de la volonté de l'OCP de lancer un projet de recherche pour l'aide à la décision, au niveau opérationnel, dans son site chimique de Jorf, le plus grand site chimique de la transformation du phosphate au monde. À travers ce travail, nous cherchons à définir, en partant d'une exploration approfondie du système physique et du processus décisionnel de l'OCP et de Jorf en particulier, une problématique réelle complexe à traiter en proposant des modèles de décision et une approche méthodologique fondée sur la cohérence décisionnelle. Nous montrerons la pertinence des instrumentations, que nous proposons, pour l'étude des décisions à court terme, et nous les positionnerons par rapport au modèle mathématique de la planification tactique.

Notre analyse de la littérature montre que des travaux antérieurs ont déjà abordé la question de l'alignement par les modèles. En revanche, ces travaux proposent des approches normatives ne prenant pas en compte toutes les contraintes réelles du terrain. Par ailleurs, les auteurs se concentrent souvent sur les techniques de modélisation ou de résolution sans investiguer la pertinence des informations sur les coûts alimentant leurs modèles. Ces informations, si elles ne sont pas appropriées peuvent mener à des décisions non pertinentes. Notre projet a pour but de répondre, humblement, à ces préoccupations. Nous avons travaillé sur deux volets complémentaires : un volet modélisation physique dans lequel nous avons mobilisé des techniques de simulation et d'optimisation et un volet valorisation économique. Ces deux aspects sont essentiels à la cohérence des décisions à court terme. Ce travail est structuré à partir des communications et articles présentés dans des congrès internationaux ou publiés dans des revues scientifiques. Il est divisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre situe le domaine d'étude. Nous y définissons le concept de la Chaîne Logistique et ses caractéristiques pertinentes à notre travail. Par la suite, nous présentons la définition du Supply Chain Management et nous introduisons les enjeux de pilotage d'une CL. La dernière section de ce premier chapitre portera sur le rôle et les défis des modèles dans l'alignement de la CL.
- Le deuxième chapitre porte sur la présentation de la méthodologie de recherche suivie. Nous présenterons les principales caractéristiques et les étapes de la

méthodologie Recherche-Intervention définissant notre méthodologie. Par la suite, nous décrirons le processus de sa mise en œuvre au sein de la CL du site de Jorf du Group OCP.

- Le troisième chapitre porte sur la description de deux modèles décisionnels que nous avons développés dans le cadre de la Recherche-Intervention. Les deux modèles ont pour objectif d'améliorer le processus décisionnel opérationnel au site de Jorf de telle façon à améliorer l'alignement entre les décisions prises au niveau tactique avec les décisions opérationnelles. Il s'agit d'un simulateur de la production qui a deux usages : un usage top-down dans lequel le simulateur vérifie la cohérence d'un ensemble de décisions opérationnelles prises par les opérationnels, sur un horizon d'une à deux semaines, pour atteindre des objectifs définis par le modèle tactique d'optimisation (utilisé par l'OCP) ; et un usage bottom-up dans lequel le simulateur part de l'état réel du système productif et détermine sa capacité sur une période d'un mois. La capacité calculée est un input au modèle tactique d'optimisation. Le deuxième outil est un système interactif d'aide à la décision d'ordonnancement d'un ensemble de lignes de production hétérogènes parallèles. Il utilise un modèle d'optimisation et vérifie l'impact de l'ordonnancement optimal obtenu sur les contraintes de proximité amont et aval de ces lignes de production.
- Quand un modèle de décision utilise un critère de choix économique, la pertinence des décisions qu'il fournit est fondée sur la validité de la fonction économique utilisée. La modélisation physique retenue et la valorisation économique utilisée sont contingentes l'une à l'autre et ne peuvent être indépendantes du système physique qu'ils cherchent à faire évoluer. Après avoir présenté la modélisation physique dans le chapitre 3, nous nous intéressons à la question de l'évaluation économique dans les modèles de décision (chapitre 4). De nombreux travaux de recherche ont discuté de l'insatisfaction des managers quant à la fiabilité et la pertinence des coûts qui sont fournis par les systèmes de comptabilité de gestion. Ce quatrième chapitre est constitué de deux sections principales. Dans la première nous présentons une revue de littérature critique d'un ensemble de 110 articles portant sur des modèles de décision en CL. L'objectif est d'analyser la pertinence de la valorisation économique que les

auteurs utilisent dans leurs modèles. Avant de présenter les résultats de la revue, nous présenterons dans ce chapitre un cadre théorique lié à l'utilisation de la valorisation économique dans la prise de décision. Finalement, nous signalerons un ensemble de défis liés à l'utilisation de la valorisation économique dans les modèles de décision. Dans la deuxième section, nous présenterons les principes d'une approche de valorisation économique pertinente pour les décisions opérationnelles. Nous décrierons l'application de ces principes dans l'étude de cas de l'évaluation économique des décisions d'ordonnancement des lignes de production des engrais. Finalement, nous soulignerons la pertinence de l'utilisation de l'approche dans le système d'aide à la décision d'ordonnancement.

- Nous terminerons notre manuscrit par une conclusion générale dans laquelle nous synthétiserons les principales contributions de notre travail et nous présenterons les perspectives qui s'ensuivent à la fois au niveau du terrain qu'au niveau scientifique.

CHAPITRE 1

CADRE SCIENTIFIQUE – L'APPORT DES MODÈLES DE DÉCISION EN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

---

1. INTRODUCTION

Les problématiques s'intéressant au domaine de la CL ou au SCM sont très vastes et variées. Dans notre thèse, nous nous intéressons au pilotage d'une CL et notamment à la question de la finalisation. Cette phase de finalisation permet d'articuler le long terme avec le court terme, grâce un processus appelé planification. Cette dernière est, selon Bouquin (1994), le moyen d'assurer la convergence des objectifs dans le temps et dans l'espace. Elle est fondée sur une délégation des pouvoirs de décision. Lorino (1992) place les objectifs globaux au centre du processus de pilotage. Pour lui, piloter, c'est définir des règles de comportement cohérentes avec les objectifs globaux. Les managers doivent ainsi coordonner pour mettre en place des décisions et des actions cohérentes avec les objectifs assignés.

Des efforts considérables ont été déployés pour améliorer la prise de décision dans le domaine de la CL, dont l'un consiste en l'intégration des modèles dans les systèmes d'aide à la décision (Narasimhan et Mahapatra, 2004). L'exigence de cohérence des décisions conduit à s'interroger sur l'articulation entre des modèles d'aide à la décision mobilisés dans les processus de finalisation d'une CL. La question posée est : comment définir, moyennant des modèles, des programmes de production réalisables pour des entités participant à une CL, étant donné les objectifs de livraison des clients définis à un niveau supérieur par un autre modèle ?

Ce chapitre a pour objectif de présenter le cadre scientifique de notre thèse qui repose sur le rôle des modèles de décision dans la cohérence des décisions dans la CL. Il est divisé en trois sections principales. La première section porte sur la définition et la présentation des caractéristiques d'une CL (notre domaine d'étude). La deuxième section a pour but de définir le SCM, et plus particulièrement d'introduire les problèmes de cohérence dans la CL. La troisième section est dédiée à la discussion du rôle et des défis des modèles de décision dans la cohérence de la CL.

2. LA CHAÎNE LOGISTIQUE DOMAINE D'ÉTUDE

Il semble y avoir certaine convergence dans la littérature quant à la définition de la CL. Elle peut être définie comme un réseau de processus, d'entités et d'activités interconnectées et interdépendantes qui s'accordent pour coopérer pour la bonne gestion des flux de matières premières et de produits finis depuis les fournisseurs jusqu'aux clients. Christopher (1992) définit la CL comme un réseau d'organisations qui participent, par le biais de liens en amont et

en aval, aux différents processus et activités qui produisent de la valeur sous la forme de produits et services fournis au consommateur final. Bilgen et Ozkarahan, (2004) la définissent comme étant une configuration intégrée impliquant différentes fonctions : l'approvisionnement, la production, le stockage et la distribution. Des efforts ont été consacrés à l'élaboration de modèles permettant de décrire les éléments et les activités d'une CL. Le modèle SCOR du *Supply Chain Council* est un modèle de référence de processus, qui se veut une norme industrielle permettant la gestion de la CL. Il fournit une vue horizontale (processus croisés) et verticale (hiérarchique) équilibrée par rapport aux modèles classiques de décomposition des processus, qui sont développés pour traiter une configuration spécifique d'éléments de processus (Huan *et al.,* 2004 ; Huang *et al.,* 2005).

Certaines CLs comportent dans un même périmètre juridique des fournisseurs et des manufacturiers (ex, CL de pétrole ou celle du phosphate) pouvant être localisés dans la même ou dans différentes localisations géographiques. Selon Muñoz *et al.* (2012), la CL est un groupe de ressources et d'activités interconnectées, nécessaires pour créer et fournir des produits et des services aux clients. Pour Lambert *et al.* (1998), la CL est un alignement d'entreprises qui amènent des produits ou des services jusqu'au client. Nous adoptons la définition de Fénies *et al.* (2004) définissant la CL comme : « un ensemble ouvert traversé par des flux, composé d'entités et d'acteurs variés autonomes qui utilisent des ressources restreintes (capital, temps, matériel, matières premières, etc.) et qui coordonnent leur action par un processus logistique intégré afin d'améliorer prioritairement leur performance collective (satisfaction du client final, optimisation globale du fonctionnement de la Supply Chain) mais aussi à terme leur performance individuelle (maximisation du profit d'une entité) ».

Dans ce qui suit nous allons commencer par présenter les types de flux (physiques, financiers et informationnels) traversant une CL. Par la suite nous présentons brièvement deux types de structure d'une CL. En fonction de la nature des flux physiques, qui sont traités dans les processus, nous présentons les natures possibles d'une CL. La dernière sous-section porte sur les modes de pilotage des flux dans une CL.

2.1 *Les flux d'une chaîne logistique*

La CL est traversée par trois types de flux : physique, financier et informationnel (Fénies, 2006, Comelli, 2008) que nous présentons ci-dessous :

- Le flux physique : Tchernev, (1997) définit un flux physique comme étant est un ensemble d'unités circulant dans l'espace, sur une surface, un plan, sur une courbe ou une droite suivant une loi précise. Le flux physique inclut les matières premières, les en-cours, les produits finis, les emballages, et les articles retournés (palettes, produits non conformes, etc.). « La durée des processus de traitement de ces flux permet de planifier la productivité d'un système, tandis que la liaison quantité/temps décrit la productivité du système relativement à ce flux physique » (Féniès, 2006). Une bonne gestion de ce flux physique est nécessaire pour satisfaire les clients.
- Le flux financier : ou flux monétaire, circule entre les entités de la CL. La performance financière est importante puisqu'elle reflète la position financière actuelle de l'organisation en réponse aux décisions qui ont été prises et permet ainsi de guider les managers dans la prise de décision future (Leng and Zailani, 2012). Le flux financier permet aussi aux entreprises d'évaluer leurs fournisseurs et leurs clients. « Le flux financier est la contrepartie monétaire du flux physique » (Féniès, 2006). La mesure des flux financiers doit être pertinente, sinon elle risque d'entraver la coopération entre les membres de la CL.
- Le flux informationnel : les travaux de recherches, ayant signalé l'importance du flux informationnel, sont légion. Il permet la coordination des flux physiques et financiers entre les maillons de la CL.

La figure 1, tirée de (Giard, 2003), illustre les enchaînements des flux physiques, financiers et informationnels et les interdépendances entre les maillons de la CL :

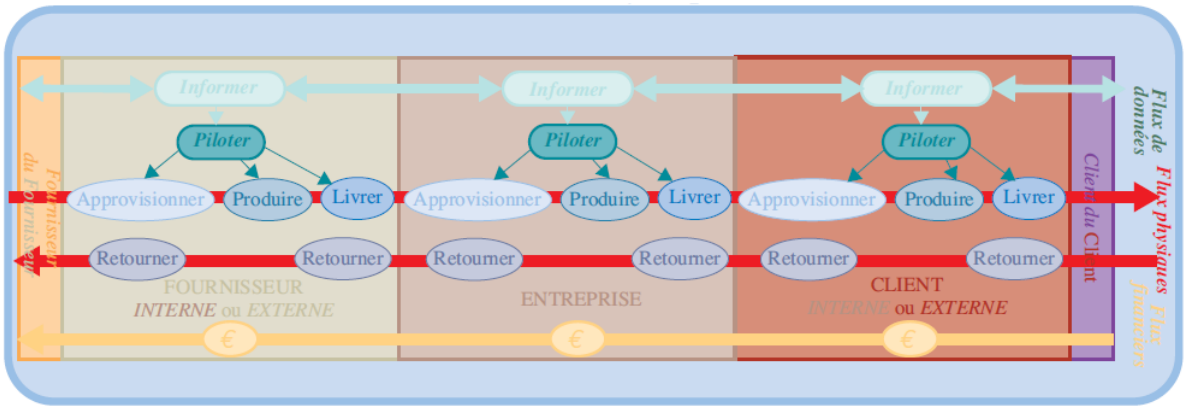

Figure 1 : enchaînement des flux dans une CL (Giard, 2003)

2.2 *La structure d'une chaîne logistique*

Une CL telle que définie plus haut considère un ensemble d'entités travaillant ensemble, indépendamment de leurs périmètres juridiques, pour livrer un produit au consommateur final. D'une manière générale, on peut trouver deux types de structures organisationnelles de la CL (Laínez et Puigjaner, 2012) :

Une CL centralisée : dans ce type de structure, une entité centrale a une visibilité globale et un accès à l'information de tous les membres de la CL. L'entité centrale essaie d'optimiser toute la CL. Dans une CL centralisée, les décisions sont prises au niveau central pour optimiser le coût total de la CL (Rached *et al.*, 2016).

Une CL décentralisée : dans cette structure, les décisions sont prises séparément par tous les membres ou groupes de membres de la CL. Dans le cadre d'une structure décentralisée, les managers s'efforcent à influencer la prise de décision et avoir un impact sur l'ensemble du système de performance.

2.3 *La nature d'une chaîne logistique*

La nature des flux physiques circulant les processus d'une CL permet de déterminer sa nature discrète ou continue (Bara *et al.*, 2020a, 2020b).

Un processeur discret a pour vocation de traiter (transformations physiques ou spatiales (transport)) des objets (produits, composants, etc.) ou des personnes, que l'on regroupe ici sous le terme générique d'items. Un processus élémentaire discret (PED) est constitué d'un processeur discret qui est alimenté par un ou plusieurs stocks, dans des quantités régies par des nomenclatures de production ; après un traitement dont la durée est déterminée par une gamme opératoire, ce processeur expédie un ou plusieurs items dans un ou plusieurs stocks. La définition du processeur dépend du niveau d'observation retenu et de son usage dans la modélisation.

De la même façon, un processus élémentaire continu (PEC) a pour vocation de transformer des flux (ex. liquides, granulé) dans un processeur continu qui prélève des flux d'un ou plusieurs stocks et émet, en sortie, des flux vers un ou plusieurs stocks. Les débits de ces flux d'entrée et de sortie dépendent des performances du processeur utilisé et sont liés par des proportions correspondant à une nomenclature chimique, de nature différente de la nomenclature de production (de nature discrète). Sous certaines conditions, on peut calculer

analytiquement le temps moyen de séjour des flux entrants dans le processus de transformation. Cette durée s'apparente à un temps opératoire.

Une chaîne logistique discrète comporte un réseau de PEDs liés par des stocks et pouvant être alimentés par un ou plusieurs points d'entrée ; certains PEDs sont reliés à des points de sortie par lesquels les items quittent le système productif étudié. Symétriquement, une chaîne logistique continue est faite d'un réseau de PECs. Une chaîne logistique hybride combine, sans restriction, une ou plusieurs chaînes logistiques discrètes avec une ou plusieurs chaînes logistiques continues.

2.4 *Modes de production dans une chaîne logistique*

Deux modes sont distingués quant au pilotage des processus de production dans une CL :

Production à la commande (ou production *à flux tiré)* : la production est dite à la commande lorsque toute ou une partie de la fabrication est déclenchée par la commande ferme d'un client (Giard, 2003).

Production pour stock (production à flux poussé) : « déclenchée par l'anticipation d'une demande solvable s'exerçant sur un produit dont les caractéristiques sont définies par le fabricant » (Giard, 2003).

Une CL peut combiner à la fois des processus de production à la commande et des processus de production sur stock. Dans ce cas, les deux types de processus sont liés par un point de découplage « point de pénétration de commande ». Ce dernier est le point du flux de matières où le produit est lié à une commande client spécifique (Olhager, 2012). Il y a consensus fort dans la littérature sur le fait que les opérations en amont d'un point de découplage sont différentes des opérations en aval. Olhager, (2012) présente les principales caractéristiques de distinction. En amont, les produits sont standardisés, produits avec des lots de grande taille en partant d'une demande prévisionnelle. Par ailleurs, les processus en amont d'un point de découplage veillent sur la réduction des coûts et sur l'augmentation de la productivité. Quant à l'aval, les processus traitent des produits personnalisés, avec une variété forte et font face à un carnet de commandes prévisionnel. De surcroît, ces processus doivent veiller sur la réactivité (délais de livraison) et la flexibilité.

3. LE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

En général, les entreprises industrielles ne produisent pas toutes les pièces et les composants qui sont intégrés dans leurs produits ; une partie est approvisionnée auprès des fournisseurs. Ces derniers peuvent soit produire des produits standardisés qui peuvent être achetés par plusieurs manufacturiers, soit produire des pièces ou des composants spécifiques pouvant nécessiter des outils ou des équipements spécifiques pour des clients particuliers. Ce type de contrats exige un certain niveau de partenariat et d'intégration entre le fournisseur et les entreprises (manufacturiers). L'exemple de la CL automobile d'un constructeur donné peut servir d'appui : une entreprise d'assemblage automobile a des sous-traitants liés par des contrats longs, avec financement d'équipements (moules, etc.) permettant de produire des pièces particulières (ce contrat force un certain alignement), et a des fournisseurs de composants normalisés (bougie, etc.) qui sont relativement interchangeables. Dans ce cas, le manufacturier et le sous-traitant doivent être intégrés et adopter la vision SCM. Le SCM impliquant plusieurs entreprises, plusieurs entités, plusieurs activités et la coordination de ces activités dans les entités et entre les entreprises (Mentzer *et al.,* 2001), considère la CL comme une entité unique gérée par un membre dominant ou par un système de partenariat exigeant un niveau élevé d'intégration et de coopération entre les différents membres (Ganeshan, Jack *et al.,* 1999). Ceci est dû au fait que les intérêts d'acteurs ne relevant pas d'un même périmètre juridique, sont souvent en grande partie antagonistes (conflit sur le partage de la valeur ajoutée), ce qui rend difficile ce pilotage centralisé, sauf si l'un des acteurs est en position de force pour imposer sa volonté. Le SCM s'intéresse à la définition des objectifs de la CL, la définition de moyens de mesure de ces objectifs et l'élaboration des actions pour leur réalisation. Pour ce faire, le SCM s'occupe de l'utilisation des ressources et des décisions humaines au sein et entre les entreprises et les entités de la CL. Il vise à gérer ces ressources de la manière la plus rationnelle tout au long de la chaîne de valeur, depuis les clients jusqu'aux fournisseurs de matières premières, sur la base d'une intégration fonctionnelle et structurelle, d'une coopération et d'une coordination tout au long de la chaîne (Ivanov, 2010). Le SCM fait également référence à un ensemble de croyances soulignant que chaque membre de la CL peut affecter, directement ou indirectement, la performance des autres membres de la CL ou la performance globale ultime de la CL (Cooper *et al.,* 1997). Dans un contexte orienté SCM, il devient conséquemment irréaliste d'imaginer qu'un ensemble de décisions prises localement soient cohérentes au niveau global (Giard,

2003).

Ci-dessous : la première sous-section (3.1) porte sur un rappel des définitions des deux dimensions d'efficacité et d'efficience dans la mesure de performance d'une CL. La deuxième section-section (3.2) porte sur la prise de décision en SCM : la typologie de décisions et les enjeux de pilotage des CLs.

3.1 *Mesure de la performance*

La performance d'une organisation est le résultat de l'ensemble des décisions qui ont été prises et mises en œuvre. La mesure de la performance repose sur les deux dimensions de l'efficacité et de l'efficience.

L'efficacité est l'adéquation des moyens choisis et appliqués en vue d'atteindre une fin. Une organisation est dite efficace si ses clients sont satisfaits en termes de caractéristiques de produits livrés, de la réactivité (respect des délais de livraison) et de la qualité des produits. La mesure de l'efficacité est généralement traduite par un critère physique à minimiser (délais de livraison, nombre de pièces non conformes, etc.) ou à maximiser (ex. taux de service).

L'Efficience vise l'efficacité au moindre coût. L'efficience est reflétée par les marges d'exploitation de l'entreprise (Clark, 1921 ; Moran et Ghoshal, 1999). Clark (1921) lie l'efficacité et l'efficience, pour lui, un système est inefficient s'il n'est pas cher mais inefficace.

3.2 *Prise de décision en Supply Chain Management*

Dans cette sous-section, nous allons commencer par présenter la typologie de décisions dans la CL. Par la suite nous allons introduire les problématiques de pilotage dans la CL avant de présenter un ensemble de mécanismes favorisant la cohérence et la coordination de la CL.

3.2.1 Typologie de décisions

Malgré son caractère stratégique, la réussite du SCM dépend de la qualité de la prise de décision aux trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Ci-dessous nous présentons les caractéristiques de ces catégories de décision selon la typologie d'Anthony (1965).

3.2.1.1 Décisions stratégiques

Le management stratégique est un processus itératif qui commence par l'élaboration d'une stratégie globale au niveau de l'entreprise pour guider l'ensemble de l'organisation (Ghobadian *et al.,* 2007). Les décisions stratégiques déterminent le domaine d'activité et la conception de la CL au cours d'une série d'années à venir. Elles fournissent l'environnement dans lequel les décisions tactiques et opérationnelles seront exécutées (Schmidt et Wilhelm, 2000). Ce sont des décisions à long terme qui prescrivent la localisation géographique, les capacités et les technologies de production des installations (ex. usines, entrepôts) à ouvrir. Par ces décisions stratégiques, l'entreprise détermine le niveau de performance attendu qui est lié au degré de flexibilité de son système de production pour répondre à une demande. Cette dernière est définie en fonction d'une diversité (portefeuille de produits) et d'une variation temporelle données (Bouquin, 1997).

3.2.1.2 Décisions tactiques

Les décisions tactiques s'intéressent à des problématiques de planification sur un horizon moyen terme de quelques mois. Elles consistent « à occuper le mieux possible les entités physiques du réseau Supply Chain et à configurer les flux de cette dernière » (Féniès, 2004). En considérant le design et les contraintes de capacité, déterminées au niveau stratégique, les décisions tactiques prescrivent l'affectation des produits aux usines de production, l'affectation des commandes client aux installations, la détermination des objectifs en termes de niveaux de production et de stocks dans chaque entité et les questions d'approvisionnement, etc (Ganeshan *et al.,* 1999 ; Schmidt et Wilhelm, 2000 ; Mula *et al.,* 2010 ; Maravelias et Sung 2009). « Le suivi de la mise en œuvre et le retour d'expérience sur les actions entreprises viennent nourrir régulièrement de leur contenu concret la réflexion stratégique » (Demeestère *et al.,* 2017). Par exemple, il est important de déterminer une mesure du niveau de service clientèle, qui peut être obtenue au niveau tactique, et de la fournir en retour au niveau stratégique afin d'améliorer ce niveau de service en fournissant une conception de réseau plus réactive (Schmidt and Wilhelm, 2000).

3.2.1.3 Décisions opérationnelles

Les décisions opérationnelles nous intéressent plus particulièrement. Elles sont prises pour mettre en application les objectifs prévus par le planning tactique. Elles correspondent à des

décisions à court terme ayant un impact sur un horizon court allant de quelques jours à quelques semaines. Elles concernent la gestion quotidienne des ressources, la programmation des tâches dans les unités de production et l'affectation des opérateurs aux tâches, etc. Dans la littérature, les décisions opérationnelles font souvent référence aux décisions de programmation et d'ordonnancement. Elles portent principalement sur les détails des opérations, l'affectation des ressources, les détails de la gestion des stocks et l'acheminement des livraisons afin de garantir l'efficience des opérations et l'optimisation des flux de produits tout au long des chaînes de production. En d'autres termes, au niveau opérationnel, la question est de savoir quand effectuer une tâche de fabrication et dans quelle installation afin que les délais de livraison soient respectés dans toute la mesure du possible (Schmidt et Wilhelm, 2000). Étant donné les contraintes établies par la configuration stratégique des ressources permanentes et les politiques de planification à moyen terme, au niveau opérationnel il s'agit de garantir l'utilisation efficiente des installations de la CL et de maximiser le profit des opérations à court terme. En outre, les décisions opérationnelles sont généralement décentralisées et prises sur un périmètre limité d'un système physique (ex. une usine de production), même si l'impact de leurs conséquences peut se propager sur un périmètre plus large de la CL affectant ainsi sa performance globale. Les décisions opérationnelles sont également révisées et ajustées fréquemment (Ganeshan *et al.*, 1999) en raison de la structure dynamique des conditions internes et externes des CLs. Au niveau opérationnel « la procédure de prise de décision intervient durant la production de deux façons : de façon périodique ou événementielle » (Mirdamadi, 2009). Dans le premier cas, le processus de prise de décision est déclenché d'une façon régulière et périodique. Dans le second cas, le déclenchement du processus de décision est lié à l'apparition de certains événements (franchissement d'un point de commande en gestion des approvisionnements, incident de production, etc.).

Chaque décision prise par l'entreprise peut être classée selon deux dimensions qui sont depuis longtemps associées à la théorie économique de l'entreprise (Shivakumar, 2014) : le degré d'engagement et le champ d'action (scope) de l'entreprise. Le degré d'engagement est mesuré par le degré de réversibilité d'une décision prise ; certaines décisions sont très coûteuses à annuler. Le champ d'action de l'entreprise fait souvent référence aux choix des produits, des services, des activités et des marchés de l'entreprise. En outre, les trois niveaux de décision sont différents non seulement en ce qui concerne leur impact sur le futur (degré d'engagement et champ d'action de l'entreprise (Shivakumar, 2014)) mais aussi la position hiérarchique dans

laquelle les décisions sont prises, le degré d'agrégation des informations (spatiales et temporelles) qui est considéré dans leur étude (Giard, 2003), le degré d'incertitude accepté et les objectifs et les préoccupations des acteurs. Le tableau 1 résume les principales différences entre les trois niveaux de décisions.

Tableau 1 : caractéristiques des catégories de décisions

Catégories de décisions	Position hiérarchique	Horizon temporel	Fréquence	Vision	Degré d'incertitude accepté	Desigu et capacités	Périmètre physique	Performance	Objectifs	Priorités	Degré d'agrégation des informations	Découpage temporel
Stratégiques	Direction générale	Long terme (plus d'un an)	Faibe	Vision externe (marché)	Elevé	A définir	Large (toute l'organisation ou la CL)	Globale	Investissements, définition des capacités	Efficience Réactivité Qualité Innovation	Agrégé	Agrégé
Tactiques	Managers intermédiaires	Moyen terme (quelques mois)	Moyenne	Vsion externe (client)	Moyen	Supposés définis	Large (toute l'organisation ou la CL)	Globale	Planification des ressources	Efficience Réactivité Qualité	Agrégé	Agrégé
Opérationnelles	Managers et reponsables sur les sites	Court terme (quelques joures à quelques semaines)	Elevée	Vision interne	Très faible	Supposés définis	Réduit (ex. un atelier, des machines)	Locale	Exécution des tâches, gestion des ressources	Efficience	Fin	Fin

3.2.2 Enjeux de pilotage dans la chaîne logistique

La CL est constituée de nombreux acteurs (ex. ateliers, fonctions métiers) spécialisés se situant à des niveaux de décision différents, qui interagissent pour atteindre un objectif global. Généralement, les entreprises sont organisées en entités fonctionnelles : achat et approvisionnement, la production, la finance et comptabilité, les ventes et marketing, etc.

La complexité de gestion de chacun de ces maillons (horizontalement ou verticalement) et la spécificité des compétences requises pour ce faire, implique une différenciation dans les équipes fonctionnelles de travail au sein des organisations et des entités de la CL. Lawrence et Lorsch (1967) définissent cette différenciation comme étant l'état de segmentation du système organisationnel en sous-systèmes, dont chacun tend à développer des attributs particuliers par rapport aux exigences posées par son environnement extérieur correspondant. Selon Rice (1958), la performance efficace d'un sous-système (ex. entité fonctionnelle, division) est liée au fait qu'il soit bien différencié par rapport à sa mission principale vis-à-vis son environnement extérieur, c'est-à-dire le degré de spécialisation du sous-système par rapport à l'objectif qui lui a été assigné. Cependant cette différenciation entraine des difficultés de collaboration et d'intégration, nécessaires dans le cadre d'une approche orientée performance intégrée (Lawrence et Lorsch 1986). Le plus souvent, c'est une logique locale qui prévaut sur le terrain. Mais ce qui est recherché dans le cadre de la vision CL, c'est la performance globale et non des optimisations locales. Cette performance globale passe par la cohérence des décisions et actions réalisées à toutes les étapes de la CL (cohérence horizontale) et à tous les niveaux hiérarchiques

(cohérence verticale). Elle conduit à s'intéresser à la décentralisation de la prise de décision (Mintzberg, 1982) dans une CL et à la nécessaire intégration des multiples décisions. Miller (1959) indique que tant que des groupes de rôles se développent en relation avec des tâches différenciées, des problèmes d'intégration se posent. Les CLs font donc face à un problème de réconciliation de deux objectifs (différenciation et intégration) qui sont antagonistes. La volonté d'assurer les deux fait émerger la nécessité d'instaurer des mécanismes pertinents d'alignement et d'intégration.

Plusieurs chercheurs (Lawrence et Lorsch (1967) ; Oliva et Watson (2007)) font appel au terme « congruence » dans leur définition du concept d'alignement. Oliva et Watson (2007), définissent l'alignement comme étant une congruence dans les activités et les actions prises à travers les fonctions et les entités de la CL pour estimer la demande. D'autres auteurs (e.g. Wong *et al. (*2012)) utilisent les termes « fit » et alignement d'une manière interchangeable. Selon Wong *et al.* (2012), l'alignement de la CL se traduit par une adéquation (fit) en termes d'objectifs, de structures et de processus au sein et entre les différentes fonctions et membres de la CL. Selon Porter (1996), la capacité d'une entreprise à rechercher et à maintenir un avantage concurrentiel repose sur sa capacité à acquérir et à déployer des ressources d'une manière cohérente et alignée avec le besoin concurrentiel de l'organisation. Tout désalignement pourrait conduire au développement de pratiques déconnectées les unes des autres reproduisant des incohérences décisionnelles tout au long du processus de production, ce qui peut compromettre la réalisation des objectifs de l'entreprise et, par conséquent, ses performances. Pour résumer, l'alignement dans la CL consiste en l'accord, des acteurs aux différents maillons et aux différents niveaux décisionnels, sur la définition des objectifs et la coopération mutuelle pour la réalisation de ces objectifs.

L'alignement dans une CL repose donc à la fois sur le niveau de cohérence verticale entre les décisions prises aux différents niveaux du processus de la prise de décision et sur le niveau de cohérence horizontale entre les différents maillons à chaque niveau de décision. Ces deux dimensions définissent les formes de l'alignement. Dans le reste de cette partie, nous allons commencer par parler de la cohérence verticale des décisions (3.2.2.1). Par la suite, nous allons parler de la cohérence horizontale de la CL. Finalement nous allons présenter un ensemble de mécanismes favorisant l'alignement de la CL.

3.2.2.1 Cohérence verticale

La cohérence verticale est largement évoquée dans la littérature. Elle est fondée sur la cohérence entre les stratégies et les décisions prises à des niveaux de décision différents. En effet, lorsque les différents niveaux de la stratégie et les priorités stratégiques sont cohérents, liés et se soutiennent mutuellement, la performance de l'organisation serait plus élevée. La cohérence verticale, selon Ghobadian *et al*. (2007), consiste en l'élaboration des stratégies, des objectifs, des plans d'action et des décisions à tous les niveaux de décision de l'organisation. Pour Lingle et Schiemann (1996), les organisations efficaces sont des entités organiques et intégrées dans lesquelles différentes unités, fonctions et niveaux décisionnels, soutiennent la stratégie de l'entreprise – et se soutiennent les uns les autres. Bhatnagar *et al.* (1993) soulignent que les stratégies efficaces, menant à de bonnes performances, se concentrent sur la manière dont la prise de décision aux différents niveaux organisationnels est coordonnée de telle sorte à ce que les politiques opérationnelles soient optimales pour l'organisation dans son ensemble. Certes les niveaux de décision élevés sont nécessaires pour atteindre les attentes des actionnaires et des clients, mais ils ne sont pas suffisants sans assez d'efficacité et d'efficience aux niveaux inférieurs. Ghobadian *et al.* (2007) mentionnent que le processus de la cohérence verticale a été également évoqué par Hrebiniak et Joyce (1984). Pour eux la réussite de la mise en œuvre de la stratégie dépend du niveau d'intégration et de cohérence des objectifs du niveau opérationnel avec les plans tactiques et stratégiques. La stratégie est traduite par des indicateurs et des objectifs en termes de la satisfaction des clients et des actionnaires. Pour relever les défis concurrentiels du marché, les entreprises ne peuvent pas se contenter de la définition des stratégies concurrentielles appropriées ; elles doivent les mettre en œuvre, ceci se fait au niveau opérationnel.

Les différences en termes de caractéristiques entre les différents niveaux de décision (tableau 1) complexifient la question de la cohérence. Les niveaux stratégiques et tactiques adoptent une vision externe orientée marché et client alors qu'au niveau opérationnel les responsables adoptent plutôt une vision interne fondée sur la bonne gestion des ressources qui leur sont allouées et l'atteinte des sous-objectifs qui leur sont assignés. Ceci fait que les différents niveaux de décision n'ont pas forcément les mêmes objectifs, ce qui ne veut pas dire que ces objectifs soient contradictoires. Ghobadian *et al*. (2007) soulignent que la cohérence nécessite une compréhension partagée des objectifs de l'organisation de la part des différents managers aux différents niveaux décisionnels et aux différentes unités de la hiérarchie de

l'organisation. Par ailleurs, parce que leurs préoccupations sont différentes, les managers aux différents niveaux décisionnels adoptent des perceptions différentes d'un même système productif.

La prise de décision aux différents niveaux de décision se fait suivant un processus de planification hiérarchique consistant à utiliser la ligne de temps pour contrôler la quantité de détails et d'agrégation, les niveaux supérieurs d'agrégation se concentrent sur l'horizon temporel plus long et fournissent des orientations (objectifs, contraintes) aux niveaux inférieurs qui sont concernés par des intervalles de temps plus courts (McKay *et al*., 1995). Les niveaux stratégiques et tactiques considèrent un niveau agrégé des informations retenues dans leurs processus de décision ce qui engendre des difficultés auprès des opérationnels quant à la traduction des objectifs des niveaux supérieurs. En effet, la planification tactique, par exemple, ne prend pas en compte les plages horaires de la maintenance préventive, l'éventuel impact des goulots d'étranglement sur la mise en œuvre des sous-objectifs affectés aux maillons de la CL, la gestion des cadences de production, l'ordonnancement des lignes de production ou de postes de travail, etc. Ces éléments sont des préoccupations des opérationnels. De surcroît, chaque niveau de décision comporte des éléments « durs » (McKay *et al.,* 1995) que les managers, de ce niveau, ne peuvent pas faire varier et d'autres aspects sur lesquels ils ont le contrôle. On parle ici du principe de contrôlabilité (Giard, 2003) selon lequel à chaque niveau de décision un responsable ne doit être jugé que sur les conséquences dont il a le contrôle sur les actions les engendrant. Le moment de la prise d'une décision peut être différent du moment où ses conséquences sont survenues (Giard, 2003). Les managers des niveaux supérieurs risquent également de ne pas avoir la connaissance de l'état réel du système productif. Un manque de synergie entre les processus, souvent due à la difficulté, rencontrée par les managers, à définir des objectifs faisables et à les transmettre clairement aux managers des niveaux inférieurs, conduit à des incohérences (Shivakumar, 2014). Selon Bouquin (1994), la réussite du processus de planification n'est pas évidente, car il n'est pas facile de faire décliner sur le terrain les objectifs d'une stratégie établie par d'autres.

3.2.2.2 Cohérence horizontale

La cohérence horizontale est la coordination des efforts des différentes entités de l'organisation ou de la CL. Elle peut être définie en termes d'intégration inter et intra fonctionnelle (Ghobadian *et al.,* 2007). L'intégration interfonctionnelle implique la cohérence des décisions entre les

fonctions de la CL, ainsi les activités et les décisions dans les fonctions du marketing, des opérations (la production), de la comptabilité de gestion, des ressources humaines et d'autres fonctions se complètent et s'appuient les unes les autres. La coordination intra-fonctionnelle est réalisée par la cohérence entre les entités de décision afin d'obtenir une synergie au sein de chaque fonction. Pour une mise en œuvre réussie, les décisions au sein d'une fonction doivent être cohérentes verticalement avec les objectifs stratégiques de cette fonction, ainsi que, latéralement (partie l'horizontal de la figure 2), sur les domaines de décision au sein d'une fonction (Kathuria et Porth, 2003). La coordination est au cœur du SCM ; Fugate (2005) présente une liste de références dans lesquelles le mot coordination apparait dans la définition du SCM. Kanda et Deshmukh (2008) ont mentionné que la définition la plus communément acceptée, dans la littérature, pour le concept de coordination est celle donnée par Malone et Crowston, (1994). Ces derniers la définissent comme « l'acte de gérer les dépendances entre les entités et l'effort commun des entités travaillant ensemble vers des objectifs définis mutuellement ». Alsène et Pichault (2007) placent la cohérence collective au cœur de la coordination. Pour eux la coordination consiste en « une recherche de cohérence dans le travail accompli par un ensemble d'individus ». Ils concluent que la coordination repose sur la répartition des ressources et des tâches (efficacité et équité), l'harmonisation des actes (perspective commune) et l'orchestration des activités (efforts individuels se complétant).

Dans le cas d'interdépendances d'activités séquentielles (Thompson, 1967), la finalisation est particulièrement complexe car elle suppose que les programmes d'activité permettent la réalisation des plans annuels mais aussi qu'ils soient cohérents entre les différentes entités participant à l'organisation complexe. Les plans et la finalisation constituent les principaux modes de coordination d'une organisation complexe caractérisée par ces interdépendances séquentielles.

La coordination dans la CL est importante, puisque des sous-optimisations risquent d'être favorisées lorsque chaque entité de la chaîne tente d'optimiser ses propres résultats plutôt que d'intégrer ses objectifs et ses activités à ceux d'autres entités pour optimiser le résultat global de la chaîne (Kampstra *et al.*, 2006). La coordination de la CL implique la minimisation des coûts et la maximisation de la valeur à l'échelle globale. Cet objectif serait voué à l'échec si les coûts sont simplement déplacés d'une entité à l'autre le long de la chaîne ; ceci pouvant se produire lorsque les entités de la chaîne ont des objectifs conflictuels ; en particulier lorsqu'une seule entité détenant le plus de pouvoir est favorisée par une certaine décision (Solis, 2001). La

coordination est fondée sur l'adoption d'une vision transverse permettant d'équilibrer les effets des changements, adoptés par une entité, sur les autres entités de manière à ce que le système global dans son ensemble en profite au maximum. Il nécessite un échange, une coopération et des interfaçages forts entre les différents maillons de la chaîne. Au niveau opérationnel où la gestion décentralisée est favorisée, il est nécessaire de maintenir une autorité centrale, suite à l'éventuelle apparition de goulots sur le cycle de production. En effet, les entités concourant à la réalisation d'un même objectif final, sont sujettes à des interdépendances permanentes entre leurs activités. Le processus de coordination entre entités devient plus compliqué au niveau opérationnel, car il faut systématiquement transiter par le niveau supérieur (Demeestère *et al.*, 2017).

3.2.3 Mécanismes d'alignement

Un mécanisme d'alignement est défini comme étant un outil spécifique permettant de traiter un problème particulier de coordination ou d'intégration. Plusieurs recherches ont abordé la question des mécanismes de l'alignement de l'organisation ou la CL. Ces recherches peuvent adopter des appellations différentes —certains auteurs (ex. Lawrence et Lorsch 1967 ; Wong *et al.*, (2012) ; Turkulainen *et al.*, (2017) utilisent l'appellation « mécanismes d'alignement », Barratt (2004) parle des « éléments de coopération » et d'autres auteurs (ex. Fugate (2006)) parlent de « mécanismes de coordination », mais elles sont en accord et sont complémentaires.

L'objectif de cette partie consiste alors à lister un ensemble de mécanismes facilitant la cohérence verticale et horizontale des organisations et des CLs. La liste ci-dessous est tirée de Wong *et al.* (2012). Nous allons la compléter et l'appuyer par d'autres travaux.

1) La structure de l'organisation en termes de formalisation et de centralisation : la désignation d'un individu ou d'un groupe d'individus **responsable de processus**. Ces responsables vont agir comme des intégrateurs (Wong *et al.*, (2012) ; Turkulainen *et al.*, (2017)) dont le rôle est de stimuler les unités opérationnelles à poursuivre une intégration stratégique complexe. L'influence sur différentes fonctions et différents maillons de la CL ne peut être obtenue sans avoir donné au responsable de processus, désigné, un **périmètre large de contrôle.** Il est également nécessaire de renforcer les **relations transversales** afin de créer une compréhension mutuelle et une vue d'ensemble des processus qui apportent réellement de la valeur ajoutée. La cohérence et

la coordination sont aussi appuyées par le renforcement des **activités interdépartementales** et les **structures orientées processus.**

2) Le comportement relationnel interne : il fait référence au degré de contact, formel ou informel, entre les employés, les fonctions et les entités des fonctions. L'apport de la **transversalité** via la coopération interfonctionnelle a été largement évoqué dans la littérature. Ronken et Lawrence (1952) soulignent que les différences d'hypothèses et d'orientations entre les groupes de l'organisation sont liées aux difficultés de coopération. Turkulainen *et al.,* (2017) parlent de la structure des équipes : il s'agit d'un groupe des individus, faisant partie des unités différentes, qui travaillent ensemble et partagent les responsabilités. Le relationnel interne peut aussi être renforcé par des pratiques orientées **résolution collective des problèmes**.
3) Soutien des dirigeants : la majorité des auteurs ayant abordé la question de l'alignement ont signalé le support **des dirigeants** comme mécanisme indispensable à la réussite de l'alignement. Ce soutien peut se faire via l'écoute des employés, la forte implication et influence, la mise à disposition des ressources et la reconnaissance de l'importance de l'adoption du SCM (Wong *et al.,* 2012). Le soutien de la direction générale peut également être démontré par la participation des cadres supérieurs aux opérations quotidiennes et aux processus décisionnels des employés et la compréhension de leurs contraintes. La cohérence verticale nécessite des interactions entre les niveaux faisant que les niveaux inférieurs peuvent et doivent également fournir des informations pertinentes à la définition des objectifs des niveaux supérieurs (la partie verticale de la figure 2). Un courant de recherche s'est intéressé au rôle des cadres intermédiaires dans le processus de prise de décision stratégique. Ces recherches contestent l'idée selon laquelle la planification et la prise de décision stratégiques sont un domaine dédié uniquement aux cadres supérieurs de l'entreprise et que les cadres intermédiaires ne participent qu'à la mise en œuvre de la stratégie (Shivakumar, 2014). Ce courant de recherche souligne que les cadres intermédiaires ont une influence sur la prise de décision stratégique via trois manières importantes. Premièrement, en servant d'intermédiaires entre les cadres supérieurs et les différents groupes opérationnels et fonctionnels, ils contribuent à améliorer la qualité des décisions stratégiques. Deuxièmement, parce que les entreprises géographiquement dispersées ainsi que les entreprises à forte intensité de connaissances nécessitent souvent une prise de décision

localisée et interactive, les cadres intermédiaires sont indispensables. Troisièmement, parce que les cadres intermédiaires ont une meilleure perception du lien entre les capacités de l'entreprise et ses performances, ils jouent donc un rôle important dans le développement et le perfectionnement des capacités de l'entreprise.

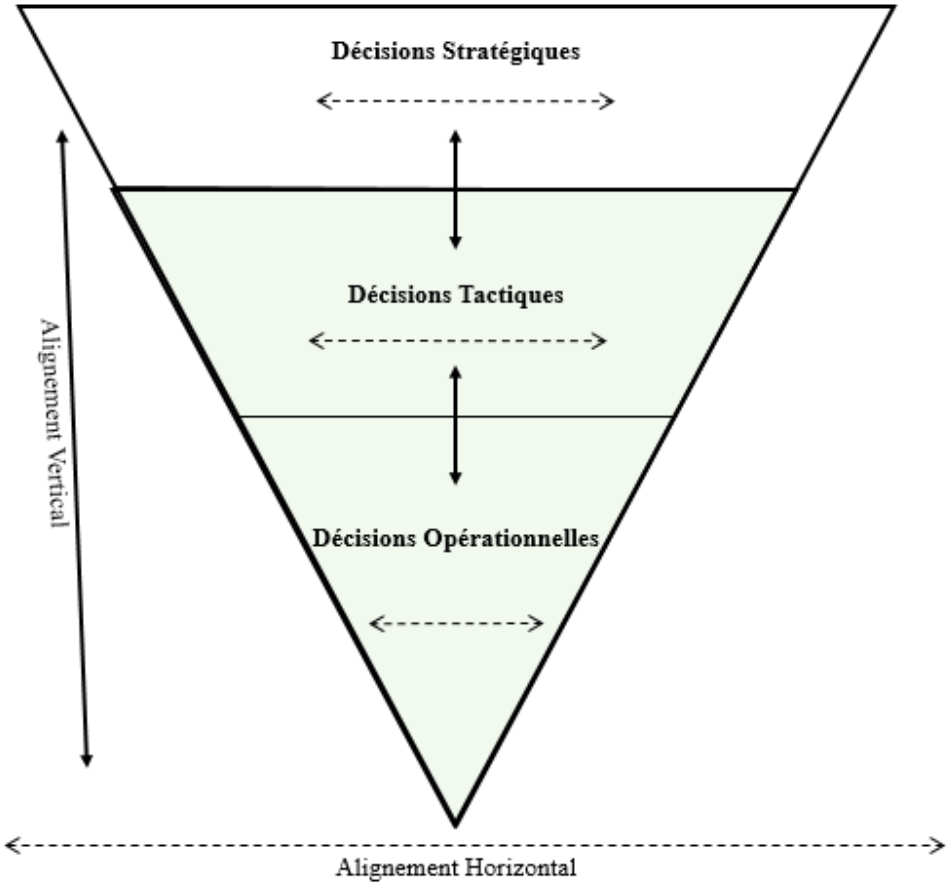

Figure 2 : dimensions de l'alignement de la CL

4) Partage d'information : Le manque de transparence et de visibilité dans les CL (Christopher et Gattorna, 2005) et l'asymétrie de l'information (Vosooghidizaji *et al.*, 2020) sont des obstacles principaux à l'alignement interne et externe et à la planification collaborative (Barratt, 2003). Par ailleurs, il ne suffit pas de partager l'information, il est essentiel de partager une information de qualité : pertinent, précise, suffisante et en temps voulu. Par ailleurs, une fois les priorités stratégiques sont choisies et sont définies, leur réalisation au niveau opérationnel est déterminée par la qualité de leur communication ainsi que par la fréquence et le système de leur évaluation ou de leur mesure.
5) Flexibilité : Miller (1996) a insisté sur la nécessité d'un alignement flexible et dynamique. Ghobadian *et al*. (2007) soulignent que certains chercheurs en stratégie trouvent que trop

d'alignement peut conduire à des entreprises dont les composants sont très étroitement couplés entraînant ainsi des problèmes d'adaptation à un environnement extérieur dynamique (ex. externalisation de l'un des composants).

6) Système de mesure de la performance : Les entités d'une organisation ou d'une CL disposent souvent de mesures de performance locales pouvant être différentes les unes des autres. Un individu n'a pas de contrôle direct sur la performance globale de l'organisation ou de la CL ; une mesure de performance doit donc être conçue pour agir comme un mécanisme de communication, qui encourage le travail d'équipe, établit les responsabilités et s'aligne aux priorités stratégiques (Robson, 2004). La littérature est riche des travaux ayant abordé le rôle des systèmes de mesure de performance dans l'alignement stratégique (ex. Neely *et al.,* 1994 ; Fawcett *et al,*. 1997; Decoene et Bruggeman, 2006 ; Smith et Smith, 2007 ; Martinez, 2007). Fawcett *et al.* (1997) se sont intéressés, en menant une enquête auprès d'un ensemble d'organisations, à la question de la cohérence entre la stratégie, le système de mesure et l'opérationnel. Pour eux, les incohérences entre les priorités déclarées par l'entreprise, en matière de concurrence, et les mesures qu'elle utilise pour surveiller les processus à valeur ajoutée affaiblissent les initiatives stratégiques. En revanche, les mesures qui sont étroitement cohérentes avec les axes stratégiques favorisent la cohésion et renforcent la cohérence de l'opérationnel avec la stratégie. Fawcett *et al.* (1997) ont réalisé des analyses de corrélation révélant que la cohérence est faible entre les priorités stratégiques et le système de mesure ainsi qu'entre les priorités stratégiques et la performance opérationnelle. Cependant la corrélation s'est avérée forte entre le système de mesure et la performance opérationnelle. Ces résultats montrent que les organisations trouvent des difficultés à traduire leurs orientations stratégiques en des résultats tangibles. Ceci met en évidence le fait que le système de mesure a un impact important sur les résultats. Selon Fawcett *et al*. (1997) il semblerait que « ce qui est mesuré est fait » soit plus qu'un cliché managérial. Ils ajoutent que les opérationnels font plus attention à ce qui est mesuré qu'aux derniers slogans et orientations concurrentielles adoptés par la direction générale, d'où la nécessité d'aligner le système de mesure de performance avec la stratégie. Lorino (1992) et Bouquin (1994,1997) se sont intéressés au rôle du contrôle de gestion dans la mise en œuvre de la stratégie aux niveaux inférieurs. Le contrôle de gestion est considéré comme un moyen d'aide à la décision pour les managers afin qu'ils puissent réaliser leurs objectifs en termes d'efficacité et d'efficience (figure 3). Pour Anthony (1988), « Le contrôle de

gestion est le processus par lequel les managers influencent d'autres membres de l'organisation pour mettre en œuvre ses stratégies ». Les organisations sont fondées sur une décomposition verticale en des centres de responsabilité. « Un centre de responsabilité est, plus généralement, une entité dont le dirigeant s'engage à atteindre certains résultats à échéance convenue moyennant mise à disposition de moyens préalablement définis » (Bouquin 1994). La mise en œuvre de la stratégie est fondée sur le découpage de ses objectifs dans le temps et dans l'espace (Bouquin, 1994) : identifier les facteurs clés dont dépend la réussite de la stratégie, s'en servir pour assigner des objectifs et des actions aux managers du niveau tactique et par la suite aux opérationnels (découpage temporel), et rattacher ces objectifs aux différents centres de responsabilités (découpage spatial) dont les missions et les indicateurs de performance deviennent ainsi clairs. Le processus de planification repose sur la cohérence verticale entre les objectifs stratégiques, tactiques et opérationnels et sur la coordination des objectifs des différents centres de responsabilités (ex. entités). Ces objectifs doivent être traduits par des indicateurs pertinents dans le système de mesure de performance. Pour orienter les responsables vers à la coopération et la performance globale, il faut que les mesures d'évaluation des résultats de leurs entités soient également orientées performance globale.

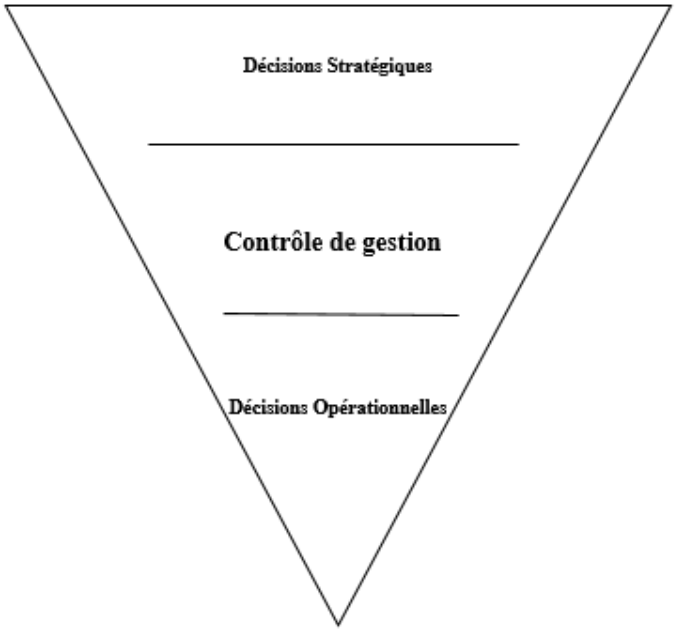

Figure 3 : Rôle du contrôle de gestion selon (Anthony, 1988)

7) Modèles de décision : L'introduction des ordinateurs et l'adoption de nombreux modèles mathématiques et d'autres outils de simulation ont eu un grand impact sur le développement

du SCM. En effet, pour l'aide à la prise de décision à tous les niveaux décisionnels, les managers peuvent s'appuyer sur des modèles. L'optimisation part d'une modélisation mathématique d'un problème décisionnel et s'appuie sur des algorithmes de résolution permettant de trouver la bonne solution à un problème défini par l'utilisateur et modélisé par un ensemble de paramètres et de contraintes. Étant donné un contexte décisionnel, une décision est optimale si elle est la meilleure solution vis-à-vis le critère de choix sélectionné. Dans la prise de décision il n'y a pas de solution optimale absolue ; elle dépend de la définition du problème et donc des contraintes et des paramètres considérés (informations). Car, en raison de la rationalité limitée, analysée par Herbert Simon (1957), il est impossible pour « un esprit simplement humain de saisir la totalité des éléments pertinents, en regard de la décision qu'il lui faut prendre ; cela indépendamment de toute considération relative à l'incertitude exogène ou stratégique qui pourrait peser sur la prise de décision » (Quinet, 1994). La simulation, vise à anticiper le comportement d'un système productif en réponse à un ensemble de décisions préalablement prises, mais généralement sans utiliser d'algorithmes spécifiques pour faire des améliorations. Le domaine de la simulation comporte plusieurs techniques : la simulation à évènements discrets, la dynamique des systèmes et la simulation multi agent (voir 3.2 du chapitre 4). Dans cette thèse nous intéressons particulièrement aux modèles. La section suivante est dédiée à la discussion des défis des modèles quant à la cohérence des décisions de la CL.

4. MODÈLES D'AIDE À LA DÉCISION

Cette section est dédiée à la discussion des défis des modèles de décision par rapport à la cohérence des décisions. Elle est divisée en quatre sous-sections : la sous-section (4.1) définit et présente les caractéristiques d'un modèle de décision ; la sous-section (4.2) porte sur une brève description d'un système d'aide à la décision ; la sous-section (4.3) parle des défis de la modélisation physique, retenue dans un modèle, par rapport à la cohérence de la CL ; finalement la sous-section (4.4) introduit les défis de l'utilisation de la valorisation économique dans les modèles de décision par rapport à la cohérence et la pertinence des décisions.

4.1 *Modèles de décision*

Un modèle fait référence à toute forme de représentation symbolique des suppositions relatives

à la réalité. Il est une représentation simplifiée d'un système ou d'un phénomène, comportant les suppositions requises pour décrire le système ou expliquer le phénomène. Les modèles de décision sont développés en partant du principe qu'ils peuvent expliquer et saisir le comportement d'un système physique affecté par un ensemble de décisions. Ils permettent d'améliorer la compréhension du monde réel pour améliorer la prise de décision et d'élaborer une méthode rigoureuse pour poser puis résoudre un problème.

Les modèles permettent l'analyse de la décision en essayant de fournir des réponses aux questions soulevées par des acteurs impliqués dans un processus de décision. L'analyse de la décision ne vise pas à recherche la meilleure solution (solution optimale) mais à intervenir dans le processus de décision en imaginant les compromis possibles, communiquant, coordonnant, contrôlant ou motivant. Les décisions dans les modèles sont décrites soit par des variables quantitatives (ex. la quantité à commander, la capacité à installer), soit par des variables qualitatives (ex. l'ordonnancement des ordres de fabrication, la localisation des installations) souvent représentées par des variables binaires. Ces variables sont appelées "variables de commande". Elles affectent, par un ensemble de relations causales, les caractéristiques de fonctionnement du système physique. Ces relations causales permettent au modèle de prédire l'état futur du système physique modélisé (Bertrand et Fransoo, 2002), traduit par les valeurs de paramètres physiques spécifiques (ex. le niveau des stocks, le temps d'occupation des installations, le kilométrage parcouru). Ces derniers sont généralement appelés "variables d'état" (Giard, 2017). En plus des variables d'état et de commande, au niveau physique, un modèle fait appel à des paramètres physiques. Ces derniers « fournissent la base de description du processus physique sur lequel les variables de commande vont agir » (Giard et Pellegrin, 1992). Par ailleurs, la modélisation d'un problème décisionnel contraint le modèle de décision à faire intervenir les caractéristiques suivantes (Min et Zhou, 2002) : *i)* un objectif quantifiable parfois appelé "critère de choix" ou "fonction-objectif" ; *ii)* des contraintes : de nombreux problèmes de décision comportent une ou plusieurs contraintes (ex. des matières premières et des capacités limitées), elles représentent des restrictions imposées à une série d'alternatives de décision que l'entreprise peut choisir ; *iii)* une série de solutions alternatives envisagées : par exemple, pour minimiser les coûts d'une opération de fabrication, les solutions alternatives disponibles peuvent être : poursuivre la fabrication avec les conditions actuelles, changer la méthode de fabrication ou sous-traiter le travail à une tierce partie ; et *iv)* la prévision des coûts et des avantages de chaque solution alternative.

Un modèle de décision a plusieurs caractéristiques qui définissent sa structure :

- Le degré de certitude des informations utilisées : soit les caractéristiques du système de production et de son environnement sont considérées comme connues avec certitude et la problématique décisionnelle est posée dans un contexte déterministe, soit elles ne le sont pas (Wierman, 2010). Lorsque les caractéristiques du système productif sont connues avec certitude (paramètres), la valeur du critère de performance est certaine. Si la demande ou les caractéristiques de fonctionnement du système sont aléatoires, le critère de performance est une variable aléatoire. C'est-à-dire que l'environnement est stochastique et que la recherche de solutions analytiques repose sur une espérance mathématique. L'environnement est incertain lorsque l'information sur les distributions de probabilité des paramètres n'est pas connue (Govindan et Fattahi, 2017). Par ailleurs, un modèle de décision est caractérisé une granularité spatiale et temporelle :
- Le périmètre spatial du modèle définit le système productif, constitué de ressources matérielles et humaines, pris en compte dans le modèle. Soulignons que les conséquences des décisions fournies par un modèle de décision peuvent se propager à d'autres entités de la CL qui ne sont pas couvertes par ce modèle.
- La granularité spatiale concerne le degré de détail considéré qui, à son tour, détermine la granularité des informations fournies à l'utilisateur.
- Le périmètre temporel définit l'intervalle de temps pris en compte par le modèle dans la description du fonctionnement du système productif.
- La granularité temporelle définit la plus fine maille temporelle utilisée pour définir des flux de produits ou de prestations dans le modèle.

Les granularités physique et temporelle ne sont pas indépendantes. La granularité est fine dans l'analyse des décisions opérationnelles et plus agrégée dans les autres cas. Plus l'horizon temporel est long ou le périmètre physique est large, plus le niveau d'information est agrégé.

L'usage d'un modèle dans un processus de décision peut soulever de nombreux problèmes : *i)* lors de la définition du problème des points de vue conflictuels peuvent apparaître (impact sur les parties prenantes) ; *ii)* lors du développement du problème, il faut qu'il y ait une adéquation du scénario du modèle à des modèles connus ; *iii)* l'acquisition des données dépend de la disponibilité et la validité des données utilisables ; *iv)* le développement

d'une solution dépend de la disponibilité de techniques de résolution et *v)* la mise en œuvre de la solution requiert le support aux utilisateurs.

De surcroît, les solutions proposées par l'algorithme peuvent être opaques pour des raisons techniques ou sociales (propriété intellectuelle). Un algorithme est transparent lorsque les facteurs qui influencent la solution sont visibles et transparents pour les personnes qui utilisent, contrôlent ou sont affectées par le processus de décision. Cette transparence repose sur un principe d'intelligibilité tant en termes de procédures que de solutions et sur la responsabilité de ceux qui utilisent les solutions de l'algorithme.

4.2 *Systèmes d'Aide à la Décision*

Il est ici nécessaire de rappeler d'une deuxième typologie des décisions de gestion proposée par Ackoff (1967) :

- Les décisions pour lesquelles des modèles adéquats sont disponibles ou peuvent être construits et à partir desquelles des solutions optimales (ou quasi optimales) peuvent être dérivées. Elles sont des décisions structurées.
- Décisions pour lesquelles des modèles adéquats peuvent être construits mais dont on ne peut extraire de solutions optimales. Elles sont des décisions semi-structurées.
- Décisions pour lesquelles des modèles adéquats ne peuvent être construits. Elles sont des décisions non structurées.

Les décisions structurées, semi-structurées ou non structurées peuvent concerner n'importe quel niveau de décision : stratégique, tactique ou opérationnel. Au niveau tactique par exemple, Giard (2003) souligne que la révision d'un programme de production de planification glissante est une décision structurée, la gestion d'un projet de lancement de produit nouveau est une décision semi-structurée tandis que la réponse à un appel d'une entreprise d'ingénierie électrique est une décision non structurée.

Ce clivage est adopté dans le courant des Systèmes d'Aide à la Décision (Decision Support Systems (DSS)). Keen et Scott-Morton (1978) décrivent comment les systèmes informatiques peuvent être conçus pour servir à l'aide à la prise de décisions semi-structurées. Pour eux cette catégorie de décision représente le domaine où la plupart des managers prennent des décisions et c'est dans ce domaine où l'impact du DSS a le plus grand potentiel. Les DSSs

visent donc les décisions dans lesquelles il existe une structure suffisante pour que les techniques informatiques et les modèles analytiques soient utiles, mais où le jugement des managers est essentiel (Parker et Al-Utaibi, 1986). Dans ce cas, les modèles de décision sont intégrés dans des DSSs.

Les bases du DSS ont été établies par Gorry et Scott Morton (1971), puis transformées en un véritable système par Keen et Scott Morton (1978). Les développements des systèmes d'information et des technologies de l'information ont considérablement accru le potentiel du DSS (Shim *et al.*, 2002 ; Eomi et Kim 2006 ; Bhargava *et al.*, 2007…) sans en altérer la raison d'être. Er (1988) décortique les mots constituant le concept du DSS : le mot décision implique la résolution de problèmes. Pour lui la décision et la résolution de problèmes vont de pair : en prenant des décisions, on résout des problèmes ; inversement, en résolvant des problèmes, on prend des décisions à chaque étape. L'aspect « support » du DSS implique l'utilisation de technologies informatiques et de modèles analytiques pour aider les managers pendant le processus de prise de décision. Finalement le mot « système » implique un système d'interactions homme machine, ainsi que sa conception et sa mise en œuvre.

La littérature ne présente pas une définition commune d'un DSS. Les auteurs se contentent de la présentation de ses caractéristiques. Sprague Jr (1980) liste un ensemble de ces caractéristiques :

- Les DSSs ont tendance à s'adresser aux problèmes moins bien structurés et insuffisamment spécifiés auxquels sont généralement confrontés les managers.
- Ils tentent de combiner l'utilisation de modèles ou de techniques analytiques avec les fonctions traditionnelles d'accès et de récupération des données.
- Ils se concentrent spécifiquement sur les fonctionnalités qui les rendent faciles à utiliser par des personnes non-informaticiennes dans un environnement interactif.
- Ils mettent l'accent sur la flexibilité et l'adaptabilité pour s'adapter aux changements de l'environnement et à l'approche décisionnelle de l'utilisateur.
- Er (1988) ajoute que les DSSs soutiennent mais ne remplacent pas les managers dans la prise de décision. Il ne s'agit pas de la précision de décision automatique.
- Les DSSs organisent les données et les modèles autour de la ou des décisions et sont initiés et contrôlés par l'utilisateur (Parker et Al-Utaibi, 1986).

Fondamentalement, les DSSs comprennent (figure 4) : *1)* une interface permettant d'exprimer formellement un problème complexe partiellement structuré pour définir un problème structuré ; *2)* un ou plusieurs modules servant à résoudre le problème structuré, généralement fondés sur des modèles d'optimisation ou de simulation (Power et Sharda 2007) ; 3) une interface capable d'explorer toutes les conséquences d'une solution obtenue et de l'ajuster marginalement ou de la valider ; 4) si aucune de ces solutions n'est acceptable, le DSS est alors employé pour définir un nouveau problème structuré en utilisant la rétroaction des formulations précédentes qui n'ont pas donné de solution satisfaisante.

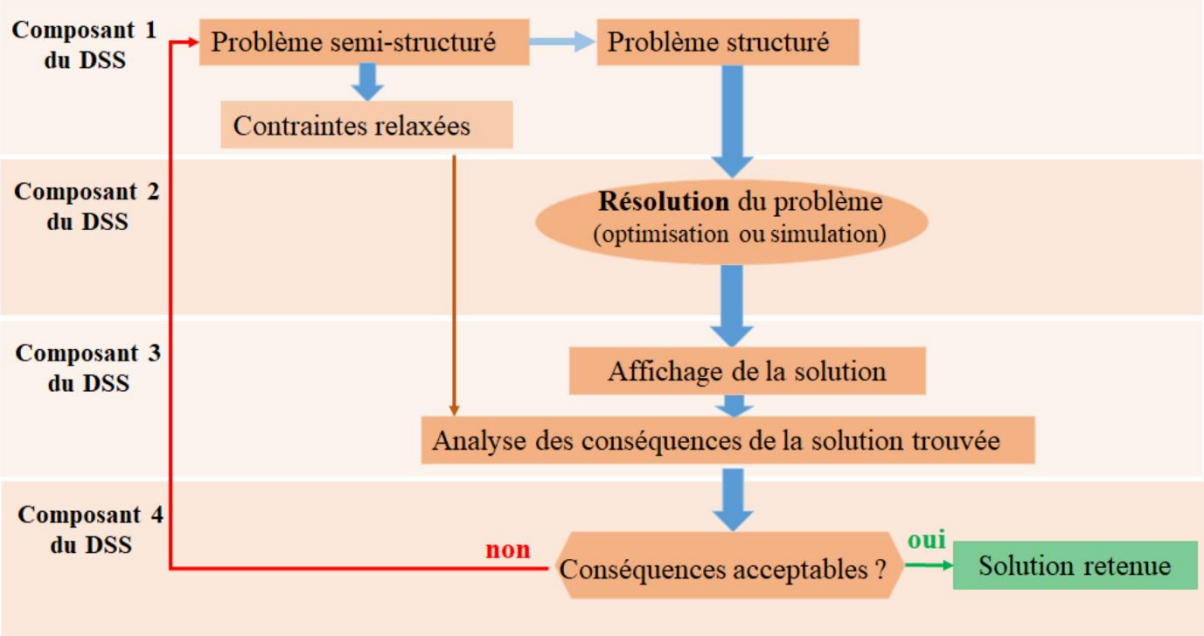

Figure 4 : Composants d'un DSS selon Keen et Scott-Morton (1978)

Dans cette thèse nous nous intéressons aux modèles de décision, utilisés soit pour la prise de décision automatique ou soit intégrés dans des DSSs. Ils reposent sur *i)* une représentation simplifiée du système physique opérant qu'il cherche à évoluer et *ii)* sur un critère de choix lié à la performance de ce système physique. La figure 5 de Le Moigne, tirée de Mirdamadi (2009), illustre les interactions entre le système d'information, un modèle de décision et le système physique étudié.

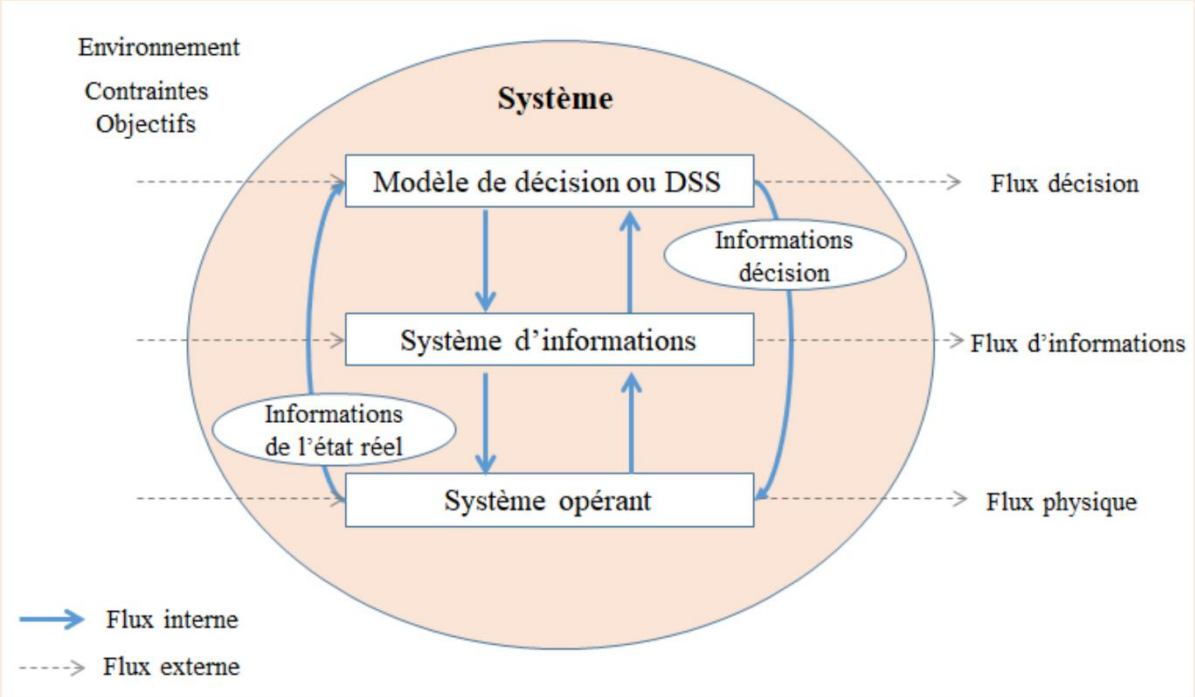

Figure 5 : interactions entre un modèle de décision, le système d'information et le système physique (Mirdamadi, 2009)

Dans l'analyse présentée dans le reste de ce chapitre nous allons parler des modèles de décision. Les problèmes méthodologiques qui seront évoqués concernent également les DSSs.

La représentation du système physique par un modèle, est étroitement liée au niveau décisionnel qu'il cherche à éclairer. Cette différence de représentation, si elle n'est pas gérée, peut conduire à des problèmes d'incohérence entre les niveaux de décision. Par ailleurs, les modèles sont souvent fondés sur un critère économique (critère de choix). Giard (2017) indique que la question de cohérence devient plus compliquée lorsque les modèles de décision considérés, reposent sur des modèles économiques qui ne sont pas pertinents et cohérents par rapport aux décisions étudiées, et lorsque les entreprises intégrées utilisent des systèmes de comptabilité de gestion différents qui ne sont pas homogènes entre eux. Mirdamadi (2009) souligne que les systèmes d'information sur lesquels les modèles prédictifs sont fondés constituent la base d'architecture du contrôle à distance par les modèles. Un modèle de décision peut donc fournir des décisions incohérentes soit parce que le modèle est mal conçu, mal utilisé ou mauvais, soit parce que les informations sur lesquelles il se fonde ne sont pas appropriées.

4.3 *Les défis de la modélisation physique*

« Modéliser, c'est choisir de privilégier certains aspects du réel que l'on décrit de manière formalisée pour faire apparaître des relations d'interdépendance, permettant, à l'idéal, de prévoir l'évolution des variables retenues et/ou de leurs relations » (Bouquin, 1994). Un modèle est construit à travers un processus interactif et consultatif entre les propriétaires de problèmes (les managers) et les spécialistes de la modélisation (Phillips, 1984). Il exprime une réalité sociale (pouvant évoluer) en se basant sur la compréhension commune du problème par ses propriétaires (Phillips, 1984). Ceci parce qu'un modèle doit avoir du sens pour ceux qui vont l'utiliser. Les différences entre les trois types de décisions en SCM (tableau 1) ont des implications importantes sur l'élaboration des modèles de décision pour résoudre des problèmes à chacun des niveaux de décision. Bien que les trois niveaux de décision soient concernés, ici nous nous concentrons sur les modèles des niveaux tactique et opérationnel. Les modèles de la planification tactique cherchent généralement à satisfaire un carnet de commandes prévisionnel tout en minimisant les coûts. Ils s'intéressent à l'affectation des produits aux entités de production du réseau de la CL, à la détermination des quantités de production et des niveaux des stocks et à la détermination des quantités de transferts de matières entre les entités. Les modèles de la planification tactique considèrent un niveau agrégé des informations retenues pour la description du système physique étudié alors que les modèles du niveau opérationnel fournissent un niveau de détail fin. Ceci est dû, d'un côté, au fait que les managers à ces deux niveaux de décision ont des préoccupations différentes : un niveau de détail très fin ne fait qu'alourdir l'interprétation de la sortie d'un modèle pour un manager du niveau tactique qui a besoin de voir les valeurs des variables bien spécifiées pour ses objectifs. D'un autre côté, les différences en termes détendue de l'horizon temporel et du périmètre physique considérés obligent, pour des raisons de techniques de modélisation et du temps de résolution, les modèles de la planification tactique à retenir un niveau de détail agrégé (Kreipl et Pinedo, 2004). Dans la littérature, les modèles tactiques sont classés comme des modèles de planification agrégée (aggregated planning models) (Bitran et Tirupati, 1993). Les modèles opérationnels, considèrent des horizons de temps courts et des périmètres physiques réduits. Au niveau opérationnel chaque maillon de la CL cherche à optimiser sa performance locale, la consolidation des optimaux locaux ne correspond pas forcément l'optimum global du niveau supérieur (principe d'agrégativité (Giard, 2003). Par ailleurs, les managers aux différents niveaux de décision ont des visions et des objectifs différents, ceci, en plus de la question de

granularité, font que les modèles de la planification tactique n'intègrent pas les contraintes du niveau opérationnel. Ces différences en termes d'objectifs et de niveau de détail, entre les modèles tactiques et les modèles opérationnels, mènent à des problèmes d'incohérences et d'infaisabilité. Pour Beaudoin *et al,* (2008) des incohérences peuvent apparaître en raison d'objectifs conflictuels à différents niveaux de planification, tandis que l'infaisabilité résulte généralement de l'agrégation des informations (Gelders et Van Wassenhove, 1981) et de la perte de cohésion entre les modèles et la réalité. Tosi (2008) souligne que selon March et Simon (1958), les différences d'objectifs et de perception de la réalité peuvent être une source de conflit entre les groupes.

Même si les modèles répondent à des problématiques décisionnelles différentes, l'un de leurs défis fondamentaux, comme le disent Weintraub et Davis (1996), consiste à reconnaître et à intégrer différents décideurs qui ont des problèmes et des objectifs différents mais qui sont inévitablement liés entre eux par un problème hiérarchique (planification). Le développement de modèles de décision intégrés qui traitent tous les niveaux de décision simultanément peut paraître attrayant. En revanche, cette solution présente plusieurs limites et inconvénients. D'abord, ces modèles ont tendance à être très vastes et, dans la plupart des situations pratiques, il serait très difficile, voire impossible, d'obtenir des solutions optimales dans un temps et à un coût raisonnables. En outre, même si la puissance de calcul et les capacités méthodologiques permettent de résoudre un grand modèle détaillé, l'approche est inappropriée car elle ne répondrait pas aux besoins de gestion à chaque niveau de l'organisation et empêcherait l'interaction entre les modèles et les gestionnaires à chaque échelon de l'organisation (Bitran et Tirupati, 1993). En outre, ces modèles intégrés auront des utilisateurs différents avec des fréquences de prise de décision très différentes. Ils seraient fondés sur plusieurs hypothèses simplificatrices qui font que l'application de leurs résultats sur le terrain est trop difficile.

Le deuxième courant de recherche dans ce volet consiste en le développement de plusieurs modèles interconnectés qui sont utilisés d'une manière séquentielle. L'output du modèle supérieur contraint le modèle inférieur envoyant, à son tour, un retour d'informations concernant la faisabilité et la qualité des objectifs reçus. La littérature présente des articles qui traitent des modèles et des approches intégrés pour la planification hiérarchique tactique et opérationnelle (Kumar et Rajotia, 2006 ; Ivanov *et al.,* 2010 ; Shah et Ierapetritou 2012 ; Leiras *et al.,* 2013 ; Ebadian *et al.,* 2014, etc.). Ils utilisent un ensemble de techniques comme l'approche de décomposition lagrangienne, l'approche itérative et les modèles hiérarchiques.

Cependant, tous ces articles présentent des modèles normatifs, dont peu considèrent l'environnement CL. Maravelias et Sung, (2009) qui se sont intéressés à une revue des articles traitant des modèles intégrés de la planification tactique avec l'ordonnancement à court terme, ont conclu que malgré l'ensemble des approches, présentées dans la littérature, qui visent à aligner les décisions tactiques et opérationnelles dans les modèles de décision, la solution des problèmes industriels reste un défi. Mula *et al.* (2010) présentent une revue d'articles traitant des modèles mathématiques dans la planification de la production et du transport de la chaîne d'approvisionnement selon un ensemble de critères (niveau de décision, approche mathématique, structure de la CL…). Ils signalent le manque d'intégration et de structure hiérarchique des niveaux de planification tactique et opérationnelle, dans le contexte de la CL, comme étant l'une des lacunes les plus importantes de la littérature. Même si certains articles font fonctionner leurs modèles en utilisant un ensemble de données réelles, des simplifications sont apportées, diminuant ainsi leur applicabilité dans un contexte industriel réel. Ajoutons finalement, que la réussite des approches intégrées est problématique car elle repose sur la vérification de principes de contrôlabilité et d'agrégativité, très difficiles à mettre en œuvre dans la pratique (Giard, 2003) car il n'y a pas de passage direct d'un niveau de décision à un niveau inférieur.

Dans cette thèse, nous cherchons à comparer les modèles de décision, des niveaux tactique et opérationnel, afin de relever les problèmes méthodologiques liés à leur structure et leur utilisation. Nous détaillerons dans le chapitre 2 la description d'une étude de cas réel dans lequel des modèles de décision sont utilisés mais dans lequel des problèmes d'incohérence, entre les niveaux tactique et opérationnel, sont soulevés.

Le contexte industriel est caractérisé par la variabilité de l'état de l'atelier, les comités opérationnels et tactiques peuvent avoir des objectifs et des contraintes conflictuelles, les comités tactiques ne sont pas régulièrement présents sur les sites. Ils peuvent avoir un état d'esprit différent de celui du comité opérationnel et ils ont tendance à considérer la capacité souhaitable du système plutôt que celle qui est disponible. Nous n'avons pas trouvé d'articles qui utilisent une méthodologie basée sur des études de cas pour souligner les problèmes méthodologiques pratiques posés par le manque de cohérence dans la structure ou l'utilisation des modèles de décision des niveaux de décision tactique et opérationnel.

En réalité, les modèles décisionnels sont souvent utilisés de manière isolée par rapport aux autres niveaux de décision et à leur impact sur les autres entités. Par exemple, les

responsables de la planification utilisent souvent leurs modèles sans vraiment tenir compte de la capacité disponible et de l'état réel de l'atelier. Cela donne lieu à une planification souvent sous-optimale ou non réalisable et qui est rarement suivie de façon marquée au niveau des sites en raison du manque de retour d'informations du niveau opérationnel (Zhang et Mallur, 1994). Le niveau supérieur ne dispose pas de toutes les informations et de toute la logique utilisée par le niveau opérationnel (ex. estimation des capacités, désagrégation des objectifs du niveau supérieur, objectifs suivis par les opérationnels, outils utilisés pour les atteindre, difficultés rencontrées) et ne sait pas pourquoi le résultat est sous-optimal (McKay *et al.,* 1995). L'applicabilité et la pertinence des modèles de décision diminuent avec le manque d'interrelation avec les autres niveaux de gestion (Ivanov, 2010). Selon Ivanov (2010), l'alignement des trois niveaux de décision est crucial, car il permet de mettre en place une planification réalisable et équilibrée, et de fournir un retour d'information pour la vérification et l'adaptation de ces plans en fonction des performances et des capacités réelles des processus de la CL. Zhang et Mallur (1994) résument le problème de l'intégration des processus de planification et d'ordonnancement comme celui du retour d'informations.

D'un point de vue opérationnel, les objectifs de production (utilisés comme intrants dans un modèle d'ordonnancement) sont obtenus, en éclatant dans le temps et dans l'espace, la sortie du modèle de planification tactique. La réussite du processus de la planification hiérarchique par les modèles dépend également ce que les managers d'un niveau savent de l'autre niveau, du rôle de l'information à un niveau et entre les niveaux (McKay *et al.,* 1995) et de l'habileté des managers à travailler ensemble pour utiliser leurs modèles. L'utilisation d'un modèle ne doit être isolée. Sinon, le manque de coordination conduit à des objectifs irréalisables et à des conflits entre les niveaux de gestion. Les niveaux supérieurs imposent des contraintes (ex. ressources allouées) qui affectent les performances des niveaux inférieurs. Les modèles de niveau tactique prescrivent la gestion des flux de matières au sein des entités et entre elles, mais ils sont limités par les capacités, la conception et le niveau de flexibilité définis au niveau stratégique. De même, les modèles opérationnels sont contraints par la planification établie au niveau tactique. À leur tour, les modèles tactiques, ne pouvant pas prendre en compte une granularité détaillée, doivent communiquer avec les modèles opérationnels afin d'obtenir des informations fiables, puis définir des objectifs réalisables et trouver des solutions optimales pour leur réalisation. Pour que le modèle tactique puisse définir des objectifs pertinents et réalisables, il faut qu'il soit alimenté par des informations pertinentes concernant les coûts et

les capacités, ces informations doivent être fournies par des modèles de niveau opérationnel (Schmidt et Wilhelm, 2000 ; Maravelias et Sung, 2009 ; Leiras et *al.*, 2013). Ce sont les managers du niveau opérationnel qui ont accès à des informations (y compris des connaissances sur la source et la qualité de l'information) qui peuvent être utilisées pour adapter et ajuster les décisions. Ils voient le résultat direct des décisions et savent comment les actions sont susceptibles d'être menées. Les niveaux inférieurs sont bien placés pour savoir ce qui se passe et ce à quoi on peut s'attendre (McKayet *et al.*, 1995). De surcroît, le degré de sous-optimalité du processus de la planification dépend de la qualité du schéma de coordination utilisé pour relier entre les niveaux de décision, du niveau de coordination entre les entités du niveau opérationnel et du niveau de flexibilité qui y est offerte.

4.4 *Les enjeux de la valorisation économique dans l'alignement par les modèles*

L'évaluation des décisions alternatives, dans les modèles de décision, repose sur un critère en lien avec la performance globale du système étudié. Ce critère peut concerner l'efficacité et être physique (taux d'utilisation des machines, % de la demande insatisfaite...); dans ce cas, on suppose que la variation de la performance économique de l'entreprise (coût ou marge) est liée à celle du critère physique considéré et est supposée varier toujours dans le même sens (ou dans le sens opposé). Le modèle de décision peut rechercher des solutions efficientes. Dans ce cas, le critère de choix est fondé sur une évaluation financière des ressources et fait appel à un modèle économique pour estimer le coût différentiel des décisions alternatives. Un autre défi des modèles consiste alors en la cohérence entre les indicateurs de choix (indicateurs de performance) qui sont considérés avec les indicateurs de performance du niveau supérieur et avec ceux des autres centres de responsabilités sur le même niveau décisionnel. L'enquête de Fawcett *et al.* (1997) montre que parmi un ensemble d'indicateurs de priorité : flexibilité, fiabilité, innovation, qualité et coût, ce dernier s'est avéré être la mesure la plus répandue dans les organisations. Ils ajoutent que l'étude de certaines décisions nécessite la prise en compte des informations sur des coûts (*non-traditionnelles ou non-habituelles*) qui ne sont pas traçables dans le système de mesure des organisations concernées.

Lorsqu'un critère économique est retenu, la pertinence de la solution fournie par le modèle de décision dépend de la compatibilité entre le modèle économique utilisé et le contexte décisionnel étudié ; un écart important entre leurs hypothèses implicites, invalide la pertinence

de la solution proposée. Par exemple, les modèles de décision au niveau opérationnel, étant obligés de considérer des périmètres physiques réduits, doivent s'appuyer sur une évaluation économique appropriée leur permettant de s'aligner aux objectifs globaux. Le plus souvent les auteurs des modèles se concentrent sur les techniques de modélisation et sur les méthodes de résolution. Ils ne mettent pas l'accent sur la pertinence et la cohérence du modèle économique utilisé avec les hypothèses implicites de fonctionnement de leur modèle de décision. Ils supposent que les équipes de modélisation peuvent travailler indépendamment de celles de la comptabilité de gestion. Les coûts régulièrement fournis par le système de comptabilité de gestion de l'entreprise ne peuvent pas convenir à tout type de décisions. De surcroît, les systèmes de comptabilité de gestion des entreprises sont généralement orientés vers le diagnostic et le contrôle plutôt que vers la prise de décision.

Des études ont souligné que souvent les managers des CLs ne sont pas satisfaits des informations, sur les coûts, qui leur sont fournies par leurs systèmes de comptabilité de gestion. Selon McKinnon et Bruns (1992), « les managers sont avides de meilleures informations pour appuyer leur activité ». Les résultats d'une enquête récente (Lawson, 2017) montrent que les professionnels de la CL considèrent souvent que le système de comptabilité de gestion de leurs entreprises n'est que peu utile pour générer des remises en question et pour prendre des décisions. Il met en avant trois causes principales expliquant ce résultat : *i)* de nombreuses organisations s'appuient sur des systèmes de la comptabilité financière, orientés vers l'extérieur, pour produire des informations servant la prise de décision interne de l'entreprise ; *ii)* de nombreuses organisations utilisent des modèles de coûts qui sont obsolètes ; ces derniers ne sont pas adaptés aux défis et à l'environnement actuels de l'organisation ; *iii)* la troisième cause consiste en la résistance au changement de la part des professionnels de la finance et de la comptabilité. Cette résistance est amplifiée par le manque de pression de la part des managers, qui utilisent les coûts, pour améliorer la précision et la pertinence de ces données (Kilcarr, 2018). Ces analyses se rapprochent de la conclusion de J. Maurice Clark, (1923) : « Pour satisfaire aux différents objectifs concernant les informations sur les coûts, il doit y avoir des études et des analyses de coûts qui ne font pas partie des livres comptables et qui n'ont pas à être liés par aucune de leurs normes de procédure », citées par (Johnson et Kaplan, 1987).

Une discussion plus détaillée concernant les défis de l'utilisation de l'évaluation économique dans les modèles de décision sera menée dans le chapitre 4. Nous y mettons l'accent sur la forte contingence entre un modèle physique et le modèle économique qui y est

utilisé. Nous y détaillons également les principes d'une approche de valorisation économique appropriée à l'étude des décisions à court terme. Finalement, nous y montrons la pertinence du couplage de cette approche avec un DSS d'ordonnancement d'un ensemble de lignes de production des engrais (présenté dans le chapitre 3). Le fait de travailler sur une modélisation physique et une modélisation économique complémentaires est une approche habituelle en matière d'aide à la décision en SCM et peut constituer un point de similarité fort de notre démarche avec la méthode PREVA (Process Evaluation) présentée dans (Comelli *et al.,* 2008). Cette dernière, fondée sur le couplage entre un modèle d'action (modèle physique) et un modèle d'évaluation des flux financiers, s'est avérée adaptée pour l'étude des décisions à moyen terme (planification tactique (Comelli *et al.,* 2008)) et les décisions stratégiques (comparaison entre : un réseau détenu par l'entreprise mère, un réseau franchisé et un réseau mixte (Féniès *et al.,* 2010, 2014)). La méthode PREVA a été reprise par Retmi (2018) pour l'étude des décisions opérationnelles dans la chaîne logistique de l'OCP. Notre thèse s'inscrit dans une démarche cumulative dans laquelle nous ne nous limitons pas uniquement aux décisions opérationnelles car nous intégrons la question de leur alignement aux décisions prises aux niveaux décisionnels supérieurs (planification tactique).

5. CONCLUSION

Ce chapitre présente le cadre général de notre thèse à savoir celui de la CL et plus particulièrement l'apport des modèles de décision en SCM. Nous avons commencé par définir et présenter les caractéristiques d'une CL, notre domaine d'étude. Nous avons par la suite défini le SCM, présenté la typologie des décisions en SCM et introduit les problématiques de pilotage dans les CLs. Nous nous sommes focalisés, à la fin de ce chapitre, sur les défis des modèles de décision par rapport à la cohérence des décisions dans la CL.

La mise en œuvre de la stratégie dans une CL repose sur une décomposition de ses objectifs dans le temps et dans l'espace. Le découpage dans le temps décline les objectifs d'un niveau décisionnel supérieur aux niveaux inférieurs. Le découpage dans l'espace affecte des objectifs à chaque entité de la CL. Les managers aux différents niveaux décisionnels font appel à des modèles d'aide à la décision. Cette étude de domaine a montré que les modèles de décision jouent un rôle important en SCM management. Ils peuvent être utilisés soit dans un contexte de prise de décision automatique soit dans une approche orientée DSS. Les modèles décisionnels s'appuient sur une représentation physique d'un système productif et d'un ensemble de

décisions possibles, pour orienter la prise de décision, souvent fondée sur un critère économique. Les problématiques traitées peuvent appartenir à n'importe quel niveau de décision (stratégique, tactique et opérationnel). Les différences entre les niveaux de décision, en termes d'horizon temporel, de périmètre physique, de niveau de granularité nécessaire, de degré d'incertitude accepté et des objectifs conduisent à des modèles de décision avec des représentations physiques différentes. Les modèles de la planification tactique considèrent un niveau agrégé des informations, ils ne prennent pas en compte les contraintes du niveau opérationnel, les managers, les utilisant, n'ont pas toute la connaissance de l'état réel du terrain et des préoccupations des opérationnels. Cette différence de représentation pourrait conduire à des problèmes d'incohérence et d'infaisabilité entre les décisions fournies par les modèles tactiques et ceux de la planification opérationnelle. Ce problème de désalignement s'amplifie si les modèles de décision s'appuient sur des approches d'évaluation économique qui ne sont pas appropriées aux décisions étudiées ; l'évaluation économique doit être adaptée au contexte décisionnel étudié par le modèle. Ce travail porte sur les défis des modèles et de l'utilisation de la valorisation économique quant à la cohérence et la pertinence des décisions.

La littérature de la CL présente des travaux ayant déjà traité la question de la cohérence dans les modèles. La majorité de ces travaux portent souvent sur des approches normatives. Dans notre thèse nous nous intéressons à la cohérence entre la planification tactique et la planification opérationnelle faites par les modèles de décision. Nous avons développé un ensemble d'instrumentations d'aide à la décision au niveau opérationnel (chapitre 4 et section 3 du chapitre 5) dans le cadre d'une Recherche-Intervention menée au sein de la CL intégrée du Groupe OCP. Nous comparons ces instrumentations par rapport à un modèle d'optimisation utilisé, au niveau tactique, par le comité de pilotage de l'OCP. Nous montrons leur apport au niveau opérationnel et comment ils peuvent être utilisés pour favoriser la cohérence entre les deux niveaux de décision. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le processus méthodologique de notre travail de recherche.

CHAPITRE 2

MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODOLOGIE RECHERCHE-INTERVENTION POUR L'AMÉLIORATION DE LA PERFORMANCE GLOBALE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE INTÉGRÉE DE JORF DE L'OCP

---

1. INTRODUCTION

Les thèses en sciences de gestion doivent être fondées sur des protocoles méthodologiques rigoureux et un mode de raisonnement robuste. Dans ce chapitre nous visons à décrire le processus de déroulement de notre thèse. Nous commencerons par décrire les principales caractéristiques de la méthodologie Recherche-Intervention constituant la méthodologie de notre thèse. Par la suite, nous présenterons le récit des étapes de mise en œuvre de la méthodologie Recherche-Intervention menée pour développer des approches d'aide à la décision dans la CL de l'OCP.

2. RECHERCHE-INTERVENTION

En sciences de gestion il y a deux façons de concevoir le rapport à la pratique. La première consiste à adopter un point de vue d'extériorité par rapport à son terrain d'étude. Dans ce cas la recherche serait fondée sur les données historiques, des rapports ou des statistiques. La deuxième façon consiste à garder des liens directs avec la pratique et son terrain d'étude. Elle a été développée et utilisée en France sous l'appellation « Recherche-Intervention » (RI). Carrier et Fortin (2003) la définissent « comme une collecte et une analyse systématiques d'informations concernant une réalité particulière de la pratique, en vue de connaître ou de stimuler l'innovation sociale à l'intérieur des établissements où elle se réalise ». La RI rompt avec les recherches positivistes postulant la séparation entre le chercheur et son objet de recherche. Comme pour les anthropologues, la RI s'appuie sur une immersion sur le terrain des organisations afin de les explorer et y mener des actions ou conduire à des transformations de ces organisations (Aggeri, 2016). Elle consiste à développer sur le terrain des outils ou des modèles de gestion dans le cadre d'un projet de transformation. La RI vise à développer des connaissances à la fois scientifiques et utiles à l'action (David, 2000). Elle s'inscrit dans une logique inductive qui fait que la connaissance est produite à partir de l'intervention du chercheur sur le terrain, plutôt que de *forcer* la réalité à adhérer à un cadre théorique prédéfini (Garel, 1998). Ceci n'exclut pas la nécessité de faire des allers-retours entre la théorie et la pratique pour effectuer des analyses pertinentes des données explorées, identifier les problèmes et proposer des pistes d'action. En effet la crédibilité du chercheur repose, entre autres, sur ses capacités à démontrer aux acteurs qu'il dispose d'une expertise suffisante dans la thématique étudiée.

La RI est une variante de la Recherche-Action (RA). Cette dernière est développée pendant les années cinquante par Kurt Lewin qui s'intéressait au rôle et à l'apport de l'action dans la production des connaissances. La RI et la RA ont des similarités et des points de distinction (Duchesne et Leurebourg, 2012). Les deux méthodologies sont menées sur le terrain et ont l'action comme perspective. Elles sont fondées sur des explorations (observation, questionnaires, etc.) menées par les chercheurs en collaboration avec des acteurs sur le terrain. Les deux visent également à résoudre des problématiques définies. Quant aux différences, la principale distinction entre les deux méthodologies est liée à leur degré de formalisation et leur degré de contextualisation (David, 2000). Le premier correspond au degré de définition *formelle* des changements (résultats) produits ou à produire par la recherche. Le deuxième se réfère au niveau d'intégration des changements produits par la recherche. Par rapport à ces deux points, la RI veille sur la progression simultanée de la formalisation et de la contextualisation des changements, alors que la RA se focalise sur la contextualisation des changements et néglige leur formalisation. Ajoutons que la RI est une réponse à un problème rencontré par le terrain qui souhaite obtenir de l'aide pour le résoudre. La recherche-action est une intervention auprès du terrain dans laquelle le chercheur explore et teste une approche de changement (Karlsson, 2016).

La démarche de la RI repose sur quatre principes (David, 2000)

Principe 1 : une compréhension approfondie du système physique étudié, pour identifier des pistes d'évolution possibles, en choisir une, l'implémenter et l'évaluer. En effet, l'intervention nécessite la proximité au vécu des praticiens, l'identification de leurs inquiétudes et leurs problématiques afin de les aider à y faire face.

Principe 2 : la production des connaissances se fait dans l'interaction avec le terrain. Par conséquent, le lieu de production des connaissances et celui de leur validation ne sont pas nettement séparables. Ceci est différent du cas où le chercheur collecte des données du terrain et les analyse ailleurs.

Principe 3 : le chercheur parcourt différents niveaux théoriques. Il se retrouve obligé de revenir à chaque fois pour chercher et comprendre les théories existantes. Ceci explique la difficulté, pour le chercheur, de mener une revue de littérature complètement pertinente avant son immersion sur le terrain et son investigation.

Principe 4 : la recherche-intervention a un caractère normatif.

Un projet de RI émane avant tout d'un problème ressenti par les acteurs au sein de l'organisation, ce qui suscite leur volonté de mener un projet de recherche les aidant à apporter des changements d'évolution. Pour ce faire, le chercheur a tout d'abord besoin d'avoir accès au terrain et par la suite à des entités ou à des données plus spécifiques nécessaires à son diagnostic. Selon Garel (1998) « le chercheur constructiviste fait partie intégrante de ce qui est observé ». Cette première étape préconise l'appui des gens ayant un niveau assez élevé dans la hiérarchie de l'organisation étudiée. La deuxième étape consiste en l'exploration approfondie du terrain (processus) et du vécu des acteurs. Cette étape nécessite la collecte des données et des informations. Elle préconise l'utilisation de la triangulation (Tellis, 1997) des méthodes de recueil (entretiens, observations, documents, appels téléphoniques, etc.). Il s'agit par la suite d'élaborer des cartographies de processus et de décision permettant la compréhension et l'identification facile des problèmes. La troisième étape consiste en le développement des pistes de changement et la formalisation des processus de leur conduite. La quatrième étape est la validation des outils et des approches proposées auprès des acteurs. La cinquième étape, conditionnée par l'obtention de l'autorisation auprès de l'organisation en la quatrième étape, consiste en l'expérimentation des outils et des approches développés pour mesurer leur apport et leurs impacts sur les plans organisationnel, technologique, etc. En parallèle aux étapes précédentes il est nécessaire de revenir à chaque fois aux théories existantes et faire des revues de littérature pour pouvoir mener des analyses pertinentes des phénomènes étudiés et par la suite proposer des axes de changement. Le processus méthodologique adopté est résumé dans la figure 6 :

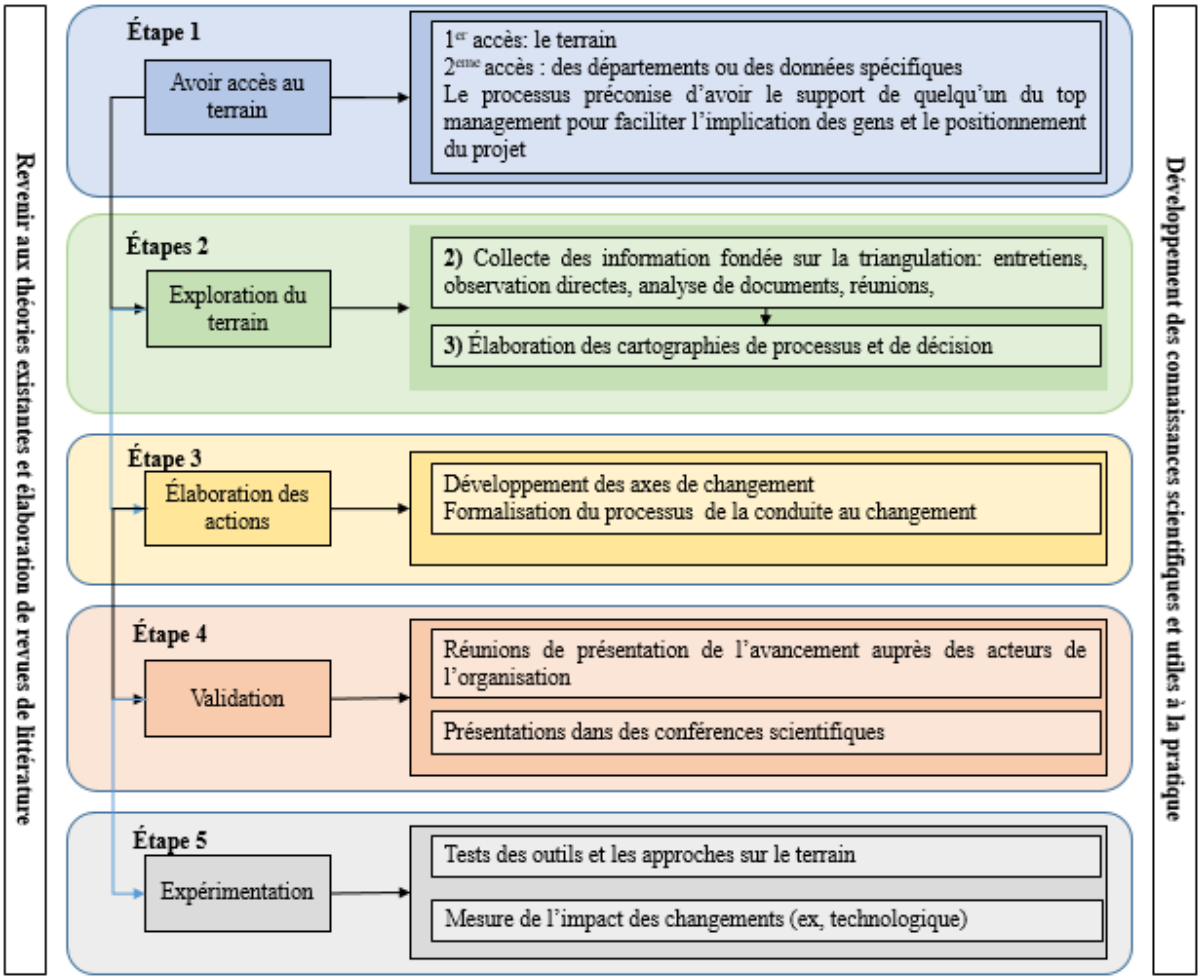

Figure 6 : les étapes de la démarche Recherche-Intervention

Dans ce qui suit nous présentons le protocole méthodologique suivi pour mener à bien le processus de la démarche RI dans le site de Jorf du Groupe OCP.

3. PROTOCOLE MÉTHODOLOGIQUE MIS EN ŒUVRE

Cette section vise à présenter le récit du processus de mise en oeuvre de la démarche RI dans le cas de la chaîne logistique de Jorf du Groupe OCP. Soulignons dès maintenant que cette RI nous a conduite à travailler sur deux volets complémentaires : en premier lieu, une partie modélisation physique et en second lieu, une partie valorisation économique.

Le reste de cette section est organisé comme suit : la sous-section (3.1) est consacrée à la présentation du Groupe OCP et son site de Jorf (notre terrain d'étude). Les sous-sections (3.2) et (3.3) portent sur la description de la mise en œuvre des trois premières étapes de la

méthodologie RI (figure 6) pour les volets modélisation physique et valorisation économique respectivement. La sous-section (3.4) est consacrée à la description des deux dernières étapes (figure 6) portant sur la validation des axes d'intervention et leur expérimentation. Nous avons choisi de les présenter en une section commune pour les deux volets (modélisations physique et économique) parce qu'une réunion de validation, par exemple, pouvait porter sur la discussion ou la présentation de l'avancement des deux volets à la fois.

3.1 *Présentation du terrain*

3.1.1 Présentation de l'OCP

Le Groupe OCP est un leader mondial dans le marché des phosphates et de ses dérivées. Il est intégré verticalement en étant présent dans toute la chaîne de valeur depuis l'extraction des couches du phosphate jusqu'à l'expédition des produits finis par bateaux. L'OCP détient un tiers des parts du marché mondial de l'exportation du phosphate sous toutes ses formes. Il vend la roche, l'acide phosphorique et les engrais. Le Groupe OCP a un portefeuille produit très diversifié : neuf qualités de la roche marchande, deux types d'acide phosphorique et environs 50 de produits engrais. Il sert plus de 160 clients distribués sur 5 continents. La roche phosphatée est la principale source de tous les produits à base de phosphate. Elle est principalement utilisée pour la fertilisation des sols et peut avoir d'autres usages à savoir la production des compléments alimentaires pour animaux, etc. L'acide phosphorique est un produit intermédiaire entre la roche et les engrais. Il est obtenu à partir de la réaction chimique entre la roche du phosphate et l'acide sulfurique. Enfin, les engrais sont obtenus, selon la nomenclature, à base des acides phosphorique et sulfurique et d'autres matières premières.

La chaîne logistique de l'OCP est constituée de 3 grands sites miniers et deux complexes chimiques répartis sur trois axes comme le montre la figure 7 ci-dessous : l'axe nord (Khouribga-Jorf et Casablanca), l'axe centre (Gantour-Safi) et l'axe sud (Boucraa-Laayoune).

Figure 7: les trois axes de la chaîne logistique de l'OCP (Rapport OCP)

Le gisement de phosphate est constitué de multiples blocs de couches situés à différentes positions géographiques. Les caractéristiques physiques et chimiques des couches d'un même bloc sont hétérogènes. De plus, les caractéristiques d'une couche donnée peuvent varier d'un bloc à un autre. Chaque axe commence par des mines d'où les couches de phosphate sont extraites, suivies des installations industrielles de traitement de ces roches (ex. lavage, séchage ou broyage) où s'effectue le blending (mélange) de minerais extraits pour obtenir des qualités marchandes vendues en l'état ou utilisées par la dernière partie de l'axe, pour produire de l'acide phosphorique, puis des engrais (Figure 8). Chaque axe est connecté en aval à un port pour l'exportation des produits et l'importation des quelques matières premières nécessaires. L'ensemble des nœuds du réseau de cette CL sont connectés par différents moyens de transport (convoyeurs, trains, pipelines, etc.).

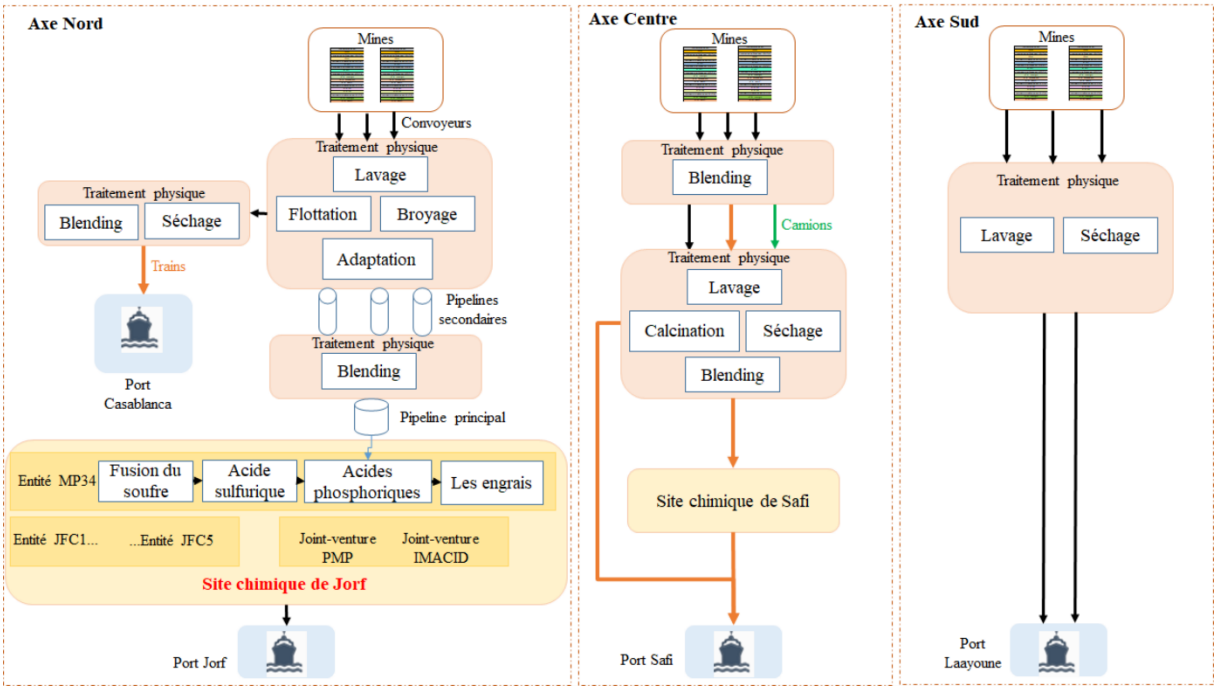

Figure 8 : cartographie macro de la CL de l'OCP

3.1.2 Présentation de Jorf

Notre terrain d'étude est le site de Jorf. Il s'agit du plus grand site chimique au monde de transformation de phosphate ; il est situé à 24 km au sud de la ville d'El Jadida. Le site a l'avantage de la proximité du port de Jorf, l'un des plus importants du Royaume. Il appartient à l'axe nord de la chaîne logistique de l'OCP.

Le site de Jorf contient huit entités appartenant à des périmètres juridiques différents : Il y en a la plus grande entité qui est MP34, 5 *Jorf Fertilizer Companies* (JFD, JFF, JFO, JFQ, et JFT) qui sont des filiales OCP et 2 joint-ventures (PMP et IMACID) que l'OCP a créées en partenariat avec d'autres pays. Les *Jorf Fertilizer Companies* sont créées dans une perspective d'extension de capacité et sont des éventuelles futures joint-ventures avec des futurs partenaires. L'entité MP34 et les 5 filiales (*Jorf Fertilizer Companies*) contiennent chacune quatre usines : production d'acide sulfurique, production d'acide phosphorique 29%, production d'acide phosphorique 54% (obtenu par la concentration de l'acide phosphorique 29%) et production des engrais. Les deux joint-ventures contiennent quant à elles trois usines : production d'acide sulfurique, production d'acide phosphorique 29% et production d'acide phosphorique 54%. Le site contient en amont, des unités de fusion pour la transformation du soufre solide importé en soufre liquide, il est également alimenté par un pipeline transportant

la pulpe du phosphate à partir de la mine de Khouribga et il contient une plateforme commune *Jorf Phosphate Hub* pour la gestion des stocks des matières premières et des produits finis.

Avant de présenter une vue d'ensemble de Jorf, nous décrivons, ci-dessous, les processus de production constituant la chaîne de valeur à Jorf.

3.1.2.1 Atelier d'acide sulfurique

L'atelier sulfurique transforme le soufre liquide en acide sulfurique et génère aussi de la vapeur qui est co-produite et utilisée ensuite dans le site comme source d'énergie. En plus de l'eau et de l'oxygène la production de l'acide sulfurique consomme principalement le soufre liquide. Ce dernier est, soit importé en état solide et transformé en liquide au niveau de l'entité Fusion Filtration Soufre à Jorf, soit importé en état liquide. La fabrication de l'acide sulfurique est réalisée en 3 étapes :

- La combustion : consiste à brûler du soufre dans un four pour former l'anhydride sulfureux (SO2).
- La conversion : consiste à combiner l'anhydride sulfureux à l'oxygène dans un convertisseur pour produire de l'anhydride sulfurique (SO3).
- L'absorption : consiste à combiner l'anhydride sulfurique à l'eau dans des tours d'absorption pour former une solution contenant de 98 à 99% d'acide sulfurique (H_2SO_4).

La figure 9 présente un schéma du processus de production de l'acide sulfurique

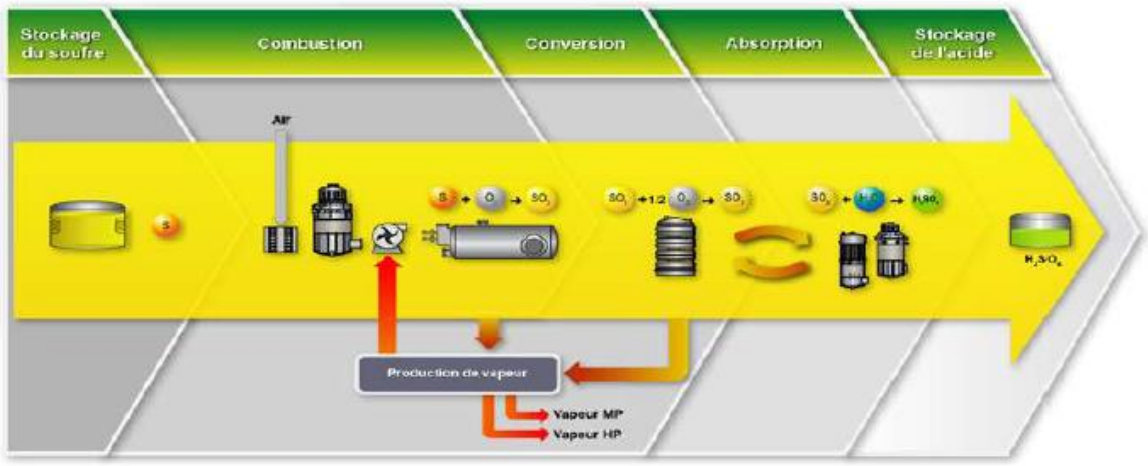

Figure 9 : processus de production d'acide sulfurique (Rapport OCP)

La vapeur produite est utilisée pour la production de l'énergie électrique, pour le nettoyage des installations et par le procédé de concentration au niveau de l'atelier d'acide

phosphorique 54%. La gestion et la distribution de cette vapeur sont assurées par des centrales thermiques. Une partie de l'énergie électrique produite au niveau de la centrale est consommée par les différentes unités du site, l'autre partie est vendue à l'ONEE « Office National de l'eau et l'électricité ». Dans le cas échéant, l'OCP achète l'énergie électrique auprès de l'ONEE.

3.1.2.2 Acide phosphorique

La production de l'acide phosphorique utilise un procédé de fabrication par voie humide, dans lequel l'acide est obtenu par l'attaque directe du phosphate minéral, par un acide fort (acide sulfurique). Les trois principales phases comprennent :

- l'épaississement a pour but d'augmenter la surface d'attaque du minerai par l'acide sulfurique. Il consiste principalement en l'ajout d'un floculant en vue de préparer le phosphate à l'attaque.
- l'attaque : la pulpe de phosphate est attaquée par l'acide sulfurique concentré à 98,5% en milieux aqueux. Le mélange donne une bouillie.
- la filtration consiste à séparer l'acide phosphorique 29% P2O5 du phosphogypse via un filtre rotatif. Le produit est ensuite stocké dans des bacs de décantation.

La production de l'acide phosphorique 54% se fait via la concentration de l'acide 29% (obtenu après attaque et filtration) par le processus de l'évaporation de l'eau.

Les étapes de production des acides phosphoriques sont présentées dans la figure 10 ci-dessous :

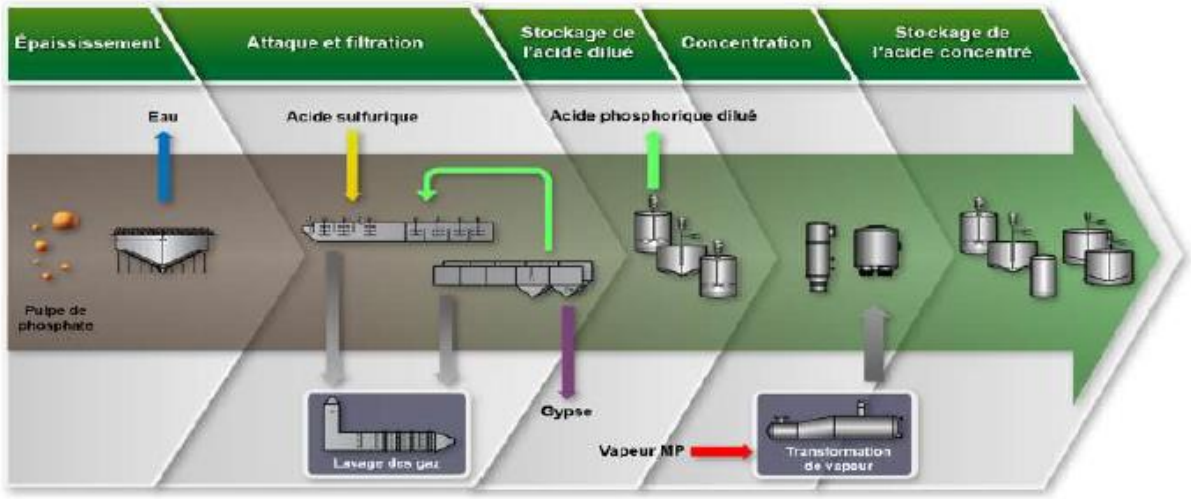

Figure 10 : processus de production d'acide phosphorique (Rapport OCP)

3.1.2.3 Les engrais

L'atelier des engrais produit 5 familles d'engrais : DAP, MAP, ASP, TSP et NPK. Chaque famille donne naissance à plusieurs sous-qualités de produits engrais. Le principe de fabrication des engrais est fondé sur la réaction entre l'acide phosphorique et l'ammoniac (pour les DAP, MAP, ASP), KCL pour le NPK, et sur l'attaque du phosphate par l'acide phosphorique pour le TSP. Pour les engrais DAP, MAP et ASP, la méthode consiste d'abord à neutraliser l'acide phosphorique par l'ammoniac en présence de l'acide sulfurique. Il se forme alors une bouillie qui sera expédiée vers un granulateur. Le produit granulé ainsi récupéré est introduit dans un sécheur chauffé par les gaz provenant d'une chambre à combustion. Dans le cas du NPK, le procédé est identique sauf que l'ammonisation est complétée par l'ajout de potasse dans le granulateur.

À la sortie du sécheur, le produit subit alors une sélection par tamisage à travers un crible. Le produit marchand ainsi obtenu est refroidi, puis enrobé par le fuel afin d'éviter les prises en masse au moment du stockage.

La fabrication du TSP est basée sur la réaction du phosphate broyé avec l'acide phosphorique à 42% P2O5. L'attaque est ensuite complétée par un séchage progressif de la bouillie. Après granulation, le produit subit une sélection dans des tamis vibrants, des broyeurs et des concasseurs.

Le schéma de la figure 11 illustre le processus de production des engrais :

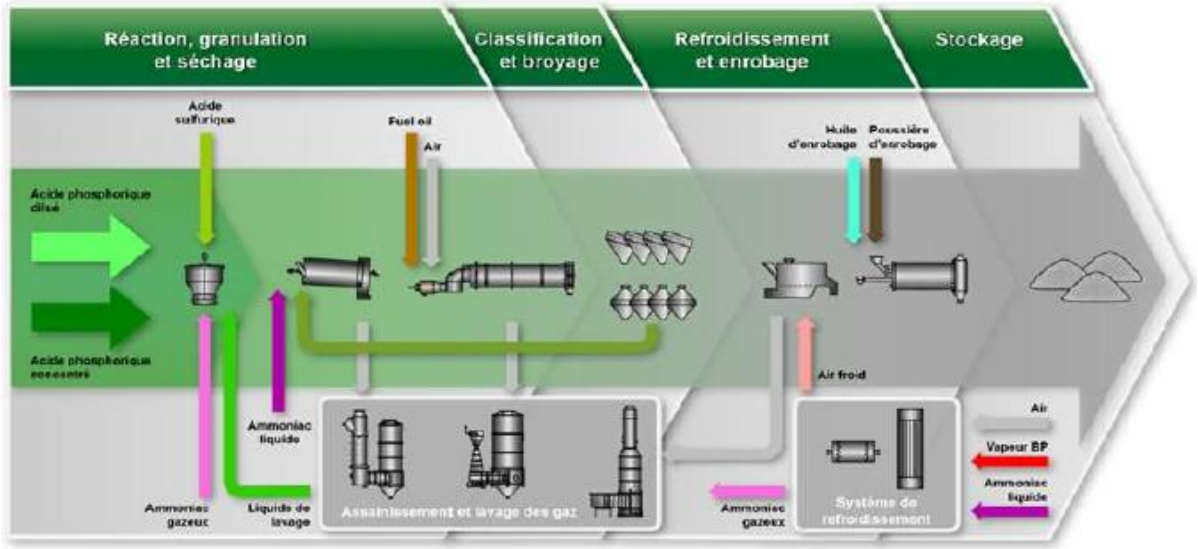

Figure 11 : processus de production des engrais (Rapport OCP)

3.1.2.4 Vue d'ensemble du site de Jorf

Les différents ateliers d'une même entité juridiques sont liés par des relations client fournisseur comme le montre la figure 12 :

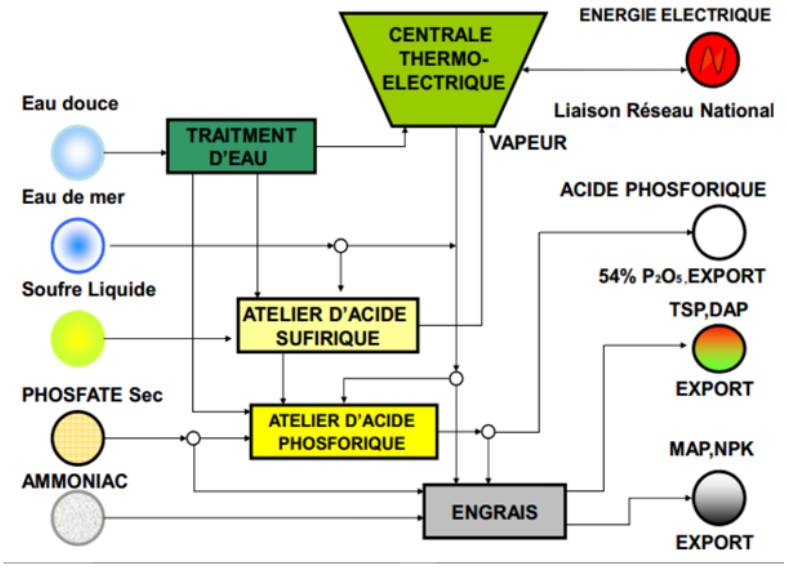

Figure 12 : liaisons entre les ateliers d'une entité juridique (Rapport OCP)

L'entité MP34 constitue l'entité pilote parce qu'elle est la plus grande et la plus ancienne entité à Jorf, elle représente une version complète des étapes de la chaîne de valeur de Jorf (atelier acide sulfurique, acides phosphoriques, les engrais, la centrale thermique), ses ateliers contiennent le plus grand nombre de lignes souvent hétérogènes ; c'est-à-dire qu'elles ont des performances non identiques et peuvent avoir des gammes différentes, la plateforme de stockage *Jorf Phosphate Hub* lui appartient ; elle y reçoit toutes les matières premières nécessaires avant de transférer une partie aux autres entités, elle a le plus grand nombre de connexions directes avec les autres entités et la plupart des responsables et des managers ont dû passer par cette entité avant d'être affectés aux autres entités. MP34 contient 7 lignes de production d'acide sulfurique, 6 lignes de production d'acide phosphorique 29%, 20 lignes de production d'acide phosphorique 54% et 7 lignes de production des engrais. Ces lignes d'engrais sont réparties en deux groupes : 4 lignes anciennes (appelées aussi les lignes 07) et 3 lignes nouvelles (appelées lignes 107) qui sont plus performantes que les anciennes lignes (figure 13).

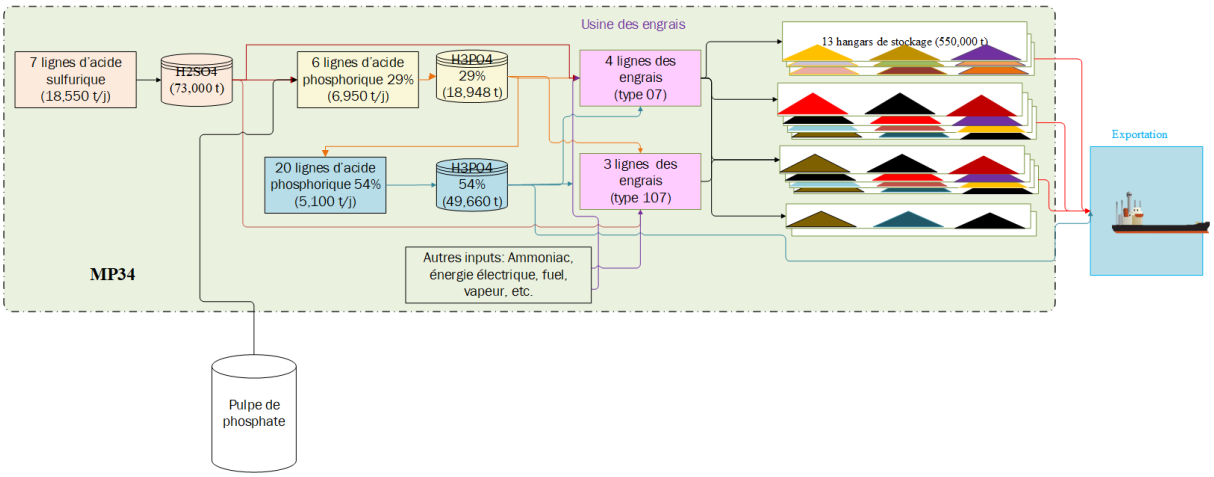

Figure 13 : entité MP34

Quant aux *Jorf Fertilizer Companies* et les joint-ventures, elles contiennent chacune une ligne de production d'acide sulfurique, une ligne de production d'acide phosphorique 29%, 3 lignes de production d'acide phosphorique 54%. Concernant les *Jorf Fertilizer Companies*, faisant également la production des engrais, ce n'est que l'entité JFF qui contient deux lignes de production des engrais, les autres en comportent une seule.

La figure 14 présente une vue d'ensemble des entités juridiques du site de Jorf.

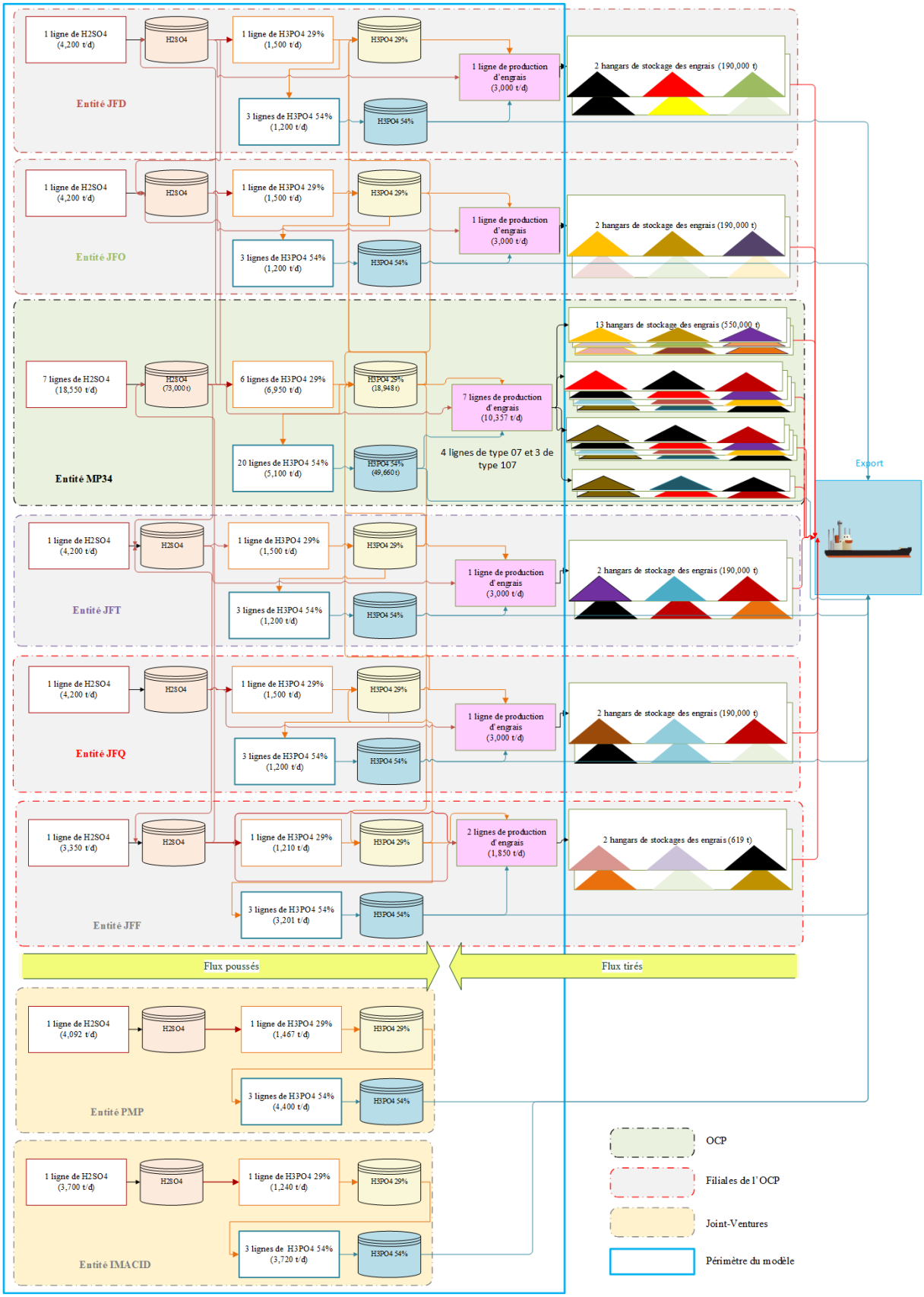

Figure 14 : Site de Jorf

3.2 *Modélisation physique*

Cette sous-section vise à décrire la mise en œuvre des trois premières étapes du protocole méthodologique RI pour le volet modélisation physique de la CL de Jorf. Nous commençons par présenter le contexte de notre projet de recherche et de l'accès au terrain. Par la suite nous décrirons son processus décisionnel et les difficultés rencontrées. Finalement, nous présentons brièvement notre intervention.

3.2.1 Contexte du projet de recherche et accès au terrain

L'enjeu de la sécurité alimentaire rend nécessaire l'augmentation de la productivité de l'industrie des fertilisants. Cet enjeu n'est pas limité à l'augmentation de la productivité mais également à la capacité de répondre à une demande caractérisée par la saisonnalité, la forte diversité de produits, les délais de livraison et par les exigences de la qualité.

Notre thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire OCP SA d'optimisation industrielle rattachée à EMINES *School of Industrial Management* - Université Mohamed VI Polytechnique. Dans ce cadre, l'OCP a lancé un programme de recherche au sein de son site chimique de Jorf dans une vision de transversalité et d'amélioration globale par l'aide à la décision au niveau opérationnel. La volonté de l'OCP de s'engager dans des mutations porteuses au niveau de la gestion de sa CL nous a conduite à adopter une position constructiviste.Le point de départ de ce travail est le fait que résoudre des problèmes pratiques pose des problèmes théoriques (Garel 1998). La demande initiale faite par l'OCP n'était pas assez précise par rapport aux problèmes rencontrés et surtout à leur origine. Elle a émané du niveau de satisfaction insuffisant, des managers, concernant la réalisation des objectifs en termes d'efficacité et d'efficience.

Notre client est l'entité *Business Steering* installée au siège. Elle a pour mission principale la planification tactique intégrée de toute la CL de l'OCP : depuis la mine jusqu'au port sur les trois axes (figure 8). La définition des objectifs globaux de production se fait au niveau tactique, la mise en œuvre de ces objectifs est la mission des opérationnels dans les différents sites de la CL de l'OCP. Les opérationnels ont des difficultés quant à la concrétisation de ces objectifs. Pour comprendre les causes d'insatisfaction en termes d'efficacité et d'efficience, nous avons décidé de faire un diagnostic des processus de décision pour relever les éventuelles incompatibilités entre le processus de planification du *Business Steering* et la

planification faite par les opérationnels. Ainsi, nous avons deux niveaux d'unités d'analyse. Au niveau tactique le *Business Steering* assure une planification agrégée de toute la CL de l'OCP, notre unité d'analyse à ce niveau est la CL de l'OCP. Au niveau opérationnel notre unité d'analyse est le site chimique de Jorf. Dans cette RI que nous menons, nous avons pour mission d'analyser pour améliorer le processus décisionnel de la CL de Jorf.

Signalons dès maintenant que pour faire la planification tactique, le *Business Steering* fait appel à un modèle d'optimisation. Concernant la planification à court terme, les opérationnels s'appuient sur des méthodes traditionnelles de type tableurs Excel.

Une compréhension approfondie du fonctionnement du système productif étudié est indispensable pour pouvoir proposer des solutions adéquates et pertinentes. Pour cela, nous avons passé des périodes assez longues sur le site chimique de Jorf. Le premier accès au terrain était dans le cadre d'une mission de recherche faisant partie du programme de l'année propédeutique (2016-2017) que nous avons suivi à l'EMINES. Nous avons commencé par une réunion avec le Vice-président du *Business Steering* et son équipe, le 18/05/2017 au siège de l'OCP en présence du directeur de l'EMINES. Dans cette réunion nous avons fait une proposition de modélisation, au niveau opérationnel, de la CL de Jorf et nous avons fait donc la demande d'accès au site. Ayant la confirmation et le support de l'entité *Business Steering* nous avons pu avoir une autre réunion à Jorf, le 17/06/2017, avec l'entité « Supply chain Jorf » pilotant toutes les entités et leurs interactions au niveau opérationnel, en présence du directeur de l'année propédeutique et d'un manager modélisation de la direction stratégie de l'OCP. Pendant cette réunion nous avons présenté le contexte et notre volonté de mener un travail de recherche pour l'amélioration de leur processus décisionnel. Notre immersion dans l'équipe à Jorf a commencé une semaine après cette réunion.

3.2.2 Exploration des processus de décision

Le *Business Steering* est le lien entre les commerciaux et les opérationnels. Il reçoit le programme prévisionnel des ventes auprès du département commercial. Son objectif est la satisfaction de la demande des clients et la maximisation de la marge sur coût variable de l'OCP. Il considère une vision macro de toute la CL de l'OCP (figure 8) et définit un programme d'activité global en fonction des commandes des clients à expédier sur trois horizons : l'annuel (pour le budget), le trimestriel et le mensuel. Ce programme contient les quantités de production par période (des produits finis et des produits intermédiaires), les niveaux des stocks par produit

par période, l'approvisionnement en matières premières et le programme des expéditions des produits finis. Pour élaborer cette planification tactique, le *Business Steering* utilise un modèle intégré d'optimisation.

Le *Business Steering* transmet les objectifs en termes de quantités et de délais aux différentes entités des différents sites (mines, laveries, unités industrielles chimiques, ports). Cette centralisation de l'élaboration des plans d'action et des programmes d'activités au niveau du *Business Steering* permet d'assurer la cohérence horizontale, au niveau tactique, entre les différentes entités de la CL. La cohérence verticale, entre le tactique et l'opérationnel, est plus complexe car le modèle utilisé par le *Business Steering* pour déterminer le programme global d'activité permet difficilement aux différentes entités de comprendre et d'appréhender la situation car, comme on le verra dans ce qui suit, la granularité de ce modèle ne permet pas de prendre en compte les préoccupations des opérationnels, et parce que la prise de décision au niveau opérationnel est souvent orientée performance locale ; la réalisation des objectifs tactiques dépend du niveau de coordination entre les entités au niveau opérationnel.

Le modèle du *Business Steering* détermine la quantité à produire de chaque produit fini (ex. produit engrais) dans chaque entité. Il en déduit la quantité à produire des produits intermédiaires (acide phosphorique 29 %, acide sulfurique), la quantité à extraire de chaque minerai, la quantité approvisionnée de chaque matière première, la quantité exportée par quai, et le niveau du stock de chaque produit à la fin de chaque période. Le premier tableau de la figure 15 est un exemple d'extrait du planning trimestriel du *Business Steering* destiné à Jorf. Il indique la quantité que doit produire chaque atelier (ex. acide sulfurique) de chaque entité (MP34, PMP, etc.) pendant chaque mois. Les opérationnels à Jorf descendent à la granularité « ligne de production » et préparent des plannings hebdomadaires (deuxième tableau de la figure 15). Chaque mois, les comités opérationnels essaient de prendre en compte les capacités réelles du système de production (cadence réelle des lignes de production) et les arrêts programmés des lignes de production afin de calculer le nombre effectif de jours de travail. Par la suite, ils divisent les objectifs en termes de volume sur le nombre de jours disponibles pour préparer les objectifs hebdomadaires. Considérons l'atelier d'acide phosphorique 29% de l'entité MP34, la somme des quantités programmées sur toutes les lignes de production sur les quatre semaines (178,298 t) est la projection de l'objectif du premier mois, défini par le plan tactique.

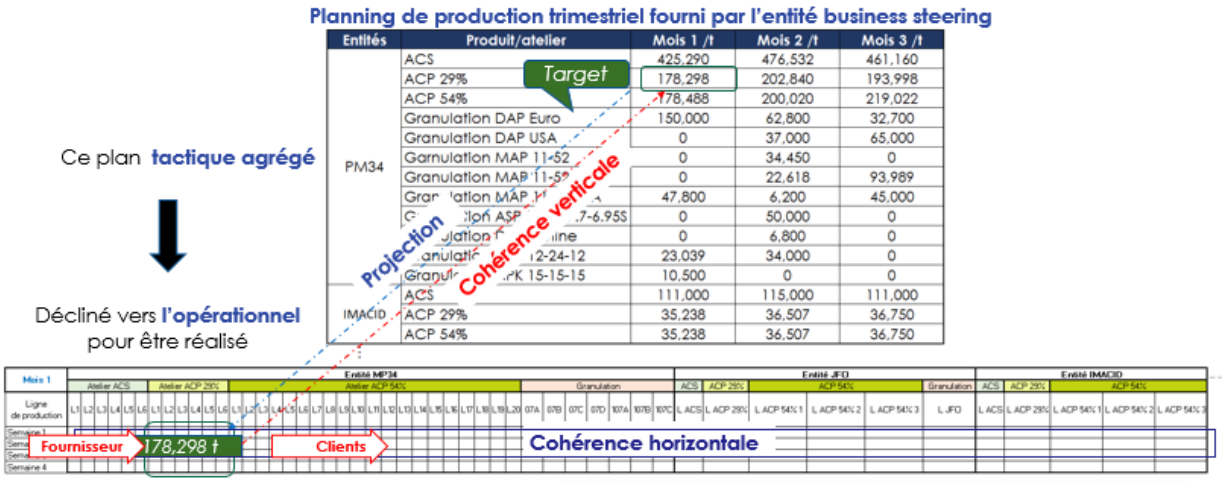

Figure 15 : Processus décisionnel de Jorf

Chaque entité juridique de Jorf dispose d'une certaine autonomie de gestion locale, mais une gestion opérationnelle consolidée de toute la plateforme de Jorf constitue la mission principale de l'entité « Supply chain Jorf » (SC-Jorf) à laquelle nous étions affectée. Pour la réalisation du plan tactique, l'entité SC-Jorf organise une réunion appelée Tour de Contrôle. Le manager de l'équipe SC-Jorf nous a intégrée dans son équipe. Nous étions en contact permanent avec son subordonné (responsable ingénieur), et principalement installée dans son bureau. Chaque semaine nous assistions la réunion de la Tour de Contrôle. Il s'agit d'une réunion hebdomadaire qu'anime l'entité SC-Jorf en présence des responsables des différents ateliers des différentes entités juridiques pour la définition des plannings de production de la semaine ou des deux semaines qui viennent. Ce planning porte sur l'ordonnancement des lignes de production des engrais (pour chaque ligne d'engrais, déterminer les qualités d'engrais à produire et le séquencement retenu pour les ordres de fabrication), le programme d'ouverture et de la fermeture des lignes de production, leurs régimes de marche (on peut décider ou être contraint, sur une ligne, d'aller par exemple à 75% de son débit maximal et de changer après soit de baisser encore ou d'augmenter le régime de marche), le programme de la maintenance préventive sur les différentes lignes de production (le jour et la tranche horaire) et le programme des échanges d'acides entre les différentes entités juridiques. La figure 16 résume le processus de décision de la Tour de Contrôle. Elle présente les caractéristiques (ex. périmètre, horizon), les objectifs et les décisions output de la réunion.

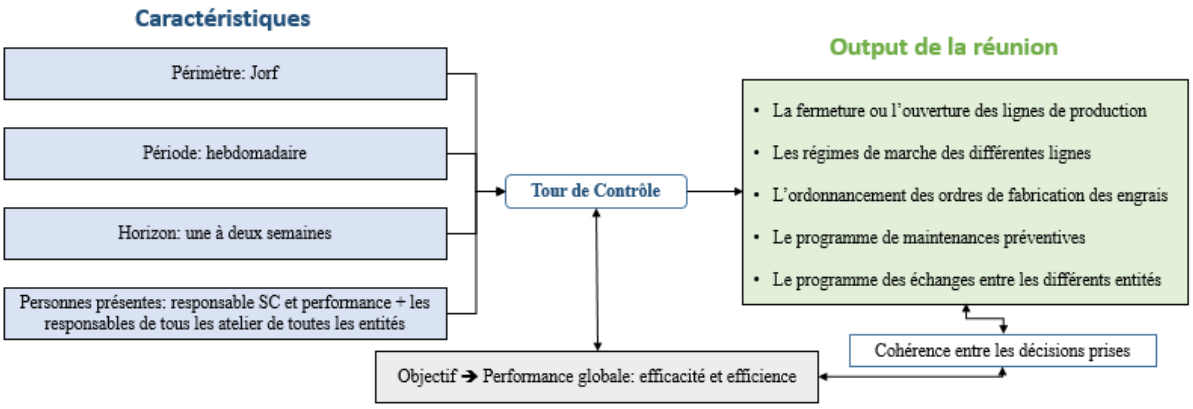

Figure 16 : Processus de la Tour de Contrôle

Les responsables de chaque atelier de chaque entité juridique viennent à la réunion de la Tour de Contrôle avec une proposition de décisions pour la semaine ou les deux semaines à venir. La réunion vise à définir un planning permettant d'atteindre les objectifs déterminés au niveau tactique. Le responsable SC-Jorf affiche, sur un écran partagé, un fichier Excel contenant le planning consolidé. Il commence par présenter le réalisé par rapport à l'objectif. Par la suite, présenter la dernière mise à jour de la situation de chargement des bateaux au niveau du port (situation dépendant de l'arrivée des bateaux aux quais). Il en tire une définition des objectifs des sept jours qui viennent. Le responsable Jorf-SC transmet des objectifs à chaque atelier. Le responsable de ce dernier défend la performance de son atelier et négocie les objectifs qui lui sont affectés en fonction des capacités de son atelier dépendant quant à elles de la flexibilité des ateliers qui lui sont connectés en amont ou en aval. En effet, la capacité d'un atelier dépend de ce qu'il reçoit en amont en termes des intrants et en aval en termes de la capacité des stocks. Les ateliers d'une entité sont liés par des relations client fournisseur : la réalisation de l'objectif en termes d'acide phosphorique 29% par exemple est conditionnée par la production d'acide sulfurique réalisée en amont, de l'arrivée de la pulpe du phosphate en amont et de la consommation de cet acide en aval que ce soit par les lignes de concentration ou par les lignes d'engrais. L'entité SC-Jorf en veillant sur la performance globale définit, en négociant avec les différents responsables, un programme de transferts des acides entre les différentes entités. Ces échanges sont liés soit à des besoins non couverts localement ou à des excès d'acide que l'on n'arrive pas à stocker.

Soulignons que la compréhension du processus décisionnel, au niveau opérationnel, est fondée principalement sur l'observation directe du déroulement de la réunion et les propositions

et les interactions des différents intervenants. Nous profitions du temps de rassemblement des intervenants au début de la réunion et la fin de la réunion pour poser des questions. Ces dernières étaient semi-structurées et pouvaient porter sur des points non clairs discutés dans la réunion ou d'autres points aussi non clairs apparaissant depuis la dernière réunion et pour lesquels nous n'avons pas pu avoir une réponse. Ces questions étaient de type « pourquoi il n'est pas possible de faire cela ?», « est-ce que cette décision peut être remplacée par celle-là ? ».

Les préoccupations majeures des opérationnels ne figurent pas dans le modèle tactique du Business Steering. Nous avons passé deux demi-journées avec les membres de l'équipe *Business Steering* au siège. L'objectif était de comprendre la structure du modèle et notamment les règles de gestion et les informations utilisées comme entrée du modèle. Concernant la structure du modèle, nous avons pu analyser un document confidentiel décrivant en détail le modèle et toutes ses caractéristiques. Si nécessaire, nous demandions téléphoniquement des compléments d'information aux membres de l'équipe *Business Steering*.

Le modèle d'optimisation part d'un carnet de commandes où chaque commande correspond à un contrat et un pays, porte sur un produit déterminé avec un prix déterminé et doit être satisfaite pendant une période prédéterminée. Le produit d'une commande peut porter sur une qualité de la roche, l'acide phosphorique ou un produit engrais. Chaque commande est assignée à une entité juridique prédéfinie (OCP ou joint-venture). Pour exécuter le modèle, le *Business Steering* reçoit la dernière mise à jour des prix des matières premières auprès des commerciaux, une estimation des capacités de production auprès des opérationnels et les coûts auprès de la comptabilité de gestion. La planification est révisée en fonction des modifications éventuelles du programme prévisionnel des ventes (commandes fermes ou annulées). Ci-dessous nous présentons sommairement les caractéristiques du modèle.

- *Granularité temporelle*. La dynamique du modèle est sommaire via une modélisation mensuelle sur un horizon trimestriel ou une modélisation trimestrielle sur un horizon annuel. Le modèle tient compte des équations de conservation des stocks d'une période à l'autre. Toutefois, il ne tient pas compte des délais de production et de transformation, qui supposent qu'à chaque étape de la production, les intrants sont considérés comme immédiatement disponibles. Cette simplification semble acceptable dans la planification à long terme. En revanche au niveau opérationnel, la notion du temps est primordiale car qui dit ordonnancement dit date de fin et date de début de chaque ordre de fabrication, l'ordonnancement nécessite également la prise en compte des temps et des coûts de

lancements, le planning de la maintenance est défini par jour par tranche horaire, la gestion des saturations et des ruptures des stocks se fait également par tranche horaire de la journée. Pour la partie port, aucune contrainte spatio-temporelle d'occupation des quais n'est prise en compte. Pour une période donnée, on connaît un ensemble de demandes à exporter par port, sans aucune information sur les dates de chargement. Or, cette information est indispensable pour une bonne gestion portuaire : étude de faisabilité et des coûts. La gestion des chargements nécessite la prise en compte des coûts liés aux surestaries (indemnités qui doivent être payées quand le temps de chargement ou de déchargement dépasse le temps prévu mentionné dans le contrat de voyage), au *despatch money* (primes récupérées quand les opérations de chargement ou de déchargement sont terminées avant les délais mentionnés dans le contrat de voyage) et aux coûts directs de manutention. Ces éléments dépendent des dates d'arrivées des navires et de leur affectation sur les quais.

- *Granularité spatiale*. Le périmètre considéré par le modèle comporte les trois axes de la CL de l'OCP. Dans chaque axe (sud, centre, nord), le modèle prend en compte toutes les activités de la chaîne de valeur de la mine jusqu'au port. Il descend à la granularité de l'atelier de production (sans aucun détail sur le niveau ligne de production) de chaque entité. Les opérationnels gèrent des lignes de production. Par exemple, on ne peut pas faire de l'ordonnancement sans parler de la ligne de production, de même pour la maintenance préventive.
- *Contraintes.* Le modèle considère principalement les contraintes de capacité. Cependant, il n'y a pas d'explication sur la manière dont ces capacités sont déterminées. En ce qui concerne les sites miniers, par exemple, la définition des capacités n'est pas évidente, elle dépend des caractéristiques géologiques réelles du gisement, du circuit des machines d'extraction et des caractéristiques physiques et chimiques des couches extraites. Par ailleurs, la CL du phosphate est intégrée verticalement et se caractérise par une forte interdépendance entre ses maillons (de la mine jusqu'au chargement des bateaux). Au niveau de Jorf, la production de l'acide phosphorique est alimentée par la production de l'acide sulfurique et les arrivées des lots de pulpe de phosphate depuis la mine (connectés par des stocks), ensuite, la production des engrais est alimentée en plus des acides sulfurique et phosphorique, par d'autres matières premières importées. Par ailleurs, l'OCP continue à créer des unités de production avec des partenaires (Joint-ventures), ce qui augmente

l'hétérogénéité du système productif et en complexifie la gestion. La capacité d'un nœud du réseau dépend du niveau de flexibilité offert aux maillons qui lui sont liés.

- *Fonction-objectif*. Elle est fondée sur un critère économique, celui de la maximisation de la marge sur le coût variable de l'OCP. Les informations de coûts utilisées sont tirées du système de comptabilité de gestion de l'OCP.

D'après l'analyse présentée ci-dessous, il est clair que la granularité du modèle d'optimisation tactique est trop grossière pour la prise des décisions opérationnelles au niveau des lignes de production. Les deux comités (tactique et opérationnel) adoptent des représentations physiques différentes concernant le système productif et la problématique décisionnelle étudiée, même si les objectifs sont communs. Ceci crée des incohérences et des désalignements entre les décisions prises à ces deux niveaux décisionnels. La cohérence de l'opérationnel avec le tactique dépend également du niveau de cohérence horizontale. La CL intégrée est l'un des leviers de la stratégie de l'OCP. Il est conscient de l'importance de l'adoption du SCM insistant sur l'élimination des barrières et la coopération entre les différents maillons de la CL. Il a créé l'entité SC-Jorf pour assurer une gestion consolidée de toute la plateforme (gérant l'ensemble des lignes des ateliers et les stocks les connectant). C'est pour atteindre la cohérence horizontale au niveau opérationnel dans la CL de Jorf que l'entité SC-Jorf organise la réunion Tour de Contrôle. Les décisions prises doivent tout d'abord être réalisables au niveau local de chaque entité et permettre de respecter la performance globale à savoir l'atteinte des objectifs (définis par le plan tactique) tout en réduisant les coûts engagés. Pour ce faire, il faut que les décisions prises (partie droite de la figure 16) soient cohérentes entre elles. Il faut noter que dans le cas des incidents imprévus, le responsable de l'atelier concerné recontacte, le cas échéant, l'équipe SC-Jorf pour qu'elle l'aide à trouver un compromis avec les autres ateliers ou entités. Dans ce cas, nous assistions la révision des décisions en présence des membres de l'équipe SC-Jorf et les entités impactées. L'objectif de la révision est d'apporter des décisions correctives pour stabiliser de fonctionnement du système productif.

Ajoutons finalement que la vérification de la cohérence entre les décisions opérationnelles prises pendant la réunion de la Tour de Contrôle se fait moyennant des tableurs Excel. Ces approches *traditionnelles* ne permettent pas suffisamment de précision pour détecter des incohérences entre les décisions dont certaines ne sont pas compatibles avec des contraintes locales de production, ce qui génère des perturbations en amont et en aval. Les incohérences

décisionnelles engendrées perturbent le fonctionnement du système productif de Jorf, principalement par des arrêts de production non programmés. Ces derniers sont généralement dus à des ruptures de stocks en amont ou des saturations de stocks en aval.

3.2.3 Première intervention

Dans notre exploration du système physique de la chaîne logistique de Jorf et de son processus décisionnel nous avions pour objectif de le diagnostiquer pour en explorer les pistes d'amélioration. Dans le contexte de la Tour de Contrôle et son alignement avec les décisions tactiques nous avons construit des instrumentations d'aide à la décision au niveau opérationnel.

Pour le développement de ces instrumentations, il a été indispensable de comprendre, comme nous l'avons présenté dans les parties (3.1.2) et (3.2.2), les processus physique et décisionnel à Jorf. En plus de l'observation directe (Tour de Contrôle), nous avons effectué des entretiens auprès des responsables des différents ateliers. Notre premier séjour de plus de 3 mois (du 26/06/2017 au 30/09/2017) a été consacré tout d'abord à la compréhension des processus physiques et par la suite du processus décisionnel et des flux informationnels. Le manager de l'équipe « SC-Jorf » nous a aidée à faire un programme de visites auprès des différents ateliers constituant la chaîne de valeur de Jorf (principalement : l'acide sulfurique, les acides phosphoriques 29% et 54%, la centrale thermique, l'atelier des engrais). Vu la très grande taille du complexe, nous avons choisi comme première unité d'analyse l'entité MP34. Le tableau 2 présente le guide d'entretien que nous avons adopté dans cette première exploration. L'objectif est de comprendre le système pour faire une modélisation fidèle à son fonctionnement au niveau opérationnel permettant de prendre en compte les différents leviers d'actions des opérationnels.

Pour chaque visite, le manager nous met en contact avec le responsable de l'atelier : nous nous présentons et nous lui présentons le contexte de notre visite. Il nous fait la présentation de son activité, dans son bureau, et éventuellement nous donne des documents et des manuels de procédures. Par la suite, ce responsable nous met en contact avec un contremaître d'une ligne de production pour voir les étapes sur le terrain. Vu la taille des installations et le niveau de détail des discussions menées avec nos interlocuteurs, la visite d'une ligne de production peut prendre plus d'une journée. Ce programme de visites, de la première découverte et de prise de contact, a duré deux semaines. Ensuite, nous avons commencé la formalisation des informations et des connaissances accumulées en faisant principalement des

cartographies de processus que nous avons complétées et validées par des nouvelles visites durant ce séjour.

Tableau 2 : guide d'entretien pour la modélisation physique

Objectif des entretiens	Comprendre le fonctionnement du système productif de Jorf pour le reporduire dans des modèles de la prise de décision au niveau opérationnel
Thème	**Questions**
Système physique	- Phrase d'entame: Pourriez-vous nous expliquer les différentes étapes du processus de production dans votre ligne de production ? - Est-ce qu'elles sont indépendantes ? C'est-à-dire est ce qu'une étape peut produire pendant que les autres étapes seraient arrêtées ? - Combien y a-t-il de lignes de production ? - Est-ce que les lignes de production sont identiques ? - En quoi sont-elles différentes ? - Quelles sont les performances de chaque ligne de production ? - Combien y a-t-il de bacs de stockage ? - Sont-ils capacitaires ? - Est-ce que les bacs sont connectés ? - Peut-on les considérer comme un seul bac ?
Processus décisionnel	- Qui définit les objectifs ? - Comment vous définissez les cadences de production ? - Comment vous établissez l'ordonnancement des lignes de production ? - Comment vous définissez le programme d'échanges avec les autres entités ? - Est-ce que les objectifs sont généralement atteints ? - Quel type d'incidents vous rencontrez ? - En cas d'incidents non prévus, quel type de décisions correctives vous adoptez ? - A quel niveau sont-elles prises ?

Dans la suite de cette partie nous annoncerons brièvement deux livrables sur lesquels nous avons travaillé. Le premier est un simulateur de la production s'intéressant à l'étude de la cohérence des décisions opérationnelles de la Tour de Contrôle. La deuxième instrumentation, dans laquelle nous avons collaboré de manière active, est un outil d'aide à la décision d'ordonnancement des lignes de production des engrais.

3.2.3.1 Simulateur de la production

Pour améliorer le processus décisionnel de la gestion opérationnelle nous avons opté pour le développement d'un simulateur de la production. Le simulateur part de l'état du système et

anticipe le fonctionnement du système productif en réponse à un ensemble de décisions prises sur les différents points de la CL de Jorf. Il a pour objectif *i)* d'étudier la cohérence des décisions opérationnelles (partie droite de la figure 16). Dans le cas des incohérences, le modèle aide, en faisant appel à aux experts du terrain, pour valider le diagnostic et rechercher des scénarios alternatifs permettant de stabiliser le fonctionnement du système productif, et *ii)* de contribuer à l'alignement entre les niveaux opérationnel et tactique en fournissant à ce dernier une estimation pertinente de la capacité mensuelle de production.

La CL de Jorf étant de nature hybride en combinant des processus de production continus (acide sulfurique, acide phosphorique) et des processus de production discrets (production par lot des engrais). Sa modélisation pour la prise de décision au niveau opérationnel, n'est possible ni avec les techniques de simulation disponibles dans la littérature ni avec les primitives fournies par les logiciels commerciaux. Soulignons qu'une primitive peut être définie comme un composant générique paramétrable, constitué de composants élémentaires combinés pour décrire un processus complexe que des composants élémentaires ne peuvent décrire à eux seuls ; ce composant générique enrichit la bibliothèque des composants du simulateur, utilisables dans la modélisation.

Pour créer le simulateur de Jorf, nous avons été amenés à créer des primitives permettant la modélisation des systèmes hybrides par la simulation à évènements discrets pour l'étude des décisions opérationnelles (Bara *et al*., 2020a, 2020b). Ces primitives ont été développées d'une manière générique de telle façon à ce que leur utilisation par des personnes différentes, pour modéliser un même système physique, puisse mener à presque la même modélisation. Ajoutons que, la modélisation retenue, utilisant les primitives de base et les nouvelles primitives, repose sur une séparation claire entre un modèle et les données (comme c'est le cas pour les modeleurs et les bases de données relationnelles). Ces dernières, introduites par lecture d'un fichier Excel, créent une instance du modèle d'une configuration à simuler.

Par ailleurs, les décisions étudiées par la Tour de Contrôle ne nécessitent pas une description très détaillée des étapes de chaque processus de production. Par exemple, les décisions relatives aux ateliers d'acide sulfurique ne s'intéressent pas aux opérations élémentaires à savoir combustion, conversion, absorption, etc. Ce niveau de détail est plutôt nécessaire pour des décisions de type temps réel s'intéressant aux processus internes des réactions chimiques. Par contre, concernant les décisions opérationnelles (Tour de Contrôle), il est nécessaire de bien comprendre et considérer les règles de gestion et les leviers d'action dont

disposent les décideurs ainsi que les différentes interdépendances qu'il y ait entre les ateliers et entre les entités. Dans un premier temps il est alors nécessaire de définir le niveau de granularité permettant une reproduction fidèle du fonctionnement du système productif pour la prise de décision à court terme. Les informations nécessaires pour la modélisation des décisions opérationnelles ne sont pas directement disponibles sur le terrain.

Dans la section 2 du chapitre 3 nous commencerons par présenter un ensemble de règles d'agrégation sur lesquelles nous nous sommes basés pour passer des données détaillées recueillies sur le terrain vers un niveau de granularité des informations, pertinente pour la modélisation des décisions opérationnelles. Ensuite nous présenterons une revue de littérature dans laquelle nous justifierons notre recours à la simulation à évènements discrets et la nécessité de l'approche fondée sur les primitives. Par la suite, nous présenterons les primitives génériques que nous avons développées. Finalement, nous décrivons le simulateur que nous avons développé moyennant ces primitives et son apport par rapport à l'aide à la décision au niveau opérationnel et son alignement avec le plan tactique dans la chaîne logistique de Jorf.

3.2.3.2 Système interactif d'ordonnancement

Le site de Jorf comporte 13 lignes parallèles et hétérogènes de production des engrais, réparties entre les différentes entités de Jorf (OCP et joint-ventures). Cet outil, résultant d'un travail collectif (Azzamouri *et al.*, 2019), s'appuie sur un modèle d'optimisation tenant en compte les contraintes commerciales à savoir les fenêtres de temps (date de livraison au plus tôt et au plus tard), et les contraintes techniques à savoir le planning de la maintenance préventive, la disponibilité des lignes de production, les gammes et les nomenclatures. Le modèle est caractérisé par un pas horaire sur un horizon qui peut aller jusqu'à 3 mois. Ce niveau de granularité offert par le modèle, pour le pilotage opérationnel, fait que l'intégration des contraintes amont (disponibilité des inputs : acides et matières premières) et aval (disponibilité de l'espace de stockage) rend le modèle très difficile à résoudre par l'optimisation. Pour cela, l'approche retenue est orientée système interactif : le modèle d'optimisation (sans les contraintes amont et aval) donne la solution optimale, après, le système interactif, en envisageant l'impact de la solution optimale sur des courbes cumulées d'acides en amont et de l'espace de stockage en aval, vérifie la faisabilité de la solution vis-à-vis ces contraintes de proximité.

Le problème à résoudre considère la disponibilité des lignes (avec prise en compte du programme de la maintenance préventive et des arrêts programmés), les références à produire (quantités désirées, les fenêtres de dates de fin de la production, liées aux expéditions et aux disponibilités de stockage en ava). Il utilise également un ensemble de données stables valables pour tous les problèmes de fabrication d'engrais, principalement les gammes de production et nomenclatures d'engrais (qui ne sont pas identiques d'un type de ligne à un autre, sans compter que certains engrais ne peuvent pas être produits sur certaines lignes).

La section 4 du chapitre 3 sera consacrée à une présentation détaillée de de cette approche. Nous commencerons par une revue de littérature montrant l'originalité de ce travail, ensuite nous expliciterons la modélisation mathématique et finalement nous présenterons les résultats de ce système interactif et son positionnement par rapport à l'aide à la décision au niveau de la plateforme de Jorf et par rapport à l'alignement avec les décisions tactiques.

3.2.3.3 Conclusion

Les modèles décisionnels que nous avons développés pour le site de Jorf permettent une reproduction fidèle du fonctionnement du système productif au niveau opérationnel. Les modèles considèrent l'état du système productif (gammes et nomenclatures), les objectifs en termes de produits et des quantités des demandes client et les différentes contraintes relatives soit aux capacités de production soit aux dates livraison. L'utilisation de ces modèles va donc permettre d'atteindre l'efficacité par la recherche des scénarios de décision *possibles* et satisfaisant les objectifs prédéfinis. L'efficience se référant à la réduction des coûts est aussi un levier pilier fixé par la stratégie de l'OCP. Les modèles décisionnels que nous proposons ont donc besoin d'être fondés sur des critères économiques leur permettant de générer des scénarios à la fois efficaces et efficients. Pour ce faire, une réflexion sur le volet de la valorisation économique dans les modèles de décision à court terme est indispensable. La revue de quelques articles proposant les modèles de décision a révélé que les auteurs se concentrent souvent sur les techniques de modélisation et les méthodes de résolution et négligent la pertinence des systèmes de coûts par lesquels ils alimentent leurs modèles de décision. Ce premier constat nous a incités à pousser notre diagnostic et mener une revue de littérature critique sur 110 articles traitant des modèles de décision dans le domaine de la CL. L'objectif est de voir à quel point les auteurs vérifient la cohérence entre la modélisation physique qu'ils proposent et le système de coûts qu'ils utilisent. La section 2 du chapitre 4 du présent manuscrit porte sur cette

revue de littérature critique : nous y présentons un cadre théorique couvrant un ensemble de concepts et d'approches que nous mobiliserons dans l'analyse et la discussion des articles, la méthodologie suivie pour élaborer cette revue de littérature critique, les résultats de la revue et finalement la discussion de ces résultats qui met en exergue un ensemble de problèmes méthodologiques rencontrés.

Nous avons mentionné dans en section 3 que la démarche de la méthodologie recherche-intervention nécessite des allers-retours entre les théories existantes et l'intervention au niveau de son terrain d'étude. Pour revenir au cas de la valorisation économique à introduire dans les modèles décisionnels que nous proposons, un diagnostic du système de la comptabilité de gestion adopté par Jorf est indispensable. Il s'agit de détailler ce qu'offre ce système de comptabilité en termes des informations pertinentes pour la valorisation économique des décisions à court et moyen termes. Dans ce qui suit nous allons raconter le contexte de notre deuxième immersion sur le terrain.

3.3 *Valorisation économique*

3.3.1 Deuxième accès au terrain

Le vice-président de l'entité *Business Steering* nous a accordé une réunion avec lui et le vice-président de la direction contrôle de gestion et finances de l'OCP en présence du directeur de thèse. La réunion a commencé par l'intervention du vice-président du contrôle de gestion qui nous a parlé de la structure de leur système de contrôle de gestion et surtout d'un projet qu'ils ont commencé et qui vise à harmoniser les procédures de contrôle de gestion pour tous les sites et dont le premier livrable est un référentiel global de la comptabilité de gestion. Nous avons présenté l'objectif de l'approche que nous envisagions de développer et d'implémenter consistant en la valorisation économique a priori des décisions à court terme. Pendant cette réunion de 3 heures, nous nous sommes mis d'accord sur deux missions : *i)* l'identification de l'ensemble des décisions prises dans le quotidien des opérationnels afin de pouvoir modéliser le comportement de gestion et de consommation des ressources ; il s'agit de recenser les différentes activités, les éléments générant ces activités et les ressources consommées par chaque activité ; *ii)* en parallèle, on s'est mis d'accord sur la nécessité de faire un diagnostic de leur système de comptabilité de gestion pour déterminer sa pertinence dans l'éclairage économique de la prise de décision à court terme. Suite à cette réunion, le vice-président nous

a mis en contact avec le directeur du contrôle de gestion à Jorf pour une deuxième immersion.

3.3.2 Exploration du système de comptabilité de gestion de Jorf

Cette sous-section vise à présenter le processus d'exploration du système de comptabilité de gestion de l'OCP. Nous y présentons la démarche adoptée.

3.3.2.1 Démarche d'exploration

Notre deuxième immersion sur le site de Jorf a duré 5 mois (juillet, août, octobre, novembre et décembre 2018), nous y avons alterné nos séjours entre le contrôle de gestion et les opérationnels. Nous nous sommes présentés au directeur du contrôle de gestion à Jorf. Pour faciliter notre immersion, lors du premier contact nous avons présenté le contexte de notre mission et avons précisé que notre objectif n'est surtout pas de mettre en question ou d'éliminer le système actuel mais plutôt de le comprendre et *éventuellement* le compléter par une approche de valorisation économique orientée modèles de décision à court et moyen termes. Pour la partie des opérationnels nous avons fait appel aux contacts que nous avons eus pendant la première mission à Jorf. Cette deuxième exploration du système physique est due au fait que cette valorisation économique nécessite un détail des informations plus fin que celui considéré dans le modèle physique. Ce point est expliqué davantage dans le chapitre 4 lors de la présentation du calcul des coûts de lancement de la ligne de production d'engrais. Notre unité d'analyse du départ était l'atelier des engrais. Ce choix est justifié par le fait qu'il fabrique la plus grande partie des produits finis et qu'il est caractérisé par la forte diversité des produits. D'ailleurs les coûts de lancements induits par la diversité étaient l'un points principaux discutés lors de la réunion avec le vice-président du contrôle de gestion et le vice-président du *Business Steering*. Sur une période donnée, il s'agit de déterminer les coûts induits par un ordonnancement donné.

- Le directeur du contrôle de gestion nous a mis à notre disposition le fichier PDF constituant le référentiel de toute la comptabilité de gestion de l'OCP (de la mine à la chimie). Une analyse préliminaire de ce document nous a aidés à mieux suivre une présentation qui nous a été faite par le manager « contrôle de gestion et facturation ». Il faut noter que la méthode de calcul des coûts est similaire pour toutes les entités de Jorf. Par conséquent, notre unité d'analyse pour l'exploration du système de comptabilité de Jorf est limitée à l'entité pilote, à savoir l'entité MP34. Après cette présentation, le

manager nous a fourni le fichier Excel contenant toutes les étapes de calcul des coûts à l'entité MP34. Nous avons continué l'analyse des documents et recontacté le manager, pour plus d'explication ou pour validation des informations retenues et des schémas réalisés. Cette opération a nécessité une dizaine de rencontres. Le tableau 3 présente le guide d'entretien que nous avons préparé. Soulignons que les réponses aux questions sont obtenues soit à partir de notre analyse des documents récupérés soit durant les rencontres que nous avons faites avec les contrôleurs de gestion.

Tableau 3:guide d'entretien pour l'exploration du système de comptabilité de gestion

Objectif des entretiens	Exploration du système de comptabilité de gestion
Thème	**Questions**
Modélisation des coûts	- Quels sont les objets de coûts considérés ? - Quels sont les coûts traçables dans le système de comptabilité ? - Quelle est la méthode de calcul des coûts ? - Quelles sont les étapes de calcul des coûts ? - Quelles sont les clés de répartition utilisées ? - Quels inducteurs d'activités sont considérés dans la modélisation des coûts? - Qui utilise les coûts calculés ?

- Pour la partie physique, nous étions en contact principalement avec le secrétariat technique et les contremaitres des lignes de production. Pour la fiabilité des informations collectées, nous avons contacté plusieurs contremaitres (une dizaine). Nous nous sommes basés sur des entretiens semi-structurés de 30 à 60 minutes, avec un ensemble de questions que nous préparions à l'avance. Le tableau 4 présente le guide d'entretien qui nous avons préparé pour cette deuxième exploration :

Tableau 4 : guide d'entretien pour la détermination du coût du changement de formule d'engrais

Objectif des entretiens	Comprendre le processus de changement de formule pour modéliser le comportement de consommation des ressources
Thème	**Questions**
Processus de changement de formule d'engrais	- **Phrase d'entame:** Pourriez-vous nous expliquez le processus de changement de formule d'engrais ? - Quelles sont les étapes que vous suivez pour réaliser un changement de formule ? - Est-ce que vous utilisez le coût de changement de formule ? - Est-ce que vous l'avez déjà calculé ? - Est-ce que vous tracez les consommations de matières induites par les changements de formule ? - Quelles sont les différences entre les séquences ? - Quelles sont les ressources consommées ? - Quelle est la quantité consommée de chaque ressource dans chaque séquence ? - Quelle est la durée de chaque changement de formule ? - Qu'est-ce que vous chercheriez à optimiser dans un changement de formule ?

Notre guide d'entretien est éventuellement mis à jour d'un entretien à un autre. En effet, des nouvelles questions apparaissaient en fonction du déroulement de l'entretien et des réponses des entretiens précédents. Ces questions sont de type : « quand vous faites la vidange de la boucle, où est ce que vous mettez le produit vidé ? » ; « est-il toujours récupérable ? » ; « dans le cas où une autre ligne est encours de fabrication du même produit, pourriez-vous demander à son responsable de vous faire, s'il est possible, la quantité dont vous avez besoin ? » ; « pourquoi ne pas faire cela ? » ; « comment vous arbitreriez entre non-conformité au démarrage et la durée de changement de formule ? » ; « où est ce qu'on met le produit non conforme ? » ; « est-ce qu'on le recycle ? ». À la fin de chaque entretien nous reformulions et faisions un résumé des points discutés (notés sur notre agenda). En plus de ces entretiens, nous nous sommes basés également sur l'analyse des historiques et des manuels de travail récupérés auprès du secrétariat technique.

3.3.2.2 Description du système de comptabilité de gestion de Jorf

Suite à cette exploration, nous avons fait une description détaillée du système de comptabilité

de Jorf. Elle est présentée dans la partie 3.3.1 du chapitre 4.

3.3.3 Deuxième intervention

Le système de comptabilité de gestion de l'OCP calcule des coûts historiques à partir des informations agrégées (voir la description présentée dans le chapitre 4). La valorisation économique a priori des décisions opérationnelles nécessite un niveau de détail qui n'est pas capturé par le système de comptabilité utilisé. Par ailleurs, les concepts de coûts qui y sont mobilisés sont différents de ceux utilisés par le système de comptabilité de gestion traditionnel adopté par l'OCP. Nous avons développé une approche de valorisation économique des décisions à court terme. Dans la section 3 du chapitre 4, nous expliciterons les principes de cette approche et nous présenterons un cas détaillé pour la valorisation économique des décisions d'ordonnancement des lignes des engrais au site de Jorf. Dans cette étude de cas nous montrerons pourquoi l'usage des coûts fournis par le système de comptabilité traditionnel de l'OCP mène à des résultats biaisés et nous présenterons la pertinence des principes dans le cas de l'approche du système interactif d'aide à la décision que nous avons annoncé précédemment. Nous signalons, dès maintenant, que les principes de l'approche de valorisation économique que nous avons développée restent valables pour la valorisation économique des autres décisions à court terme.

Jusqu'à présent nous avons présenté les trois premières étapes de la démarche RI (figure 6) pour les deux volets de la modélisation physique et la valorisation économique. Dans la sous-section suivante nous allons reporter les deux dernières étapes de ce protocole méthodologique à savoir la validation et l'expérimentation des axes d'intervention proposés.

3.4 *Validation et expérimentation*

3.4.1 Validation des axes d'intervention

Le processus de validation des axes d'intervention, que nous avons proposés, a porté à la fois sur le volet industriel et le volet académique. Dans cette sous-section, nous allons tout d'abord reporter le processus de validation auprès du commanditaire de la recherche à l'OCP (3.4.1.1) par la suite nous allons lister un ensemble de travaux de recherche qui ont été examinés par la communauté scientifique (3.4.1.2).

3.4.1.1 Validation auprès du commanditaire de la recherche

Le processus de validation industriel consiste à présenter d'une manière périodique l'état d'avancement des projets pour valider ce qui est fait et déterminer les points manquants à intégrer. Signalons que nous avons choisi de présenter, en une seule section, le processus de validation pour les deux parties de modélisation, physique et économique parce que, dans plusieurs des réunions, nous avons présenté et discuté à la fois les deux modélisations. Plusieurs de ces réunions d'avancement et de validation ont été effectuées avec l'OCP en présence du directeur de thèse et de Professeur Giard. À la fin de chaque réunion nous rédigions un compte rendu (validé par le directeur de thèse) contenant les points discutés et les prochaines missions et nous le partagions avec l'OCP et la direction de l'EMINES. Ci-dessous nous présentons les principales réunions d'avancement que nous avons effectuées :

03/04/2018 : réunion de plus de 4 heures, avec le vice-président *du Business Steering* en présence de la direction de l'EMINES au siège de de l'OCP, pour les présentations de quelques travaux de recherche menés à EMINES. Nous y avons présenté, les deux modèles de simulation et d'optimisation, limités au périmètre de l'entité MP34 et notre perspective de travailler sur le volet valorisation économique.

Mars 2018 : réunion courte à l'EMINES avec l'ex vice-président du *Business Steering*. Nous avons rapidement présenté, oralement, l'avancement sur la partie modélisation physique et notre volonté de commencer la partie valorisation économique.

15/05/2018 : réunion à Jorf avec le vice-président du *Business Steering*, en présence du directeur d'enseignement et de la recherche de l'EMINES. L'objectif était de discuter plus en détail et de valider les caractéristiques des modèles : maille temporelle et spatiale et surtout le périmètre considéré. À cette date les modèles étaient limités au périmètre de l'entité MP34. La première conclusion de cette réunion consistait en la validation de l'avancement en termes de modélisation et la nécessité de généraliser le modèle pour toutes les entités de Jorf. Nous avons également discuté de la partie valorisation économique. Nous avons convenu d'intégrer, dans un premier lieu, le département contrôle de gestion pour voir, quels sont leurs besoins et surtout de comprendre comment les coûts sont structurés et imputés aux objets de coûts (produits, entités, etc.). La deuxième conclusion consistait alors en la prévision d'une réunion avec les gens du contrôle de gestion pour avoir leur implication et l'accès aux données.

13/06/2018 : réunion avec le vice-président du *Business Steering* et celui du contrôle de gestion au siège. Elle a porté sur la définition des objectifs et l'accès au système de comptabilité de gestion à Jorf.

06/12/2018 : réunion avec le vice-président du *Business Steering* au siège. Nous avons fait la présentation du diagnostic du système de comptabilité de gestion de l'OCP. Et l'application des principes d'une évaluation économique adaptée aux décisions à court terme. Nous l'avons appliquée aux décisions d'ordonnancement des engrais sur les lignes de production. Le vice-président nous a alors chargée de faire le diagnostic du système de coûts utilisés dans un modèle d'optimisation qu'ils utilisent pour la planification.

13/06/2019 : réunion avec le vice-président du *Business Steering*. Nous avons présenté le diagnostic du modèle de la planification du *Business Steering* et l'extension des deux modèles (optimiseur et simulateur). À la suite à cette dernière réunion nous avons eu la confirmation du passage à l'étape de l'expérimentation des outils sur le terrain.

06/09/2019 et le 10/09/2019 : le vice-président du *Business Steering* nous a mis en contact avec les membres de son équipe au siège. Nous avons organisé des réunions pour discuter de la manière avec laquelle on va procéder aux tests du simulateur.

3.4.1.2 Validation par la communauté scientifique

Pour appuyer le processus de validation nous avons veillé à participer à des conférences et communiquer dans les revues scientifiques internationales. Les retours des relecteurs permettent d'améliorer la qualité des propositions soumises, d'aider à explorer des pistes non envisagées auparavant et dans le meilleur des cas d'avoir une validation de la démarche proposée. Ce projet nous a permis de contribuer dans plusieurs papiers soient présentés dans des conférences ou publiés dans des revues internationales. Ci-dessous la liste de ces travaux de recherche ; nous les avons faits avec l'aide et sous la direction de notre Directeur de thèse et du Professeur Giard :

3.4.1.2.1 Conférences internationales

1. Bara. N, Frédéric Gautier et Vincent Giard. (2018). Modélisation d'une chaîne logistique hybride par la simulation à événements discrets. **12e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation- MOSIM'18** 27 au 29 juin – Toulouse, France

2. Najat Bara, Frédéric Gautier, Vincent Giard, et Frédéric Fontane. (2019). "Economic Evaluation in Decision Models: a Critical Review and Methodological Propositions." ***28th EurOMA conference (Operations adding value to society)***, *Helsinki.*

3. Najat Bara, Frédéric Gautier, Vincent Giard, et Frédéric Fontane. Évaluation économique du pilotage opérationnel - une application aux décisions d'ordonnancement d'un atelier d'engrais. ***CIGI QUALITA 2019****, juin 2019, Montréal, Canada, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02277615*

4. Najat Bara, Frédéric Gautier et Vincent Giard. (2020). Alignment of tactical and operational decisions in decision models: a case study of phosphate supply chain. *29th* ***EurOMA2020 conference (Managing Operations For Impact)****,* Online-University of Warwick, United Kingdom

5. Najat Bara, Frédéric Gautier et Vincent Giard. (2020). Usage des pénalités dans les modèles économiques de management industriel**. Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation- MOSIM'20.**

3.4.1.2.2 Articles de revue

1. Ahlam Azzamouri, Najat Bara, Selwa Elfirdoussi, Imane Essaadi, Frédéric Fontane et Vincent Giard. (2019). DSS approach for heterogeneous parallel machines scheduling with due windows, processor-&-sequence-dependent setup and proximate supply chain constraints, ***International Journal of Production Research***. 10.1080/00207543.2019.1661539

Ce premier article présente l'extension et l'amélioration des versions antérieures qui ont fait l'objet de 5 communications rédigées et présentées, par les autres coauteurs, dans des congrès internationaux avant notre arrivée à l'EMINES. Dans cet article, nous avons travaillé sur la partie présentation du problème, la partie évaluation économique de la revue de littérature, la définition des principes de coûts utilisés dans la fonction-objectif et l'illustration des résultats du modèle.

2. Najat Bara, Frédéric Gautier et Vincent Giard. (2020). Modélisation d'une chaîne logistique hybride par la simulation à évènements discrets, ***Logistique & Management***, https://doi.org/10.1080/12507970.2019.1685919

3. Najat Bara, Frédéric Gautier et Vincent Giard. (2020). An economic evaluation of operational decisions - an application in scheduling evaluation in fertilizer plants. ***Production Planning & Control*** https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1751891

3.4.2 Expérimentation

Elle consiste à aller sur le terrain pour faire des benchmarks avec les données réelles et faire la comparaison entre les solutions proposées et celles adoptées par les opérationnels pour pouvoir mesurer l'apport des interventions proposées. Dans cette étape il s'agit également de mesurer les implications des solutions proposées sur les plans organisationnel, technologique, etc. Nous avons testé les outils avec des données inspirées des données réelles, mais nous n'avons pas encore entamé la phase benchmark. Concernant le simulateur de la production, nous avons commencé un benchmark sur le terrain, limité au périmètre de l'entité MP34.

4. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre le récit du protocole méthodologique RI menée au sein de la CL de Jorf du Groupe OCP. Notre thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire OCP SA d'optimisation industrielle rattachée à l'EMINES. Elle a émané de la volonté de l'OCP pour améliorer son processus décisionnel au niveau opérationnel afin de réaliser les objectifs fixés.

Suite à notre exploration des processus décisionnels tactique et opérationnel à Jorf, nous avons proposé un ensemble d'instrumentations d'aide à la décision au niveau opérationnel permettant de renforcer l'alignement entre ces deux niveaux décisionnels. La validation de ces axes d'intervention a été faite via des réunions de présentation d'avancement que nous avons eues avec le commanditaire de cette recherche à l'OCP et via des articles que nous avons présentés dans des conférences scientifique ou publié dans des revues classées. Les instrumentations que nous proposons portent sur des modèles d'aide à la décision au niveau opérationnel et sur une approche de valorisation économique appropriée aux décisions à court terme. Elles seront présentées dans les chapitres 3 et 4 respectivement. Dans chacun de ces chapitres nous présenterons le cadre théorique et la revue de littérature nous permettant de positionner notre travail et de montrer sa pertinence.

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT DES MODÈLES DÉCISIONNELS POUR LE PILOTAGE OPÉRATIONNEL DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE CHIMIQUE DE JORF

---

1. INTRODUCTION

Ce chapitre se focalise sur la problématique du pilotage opérationnel d'une CL intégrée. Il a pour objectif de présenter les deux modèles d'aide à la décision que nous avons proposés dans le cadre de la RI menée au sein du site de Jorf. Comme nous l'avons introduit au chapitre 2, il s'agit d'un modèle de simulation de la production couvrant tout le périmètre de Jorf, et d'un système interactif d'aide à la décision d'ordonnancement d'un ensemble de lignes de production parallèles de production des engrais. Ces outils ont pour objectif d'améliorer le processus de décision au niveau opérationnel et de renforcer son alignement avec la planification tactique.

Avant de présenter le simulateur et le système d'ordonnancement dans les sections 3 et 4 respectivement, nous allons décrire dans la section 2 un ensemble de règles qui nous ont permis de passer des données détaillées recueillies du terrain à un niveau de granularité d'information pertinent pour la modélisation des problématiques de pilotage opérationnel.

2. NIVEAU DE GRANULARITÉ RETENU DANS LA MODÉLISATION

Le spectre décisionnel opérationnel à Jorf exclut les décisions de type temps réel, prises pour garder le contrôle d'un processus productif (par exemple, maintien d'une température d'un équipement ou de la vitesse d'un convoyeur, dans une plage de valeurs). Les décisions opérationnelles ne nécessitent pas de descendre à un niveau très détaillé des informations utilisées. La modélisation de ce contexte décisionnel doit, par contre, fournir aux managers tous les leviers d'action et les règles de gestion dont ils disposent pour la gestion opérationnelle de la plateforme. Cette modélisation doit permettre, par exemple, de gérer les débits de production de chaque ligne de production constituant un atelier qui se définit comme un ensemble de *n* lignes de production indépendantes.

Les informations recueillies du terrain sont trop détaillées par rapport à la prise de décision à court terme. Il s'agit donc de s'appuyer sur des règles d'agrégation permettant de passer de ces informations détaillées à un niveau de détail pertinent pour la modélisation d'un processus de prise de décisions opérationnelles. Cette section a pour objectif de présenter les règles d'agrégation retenues. Il faut préalablement donner une définition précise du concept de gamme et préciser les niveaux possibles de son utilisation.

2.1 *Concept de la gamme opératoire*

Généralement, la gamme opératoire d'un produit se définit par le traitement d'un ensemble de produits inputs, ayant des caractéristiques physique et chimique (industrie des procédés) requises, combinées dans des quantités (nombre, poids/volume) prédéterminées, pour obtenir après une certaine durée (temps opératoire), à l'aide des ressources matérielles (machines, outillages, engins, etc.) et humaines (opérateurs) que l'on peut considérer représentant un processeur, le produit désiré (ou plusieurs produits) (Degoun *et al*., 2014). Cette définition est générale et reste valable quelle que soit la granularité retenue et donc du niveau d'observation, ce qui conduit à définir des gammes de pilotage de machine à commande numériques, des gammes à utiliser en ordonnancement, des gammes utilisées en planification. On en déduit que :

- Les caractéristiques morphologiques et/ou spatiales des produits sortants du processeur étudié sont différentes de celles des produits entrants. Ceci constitue la principale distinction entre un processeur et un stock. Une opération de transport peut être représentée par un processus modifiant la localisation des individus étudiés (ex. produits, personnes).
- La liste des produits entrants à combiner définissent la nomenclature, les quantités à prélever de chaque input définissent les coefficients de nomenclature. D'un point de vue logique, la présence de plusieurs produits entrants équivaut une opération d'assemblage. Et donc une relation de type ET. Il se peut qu'un ou plusieurs produits soient combinés avec un produit choisi entre un ensemble de produits alternatifs. Dans ce cas l'opération d'assemblage se définit par une combinaison de relations de type ET et OU.
- La localisation des machines est normalement stable définissant le lieu de la production. Les opérateurs ou l'outillage sont considérés obligatoirement présents pendant la durée de toute l'activité. Ils peuvent être rattachés d'une manière permanente à cette activité ou être partagées avec d'autres activités.

La figure 17 décrit les constituants d'une gamme opératoire :

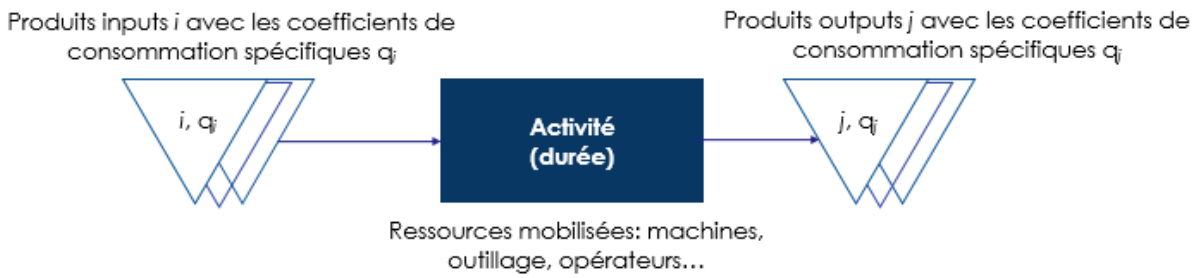

Figure 17 : Composition d'une gamme opératoire

La définition du concept de gamme retenue ci-dessus fait qu'une activité de production d'un produit est composée de plusieurs activités élémentaires auxquelles sont associées des gammes élémentaires (appelées aussi gammes détaillées). L'ensemble des activités élémentaires sont liées par des relations d'antériorité : le produit en sortie d'une activité élémentaire est l'entrée d'une autre activité élémentaire en aval. On en déduit qu'une activité agrégée peut être représentée par un graphe d'activités élémentaires. La différence de ce graphe par rapport à celui utilisé en gestion de projets (Giard, 2003) consiste en l'explicitation des produits entrants et sortants des activités élémentaires.

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. 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.

2.2 *Règles d'agrégation*

Les informations collectées du terrain ne correspondent généralement pas au degré de détail désiré pour la modélisation. Dans cette sous-section nous présentons un ensemble de principes, que nous avons adoptés, permettant de passer des gammes détaillées recueillies sur le terrain vers des gammes agrégées pertinentes pour une modélisation fidèle des décisions opérationnelles. Plus de détails sur les principes sont présentés dans (Degoun *et al.*, 2014).

- **Règle d'antériorité**

L'activité résultante de l'agrégation d'un ensemble d'activités élémentaires doit conserver les mêmes relations d'antériorité (prédécesseurs et successeurs) qu'avaient ces activités élémentaires. Les relations d'antériorité, liant les activités élémentaires fusionnées, ainsi que l'échange de produits disparaissent. La figure 18 illustre l'application de ce principe aux activités élémentaires A_1 et A_2 pour créer l'activité agrégée A.

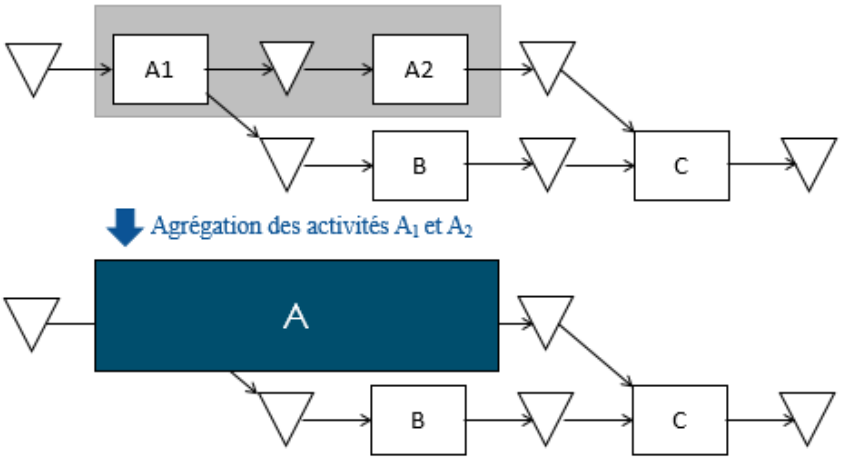

Figure 18 : respect d'antériorité dans l'agrégation de deux activités élémentaires

- **Règle de consolidation des durées**

En reprenant l'analogie faite ci-dessus avec la gestion de projet. Étant donné que le graphe des activités élémentaires ne présente de cycles, elles peuvent être agrégées en une seule activité agrégée dont la durée égale à la durée du chemin critique sur son graphe d'activités élémentaires.

- **Règle de consolidation des ressources**

Les ressources utilisées par chaque activité élémentaire sont considérées comme mobilisées pendant toute la durée de l'activité agrégée. Nous distinguons entre les ressources stockables (matières) et les ressources non-stockables (prestations) (Giard, 2003). Cette distinction conduit à l'explication de deux principes limitant les possibilités d'agrégation en raison des caractéristiques de certaines ressources non-stockables : *i)* 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, qui est partagée avec d'autres activités n'appartenant pas à l'activité agrégée, interrompt l'exécution du processus ; *ii)* les ressources en prestation 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.

- **Règles de la conservation des flux**

Le principe de la conservation de la matière, valable en production continue et non en production discrète, fait que la somme des poids des produits entrants dans un processus est nécessairement égale à la somme des poids des produits sortants sachant que certains outputs peuvent être sous forme de déchets.

- **Principe de parcimonie**

Pour des raisons de compréhension et de maintenance, la modélisation proposée doit être le plus dense possible. Nous avons fait appel au principe de parcimonie selon lequel entre deux modélisations significatives, la plus simple (c'est-à-dire celle utilisant moins de paramètres) est la plus pertinente (Stoica et Söderström, 1982). Pour ce faire nous avons adopté les trois principes suivants :

Paramétrisation : permet de décrire un ensemble de processus mobilisant les mêmes ressources productives, par une paramétrisation des nomenclatures, des temps opératoires et même des routages. Chaque instance de ces paramètres correspond à la gamme de production d'un produit ou d'un service particulier.

Récursivité : consiste à créer des composants à partir des composants (gamme) déjà définis et créés. Ce principe permet une modélisation hiérarchique faisant que l'ouverture d'un composant créé correspondrait à l'ouverture d'un sous-modèle.

Réplication : consiste à faire la duplication d'un composant qui a plusieurs exemplaires dans le système productif modélisé.

2.3 *Exemple d'application des principes d'agrégation*

L'analyse des informations recueillies sur le terrain concernant la production de l'acide sulfurique conduit à représenter la ligne de production d'acide sulfurique par le schéma de la figure 19. Les informations sur les nomenclatures et les débits permettent de vérifier le principe de la conservation des flux (23.4 + 20.3 + 26.4) = (70 + 0.1).

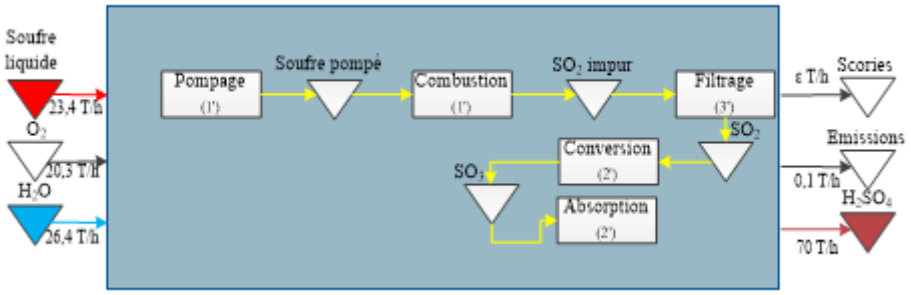

Figure 19: activités élémentaires d'une ligne de production d'acide sulfurique

Il n'y a pas de cycle entre les différentes activités élémentaires. Ces dernières ne partagent pas de ressources avec d'autres activités élémentaires extérieures. On peut passer de la gamme détaillée (figure 19) à la gamme agrégée (figure 20). 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. Le temps opératoire choisi pour le composant créé correspond à une quantité de production bien définie. Ce temps opératoire est la somme des durées de chacune des gammes détaillées, nécessaires pour la production de la même quantité de production.

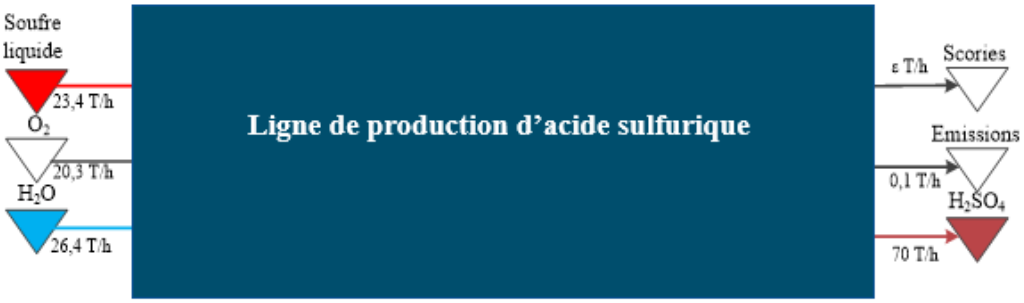

Figure 20 : activité agrégée ligne de production d'acide sulfurique

L'atelier sulfurique de l'entité MP34 est composé de 6 lignes de production. Sa création consiste en la « réplication » en six exemplaires du composant venant d'être créé en mettant à jour, si nécessaire, les capacités des lignes de production.

3. MODÉLISATION D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE HYBRIDE PAR LA SIMULATION À ÉVÉNEMENTS DISCRETS

Nous avons expliqué, dans le chapitre 2, que parmi les problèmes décisionnels majeurs, identifiés dans notre diagnostic de la CL de Jorf et de son processus décisionnel, il y a

l'éventuelle incohérence entre les décisions opérationnelles prises au niveau de chaque atelier de chaque entité juridique, et le problème d'alignement entre les décisions tactiques et les décisions opérationnelles. La compréhension fine du problème décisionnel posé est facilitée par l'utilisation d'un simulateur de la production.

La simulation est utilisée par les managers pour prévoir le comportement d'un système productif, avec une maille temporelle de quelques minutes à une heure, en réponse à un ensemble de décisions opérationnelles ou tactiques, dont les conséquences sont rapidement constatées sur un horizon limité à quelques semaines, ces décisions étant prises pour satisfaire des demandes de biens ou de services.

Dans le cas de la CL de Jorf (Bara *et al.*, 2020a, 2020b), on s'intéresse au pilotage opérationnel, en univers certain, d'un système productif dont la difficulté de modélisation tient au fait qu'il combine sans restriction des processus continus et/ou discrets pour constituer une chaîne logistique hybride. Actuellement, aucun logiciel commercial, basé sur la simulation à événements discrets (SED), la dynamique des systèmes (DS), une approche basée-agents (SBA) ne permet de modéliser et simuler n'importe quelle configuration de CL hybride. AnyLogic, logiciel commercial offrant une combinaison de ces trois approches et considéré comme le plus avancé dans ce domaine (Brailsford 2018), offre un certain nombre de fonctionnalités permettant la modélisation/simulation de certaines configurations de CLs hybrides, sans pouvoir les traiter toutes, comme on le verra. Nous avons alors créé un ensemble de composants génériques, par combinaison de composants de base d'un logiciel de simulation à évènements discrets, permettant la modélisation des chaînes logistiques hybrides pour le pilotage opérationnel.

Le reste de cette section est organisé comme suit :

- Dans la sous-section 3.1, nous détaillons les différences qui existent entre un PEC et un PED, ce qui permettra de lister les problèmes à résoudre par la modélisation d'un PEC par la SED.
- La sous-section 3.2 est consacrée à une revue de littérature dans laquelle nous faisons un bref rappel des techniques de simulation existantes et nous justifions notre recours à la SED.
- La sous-section 3.3 décrit les composants génériques développés, avec un détail suffisant pour permettre leur adoption par les très nombreux spécialistes de la

simulation en entreprise (qui majoritairement utilisent la SED) et pour éviter d'affirmer sans preuve le bien-fondé de notre solution.

- La dernière sous-section 3.4 présente le simulateur que nous avons développé, moyennant ces composants génériques.

3.1 *Problèmes méthodologiques posés par la modélisation/simulation d'une Chaîne Logistique Hybride*

Un diagnostic précis sur les différences qui existent entre les processus continus et discrets est un préalable incontournable. Notre objectif étant de pouvoir simuler une CL hybride par la SED, nous examinerons ensuite les problèmes posés par le processus de discrétisation des flux utilisés par certains simulateurs à événements discrets pour traiter les processus continus et ceux que pose la transformation d'une nomenclature chimique en une nomenclature de production (de type discret). À partir de ces observations, nous en déduirons les cinq problèmes que pose la modélisation/simulation d'une CL hybride par la SED.

3.1.1 Analyse détaillée des différences entre processus discrets et continus

Les problèmes méthodologiques rencontrés par modélisation d'une CL hybride résultent des différences fondamentales entre les PED et PEC, que le tableau 5 décrit en s'appuyant sur les caractéristiques : du processeur (admission, temps opératoire, prise en compte de la nomenclature de production ou de la nomenclature chimique), du stock (capacité offerte et utilisée) et du transport des items.

Tableau 5 : Analyse des différences entre les processus continus et discrets

			Processus Continu	Processus Discret
Type de produits			Flux (de liquide, granules…)	Items (produits composants, personnes, informations…)
Processeur	Admission des produits dans le processeur		- Déterminé par le taux ρ d'arrivée dans le processeur - Limité par la saturation possible de stocks en aval ou de rupture de stock en amont	- Possible seulement si le processeur est inoccupé - Tous les inputs requis sont admis simultanément - Tous les outputs quittent simultanément le processeur à la fin du traitement (sauf en cas de saturation des stocks en aval) - Admission de nouveaux items interdite si le traitement est déjà commencé
	Temps opératoire (dépend de l'output)		Temps moyen μ de présence d'un petite fraction quelconque du flux dans le processeur	- Temps opératoire μ identique pour tous les items admis simultanément dans le processeur - μ est également l'intervalle de temps minimal entre deux arrivées successives et deux départs successifs
	- n inputs différents (indice *i*) - m outputs différents (indice *j*) ***** **Input** ***** - PD : nomenclature de production α_i - PC : nomenclature chimique α_i avec $\Sigma_i\ \alpha_i = 1$ **** **Outputs** ***** - PD : nomenclature de production β_j - PC : nomenclature chimique β_j avec $\Sigma_j\ \beta_j = 1$	n = 1 input (i = 1) ET m = 1 output (j =1) ET $\alpha_1 = \beta_1$	$\alpha_1 = \beta_1 = 1$ Débit du flux entrant et du flux sortant égal au débit de production ρ du processeur	Arrivée d'un lot de α_1 items de l'input i = 1 dans le processeur pour produire un lot de β_1 items de l'output j = 1 ($\alpha_1 = \beta_1 = 1$ possible)
		n inputs (i = 1…n) ET m=1 output (j = 1)	*Processus de Mélange (Blending)* Débit du flux entrant ρ_i lié au débit de production ρ du processeur par $\rho_i = \rho.\alpha_i$	*Processus d'assemblage* Arrivée simultanée dans le processeur de lots d'input i de α_i items, avec i = 1..n, pour produire 1 lot de β_1 items de l'output j = 1 (β_1 = 1 possible)
		n = 1 input (i = 1) ET m outputs (j = 1..m) ***Co-production simple*** *(outputs)*	*Processus de dissociation chimique* Débit du flux sortant ρ_j lié au débit de production ρ du processeur par $\rho_j = \rho.\beta_j$	*Processus de désassemblage* Arrivée dans le processeur de 1 lot de α_1 items de l'inputs i =1 pour produire des lots de β_j items de l'output j, avec j = 1..m (α_1 = 1 possible)
		n inputs (i = 1…n) ET m outputs (j = 1..m) ***Co-production généralisée*** *(inputs & outputs)*	*Co-production chimique* Débit du flux entrant ρ_i et débit du flux sortant ρ_j liés u débit de production ρ du processeur par $\rho_i = \rho.\alpha_i$ ET $\rho_j = \rho.\beta_j$	n ≠ m *Processus d'assemblage ou de désassemblable* *Processus d'assemblage avec rebus* n = m ET $\alpha_i = \beta_i$ *Traitement (chimique, thermique…) par lot*
Stock	Stock de capacité K		K est défini par un volume	- *cas a* : (cas habituel) K se défini par un nombre maximum d'items (implicitement, tous de même volume unitaire) - *cas b* : l'item h par son volume $s_h \rightarrow \Sigma_h\ s_h \leq K$
	Niveau courant L d'utilisation du stock		Défini dynamiquement par l'espace occupée	Avec H items en stock - *cas a:* L = n - *cas b:* L = $\Sigma_h\ s_h$
Transport	Transport de produits entre 2 places distantes de λ mètres		Via un tuyau (pipe) ou un convoyeur caractérisé par : -son débit d'admission ψ - sa longueur λ	- Chaque item (ou lot d'items) envoyé par un processeur voyage séparément. - Les "chemins" possibles sont déclarés explicitement - Le moyen de transport peut être explicite camion, convoyeur…) ou implicite - Avec la vitesse de déplacement ψ et la distance λ (qui peut avoir une valeur nulle par défaut) le temps
	Vanne (pour envoyer des produits d'un stock à un autre)		- Relie un stock donné à un autre stock ou à un processeur - Défini par 4 paramètres : destination; date d'ouverture, débit du transfert, durée d'ouverture	Non pertinent

3.1.2 Transformations préalables à la modélisation d'un PEC par un simulateur à événements discrets

Pour être en mesure de traiter un flux dans un simulateur à événements discrets, un processus de discrétisation de ce flux doit être opéré pour obtenir des items qui puissent être traités par des PEDs, auquel s'ajoute le problème de la transformation de nomenclatures chimiques en des nomenclatures de production.

3.1.2.1 Processus de discrétisation d'un flux continu

La discrétisation d'un flux continu conduit à la création d'items continus ayant un poids donné (ou volume) et traités comme des items « discrets » dans la simulation.

Les items continus créés par cette discrétisation d'un flux, héritent de ses caractéristiques chimiques et de caractéristiques volumiques et pondérales qui dépendent du débit du flux et de l'intervalle de temps θ qui délimite le lot de liquide ou de granulés associé aux items continus. Par exemple (Figure 21), avec un pas de discrétisation $\theta = 9$ minutes, l'arrivée de soufre liquide dans une ligne de production d'acide sulfurique, avec un débit de 35,3 t/h, conduit à la création d'un item continu de 5,3 t, toutes les 9 minutes. Ces items continus sont traités ensuite indifféremment par des processus discrets ou continus.

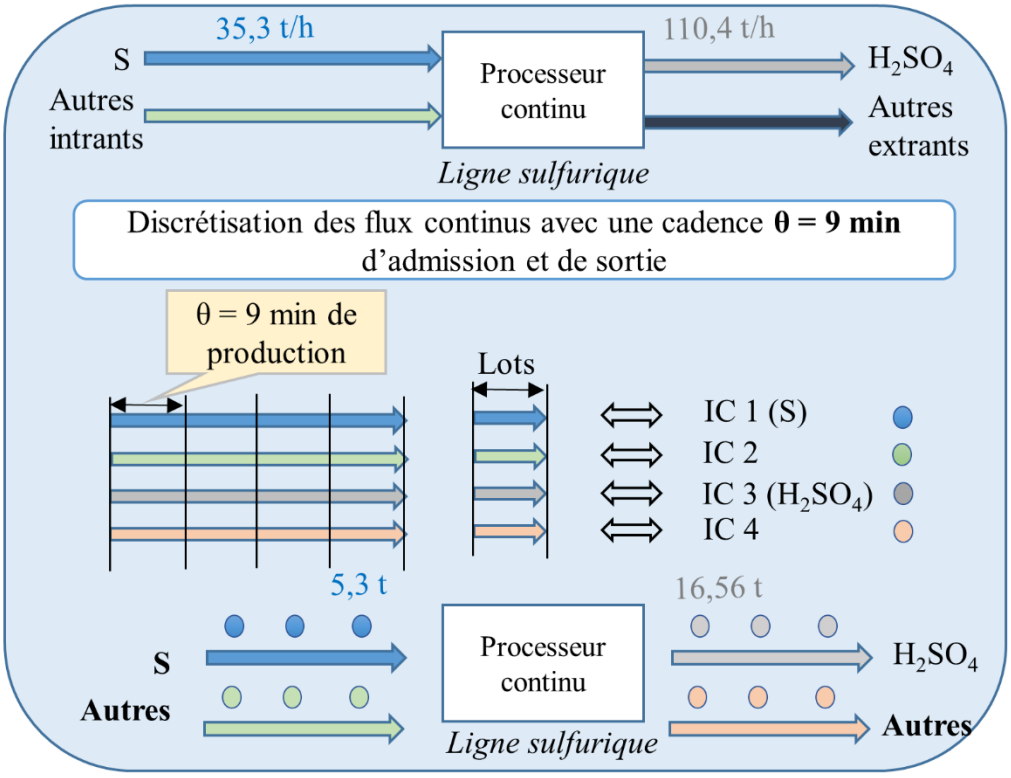

Figure 21 : Discrétisation d'un flux continu

Cette discrétisation soulève plusieurs problèmes ; nous en reportons ici les deux principaux, les autres étant décrits ultérieurement.

- La différence de poids entre un item continu produit par un processeur et l'item continu de même nature consommé ultérieurement par un autre processeur génère plusieurs problèmes que nous illustrons par un exemple de la CL hybride étudiée. L'unité de production d'acide sulfurique possède six lignes de production identiques dont le régime nominal est de 110 t/h. À tout moment, le pilote d'une ligne peut décider d'ajuster son régime de marche en multipliant le régime nominal par un facteur multiplicatif allant de 0,8 à 1,2. L'item continu d'acide sulfurique est utilisé pour la production d'acide phosphorique (0,884 t d'acide sulfurique pour 1 t d'acide phosphorique). L'unité de production d'acide phosphorique comporte six lignes de production, dont le régime de marche est de 143 t/h pour quatre lignes et de 79 t/h et 107 t/h pour les deux autres lignes. De la même façon le régime de marche de ces lignes peut être ajusté par un facteur multiplicatif. Dans ces conditions, quel que soit le processus de discrétisation, les caractéristiques des items continus créés par l'unité de production sulfurique ne peuvent jamais correspondre à celles requises par les lignes d'acide phosphorique en aval. Pour

alimenter un processus avec les items continus ayant les caractéristiques demandées, il faut créer une primitive générique, que nous nommerons « convertisseur », pour créer des items continus de caractéristiques désirées, à partir d'items continus de caractéristiques différentes.

- Un processeur discret ne peut accepter un item que s'il est vide, c'est-à-dire que la tâche précédente est terminée (voir tableau 5). Si un processeur discret est utilisé pour représenter un processus continu ayant un temps de traitement μ et un débit ρ, si ce processus n'utilise qu'un seul input, son poids doit nécessairement être égal à $\mu \cdot \rho$ et l'intervalle θ entre deux entrées successives doit être égal à μ. Dans un système de production complexe, cette contrainte a deux impacts préjudiciables à une bonne représentation du système productif. La multiplicité des rythmes d'admission dans les différents « processeurs continus », induite par la variété des temps opératoires, peut produire des oscillations n'existant pas dans la réalité. La déconnexion entre θ et μ s'impose lorsque μ est grand. Dans ce cas, si l'intervalle d'admission θ est inférieur à μ, se pose alors un autre problème : le processeur ne peut accepter de nouveaux items tant qu'il n'a pas terminé le traitement de l'item en cours. Pour assurer la compatibilité entre les intervalles d'admission et les temps de traitement, nous avons créé une primitive générique, nommée « processus continu ».

3.1.2.2 Transformation d'une nomenclature chimique en une nomenclature de production

D'une manière générale, un processus continu prélève un certain nombre d'inputs différents et produit des outputs différents. Appuyons-nous sur l'exemple de la nomenclature de l'acide phosphorique qui relève d'une co-production généralisée (voir tableau 5). Sa production fait appel à l'équation molaire suivante, complétée par les nombres atomiques de ces molécules, qui vérifie le principe de conservation de la matière (somme égale à 364).

$i=1$		$i=2$	$i=3$		$j=1$		$j=2$
Acide sulfuric		*Phosphogypse*	*Eau*		*Acide phosphorique*		*Tricalcium de phosphate*
$3H_2SO_4$	+	$Ca_3(PO_4)_2$	$+ 6H_2O$	$\rightarrow$	$2H_3PO_4$	$+ 3(CaSO_4,2H_2O)$	
150		154	60		100	264	

Dans ces conditions, la nomenclature chimique est : $\alpha_1 = 150/364 = 0.41209$, $\alpha_2 = 154/364 = 0.42308$, $\alpha_3 = 60/364 = 0.16484$, $\beta_1 = 100/364 = 0.27473$, $\beta_2 = 100/364 = 0.72527$.

Avec un intervalle d'admission θ=60 min et un débit horaire $\rho = 524{,}16$ t/h dans la ligne de production d'acide phosphorique, le processeur prélève, toutes les 60 min, un item continu de $524{,}16 \times 0{,}41209 = 216$ t d'acide sulfurique, un item continu de 221,76 t de Tricalcium de phosphate et un item continu de 86,4 t d'eau. Toutes les 60 minutes, ce processus émet un item continu d'acide phosphorique de 144 t et un item continu de phosphogypse de 380,16 t.

Pour un PED, la nomenclature est une liste de composants requis pour fabriquer une unité d'un produit donné, ainsi que les nombres nécessaires de ces composants. Dans le cas que nous venons d'étudier, la nomenclature de production d'un item continu d'acide phosphorique de 144 t, implique l'utilisation de 1 item continu d'acide sulfurique de 216 t, de 1 item continu de Tricalcium de phosphate de 221,76 t et de 1 item de 86,4 t d'eau. Bien évidemment, cette nomenclature de production dépend du débit de production de la ligne.

Dans un contexte industriel, quatre précisions doivent être apportées.

- Les rendements théoriques de cette nomenclature ne peuvent être atteints. Pour atteindre la production périodique de 144 t, il faut un peu plus d'inputs. Sur une ligne existante, par exemple, il faut 217,08 t d'acide sulfurique (au lieu de 216 t). Cette augmentation d'inputs consommés (qui dépend des installations industrielles utilisées) s'accompagne d'une production inévitable de scories et gaz (ce qui conduit au respect de l'équation de conservation).
- Dans les industries de procédé, la capacité de production d'une ligne, exprimée le plus souvent comme un débit pour une période donnée, pour le produit pour lequel la ligne a été créée. Pour la ligne d'acide phosphorique considérée $(j = 1)$, le débit horaire de production de cet acide est $\rho_{j=1} = 524{,}16 \times 0{,}27473 = 144$. Par ailleurs, la nomenclature chimique est souvent exprimée sous forme de ratio, indépendant du débit de production. Par exemple, pour l'acide sulfurique, ce ratio est $\alpha_1 / \beta = 1{,}5$, ce qui signifie que la production de 1 t d'acide phosphorique consomme 1,5 t d'acide sulfurique. La

multiplication du débit de production d'acide phosphorique par ce ratio détermine le débit d'entrée d'acide sulfurique. $\rho_{i=1} = \rho_{j=1} \cdot 1,5 = 144 \times 1,5 = 216$.

- À partir du moment où les poids des items continus sont déterminés par les formules $\theta \cdot \rho \cdot \alpha_j$ et $\theta \cdot \rho \cdot \beta_k$, il est évident que tout changement du débit de production ρ du processeur continu modifie le poids des items continus entrants et sortants.
- Une fois créé, un item continu est utilisable par un PED dans la simulation, comme n'importe quel item.

3.1.2.3 Problèmes à résoudre dans la modélisation d'un PEC dans un simulateur à événements discrets

L'analyse du tableau 5, comparant les caractéristiques des PEC et PED, met en évidence 5 problèmes à résoudre, si l'on veut traiter dans un simulateur à événements discrets, un item continu comme un item « discret ».

1. L'utilisation d'un processeur discret pour modéliser un processus continu de temps opératoire μ implique un intervalle d'admission θ = μ. Cette solution, utilisée par plusieurs logiciels (dont AnyLogic) peut provoquer des **fluctuations artificielles** importantes si cette solution est généralisée à tous les processus continus, ce qui peut conduire à des diagnostics erronés de rupture de stock ou de saturation de stock, pouvant se propager en amont ou en aval. Dans notre étude de cas, le temps opératoire de la production d'acide sulfurique est de 9 min et celui de l'acide phosphorique 29 %, de 240 min. Pour lisser les effets de la discrétisation et obtenir des résultats de la simulation de nature à effectuer un diagnostic pertinent, il faut nécessairement découpler la définition de l'intervalle d'admission θ dans un processeur, de son temps opératoire μ. Si ce temps est élevé, en choisissant une valeur de θ inférieure à μ, compatible avec le *reporting* de simulation désiré. On peut ajouter qu'avec un intervalle θ de l'ordre de la dizaine de minutes, l'impact du processus de discrétisation devient peu perceptible et la simulation discrète a un comportement proche de celui que l'on aurait eu avec une simulation continue. Ce changement de l'intervalle d'admission a deux conséquences : il modifie le poids des items continus entrants et sortants et il conduit à des arrêts de production pendant $(\mu-\theta)/\mu$ du temps de production disponible, puisque le processeur ne peut admettre de nouveaux items, qu'après avoir terminé

l'opération en cours de durée θ. Nous décrirons en sous-section 3.3, la solution à ce problème. On peut ajouter que ce processus de discrétisation des flux n'a aucun impact sur la modélisation des processus discrets dans la SED.

2. Le second problème rencontré est relatif aux **stocks capacitaires**, habituellement défini en SED par le nombre maximum d'items qu'un stock peut contenir. Cela ne pose aucun problème si tous les items possèdent le même poids (ou le même volume, selon la définition retenue de la capacité). À partir du moment où un stock capacitaire est alimenté en items continus de caractéristiques différentes (fabrication par des processeurs de caractéristiques différentes), cette hypothèse est invalidée. Un certain nombre de SED offrent une solution à ce problème en calculant la capacité utilisée comme la somme des volumes des items continus qu'il contient (parfois en agrégeant tous ces items continus en un item continu unique). Si tel n'est pas le cas, une solution de « stock capacitaire » doit être trouvée ; elle sera présentée en sous-section 3.3.
3. Le troisième problème rencontré est lié à l'**inévitable variation des poids des items requis** dans les nomenclatures de production et ayant peu de chance de correspondre au poids d'items existants dans un stock capacitaire. Pour traiter ce problème nous avons créé le composant générique « Convertisseur » qui sera décrit en sous-section 3.3. AnyLogic propose une solution à ce problème et limite à 5 le nombre de stocks capacitaires d'items continus (de nature différente), connectés à un processeur continu.
4. Dans la SED, les items ne peuvent se déplacer directement d'un stock à un autre, les stocks étant de nature passive. Le transfert de fluides entre stocks est géré par une vanne, ouverte à partir d'une certaine date, pendant un certain temps avec un certain débit. La création de vannes s'impose pour pouvoir simuler une CL hybride avec un SED. AnyLogic offre une telle possibilité, sans grande souplesse, à moins d'introduire une procédure écrite en JAVA.
5. Le dernier problème méthodologique rencontré se rencontre lorsqu'un processus continu et géré à **flux tirés** (c'est-à-dire en exécution d'ordres de fabrication portant sur des produits différents) et non à flux poussés. Ce problème de synchronisation entre un flux d'information (ordres de fabrication) et des flux de production se pose également en production discrète mais sa solution est plus compliquée dans le cas continu. AnyLogic ne permet pas à un processeur continu de passer en production d'un produit à un autre, ce qui oblige à une multiplication fictive de ces processeurs, la gestion de la diversité devenant

compliquée et nécessitant l'écriture de programme Java. La solution que nous proposons offre la souplesse désirée.

3.2 *Revue de littérature*

Après un bref rappel des trois principales approches de simulation, on s'intéressera à leur capacité à simuler l'impact d'un ensemble de décisions opérationnelles dans une CL hybride. On verra ensuite dans quelle mesure la simulation hybride peut répondre à cet objectif, avant de regarder rapidement, ce que l'offre commerciale de logiciels de simulation met à notre disposition, d'excellentes revues de littérature ayant été produites ces dernières années. La conclusion de ces revues nous conforte dans notre approche.

3.2.1 Les principales approches de simulation de processus

3.2.1.1 Simulation à événements discrets (SED)

Brailsford *et al.* (2014, chapitre 6) définissent « les modèles de SED comme des réseaux de files d'attente et d'activités, où les changements d'état du système surviennent à des dates discrètes. Les objets de ce système sont individualisés, chacun possédant des caractéristiques propres conditionnant leur devenir, et les durées de chaque activité sont des occurrences de variables aléatoires ». La SED est particulièrement appropriée pour étudier les décisions opérationnelles et tactiques (Andersson *et al.* 1998 ; Borshchev et Filippov, 2004) et permet une représentation du système productif au niveau de granularité pertinent (temps, espace…) pour anticiper l'impact de décisions que l'on envisage de prendre.

3.2.1.2 Simulation basée sur la Dynamique des Système (DS)

Brailsford *et al.* (2014, chapitre 6) définissent les modèles DS comme un réseau de stocks et de flux, dont les changements d'état sont continus. Les objets traités sont principalement des quantités continues (fluides…) qui circulent dans un système de réservoirs reliés par des tuyaux. Cette approche se focalise plus sur des politiques que des décisions. L'évolution de l'état du système est décrite par un ensemble d'équations différentielles. Le système productif est modélisé avec un fort niveau d'agrégation, dans lequel on considère des agrégats et non des individus pour fournir une vue macroscopique du fonctionnement du système étudié (Venkateswaran and Son, 2004 ; Scholz-Reiter *et al.* 2005 ; Kleijnen, 2005 ; Brailsford,

Churilov et Dangerfield (2014, chapitre 3). En dépit de son intérêt pour clarifier le comportement de systèmes complexes, la modélisation par la DS souffre de limitations liées à une représentation très simplifiée de la réalité, son besoin de travailler sur des agrégats et son usage de débits moyens. En comparaison, la SED offre plus de flexibilité et permet une modélisation suffisamment détaillée du système étudié (Brailsford *et al*., 2014, chapitre 6). Des comparaisons très détaillées entre les modélisations SED et DS sont disponibles dans (Brailsford *et al.*, 2014, tables 6.3, 9.1 et 9.3).

3.2.1.3 Simulation basée sur les agents (SBA)

Nous avons écarté l'approche SBA, dont l'offre logicielle est significative (Abar, 2017), parce qu'elle n'est pas compatible avec l'objectif poursuivi. Les agents, qui peuvent être utilisés pour représenter des produits et des ressources sont des « objets avec des attitudes » (Bradshaw, 1997), capables de prendre des décisions autonomes. Pour Aldea *et al*. (2004), « dans un système multi-agent, les agents interagissent entre eux pour atteindre leurs objectifs individuels en échangeant des informations, en coopérant pour atteindre un objectif commun ou en négociant pour résoudre des conflits ». D'excellents tableaux comparatifs de la SED avec la SBA sont présentés dans (Siebers *et al*., 2010 ; Baldwin *et al.*, 2015).

Dans le type du problème étudié, le comportement du système productif découle d'un ensemble de décisions prises une fois pour toutes et que les entités productives appliquent passivement. Le but de la simulation est de vérifier si le système productif reste sous contrôle ; dans le cas contraire, ces décisions sont révisées et leur cohérence étudiée à nouveau par le même modèle de simulation.

3.2.2 Simulation hybride (SH)

La SH peut être définie comme « combinant au moins deux des trois approches (SED, DS, SBA) pour modéliser des systèmes industriels étendus et complexes ». Jahangirian *et al.* (2010) et Brailsford *et al*. (2018) proposent des analyses bibliographiques détaillées de la SH, fondée sur la typologie orientée simulation de Morgan *et al.* (2017) qui enrichissait celle de Benett (1985) relative à l'usage combiné des outils de RO (Recherche Opérationnelle). Cette grille distingue 4 combinaisons que l'on illustrera à chaque fois par un exemple :

- *Mode séquentiel* : deux (ou plus) modèles distincts basés sur une seule approche, sont exécutés successivement, le résultat du modèle-amont devenant une donnée d'entrée du modèle-aval. Par exemple, Venkateswaran et Son (2004) ont développé une solution fondée sur deux modèles de simulation utilisés d'une manière hiérarchique : le premier fait appel à la DS pour simuler des décisions stratégiques relatives à la gestion des stocks en fonction des commandes prévisionnelles, par la suite un deuxième modèle fondé sur la SED est utilisé pour simuler un ensemble de décisions opérationnelles intégrées dans la solution fournie par le premier modèle.
- *Mode enrichi* : une méthode de simulation dominante utilise en encapsulation une autre méthode. Par exemple, Music et Matk, (1999) et Xiao *et al.* (2017) sont intéressés à la simulation des processus chimiques de nature hybride : des évènements discrets déclenchent le lancement ou l'arrêt d'une transformation chimique contrôlée ensuite par un système d'équations différentielles. La DS est utilisée pour le suivi des paramètres physicochimiques des réactions chimiques et enrichie par le JAVA ou les réseaux de Petri (DES) pour simuler la partie discrète.
- *Mode interactif* : deux sous-modèles distincts mais d'égale importance interagissent de manière cyclique au cours de la simulation. Par exemple, Meyer *et al*. (2011) ont développé une approche fondée sur deux modèles séparés pour la simulation de la chaîne de production des carburants. Le premier modèle concerne la partie gazeuse et alimente le deuxième modèle qui concerne la partie liquide. Dans ce cas de figure, les deux modèles interagissent pour simuler un même niveau décisionnel.
- *Mode intégré* : modèle unique intégrant parfaitement deux (ou plus) méthodes de simulation sans qu'il soit possible de dire à quel moment une méthode prend le relais d'une autre. Dans leur tableau de synthèse portant sur 104 articles traitant de la SH, Brailsford *et al*. (2018), n'ont trouvé que 4 articles relevant de cette catégorie, ces modèles intégrant beaucoup de programmation spécifique.

De notre point de vue, le problème à résoudre n'est pas de celui de la combinaison des approches DS et SED, qui relève de la SH, mais de trouver un moyen simple de modéliser et simuler des CL hybrides pour tester l'impact de décisions opérationnelles, sans être obligé de passer par une programmation spécifique importante.

3.2.3 Logiciels commerciaux

Dans leur analyse bibliographique étendue, Brailsford *et al*. (2018) ont analysé l'offre commerciale des logiciels de simulation. Selon eux, bien que quelques logiciels de la DS soient capables d'utiliser des distributions de probabilités et quelques composants des SED (convoyeur) et que quelques logiciels de SED offrent des possibilités limitées de modélisation de flux, relevant de l'approche DS, l'intégration n'est jamais exhaustive. Ceci est « dû à la différence fondamentale entre SED et DS en termes d'exécution de ces modèles et d'hypothèses méthodologiques et théoriques sous-jacentes, telles que changement d'état de type continu ou discret ou conceptualisation d'un système comme un réseau de files d'attente et d'activités ou comme un réseau de flux et de stocks. Les logiciels fondés principalement sur la SED ou la DS hériteront non seulement des forces de cette approche initiale mais aussi de ses limites dans la prise en compte de l'autre approche » (Brailsford *et al*. 2018).

3.2.4 Conclusion de cette revue de littérature

Notre analyse bibliographique montre qu'aucune approche actuelle de type SED, SBA et DS ne permet complètement de simuler n'importe quelle CL hybride au niveau opérationnel et que la simulation hybride en mode intégré nécessite une programmation spécifique lourde. Dans la section suivante, nous proposons une solution générique à ce problème.

3.3 *Principes de modélisation d'une chaîne logistique hybride par la SED*

Dans cette section on s'intéresse à la présentation d'un ensemble de 4 composants génériques permettant de modéliser une CL hybride, au niveau de granularité requis pour l'analyse du pilotage opérationnel. Ces composants génériques, créés en réponse aux problèmes identifiés à la fin de la sous-section 3.1, combinent deux primitives de base de tout SED, le stock et le processeur. Ces composants génériques exploitent des données de tableaux du simulateur, permettant une paramétrisation facile à mettre en œuvre sans travail de programmation. Ces composants génériques peuvent être ajoutés aux primitives que l'interface graphique d'un SED offre au concepteur d'un modèle de simulation pour créer sa représentation du système productif par des simples actions de *drag and drop*. Ils permettent de traiter toutes les configurations possibles d'une chaîne logistique hybride et pouvoir mesurer l'impact d'un ensemble de décisions opérationnelles. Les fondements logiques de certaines de ces primitives

ont été présentés très sommairement dans Degoun *et al*. (2015) et présentés en détail dans (Bara *et al*., 2020a, 2020b).

Les principaux logiciels commerciaux offrent des possibilités de programmation utilisant des caractéristiques des items et des composants de base, ainsi que des données stockées dans des tableaux du simulateur. Ces composants génériques utilisent ces possibilités ; on conviendra ici de repérer les caractéristiques en adoptant la convention suivante « objet.caractéristique » dans laquelle « objet » est remplacé par le nom d'un stock, d'un processeur ou correspond à un item et « caractéristique » est remplacé par des spécifications de l'objet, telle que « poids », « Temps opératoire », etc. Ajoutons que les stocks et les processeurs utilisés pour créer un composant générique, peuvent l'être de manière « détournée » et seront, dans ce cas, qualifiés de fictifs.

Dans ce qui suit nous présentons la description des composants génériques, faciles à implémenter dans les principaux logiciels de SED.

3.3.1 Modélisation du composant générique « Processus Continu »

Le composant générique d'un processus continu que nous proposons (voir figure 22), combine trois composants de base d'un SED, deux processeurs et un stock.

- En amont, un stock est alimenté par un processeur d'admission et de début de traitement (Processeur_1, dans la figure 22), doté d'un temps opératoire θ qui correspond à la fois à la cadence d'admission dans le processus continu et au début du temps de traitement μ du processeur continu $(\mu \geq \theta)$. Ce processeur est connecté aux stocks des différents inputs du processus continu par des convertisseurs (voir ci-après) et prélève un item continu dans chaque stock, conformément à la nomenclature de production. À titre d'exemple, on a retenu dans la figure 22, les trois stocks des produits intervenant dans la fabrication de l'acide phosphorique.
- En aval, ce processeur est connecté à un stock fictif ('Stock_1') avec un temps de séjour $\mu - \theta$ correspondant au temps de traitement résiduel. Il permet de prendre en compte des items se trouvant à différents stades d'avancement dans le processus continu.
- En aval le stock est connecté à un processeur fictif 'Processor_2', dont la fonction est de prélever du stock tout item ayant séjourné le temps $\mu - \theta$. En général, une fois l'opération

terminée, des items de natures différentes sont expédiés dans autant de stocks, conformément à la nomenclature utilisée, ces stocks étant généralement capacitaires.

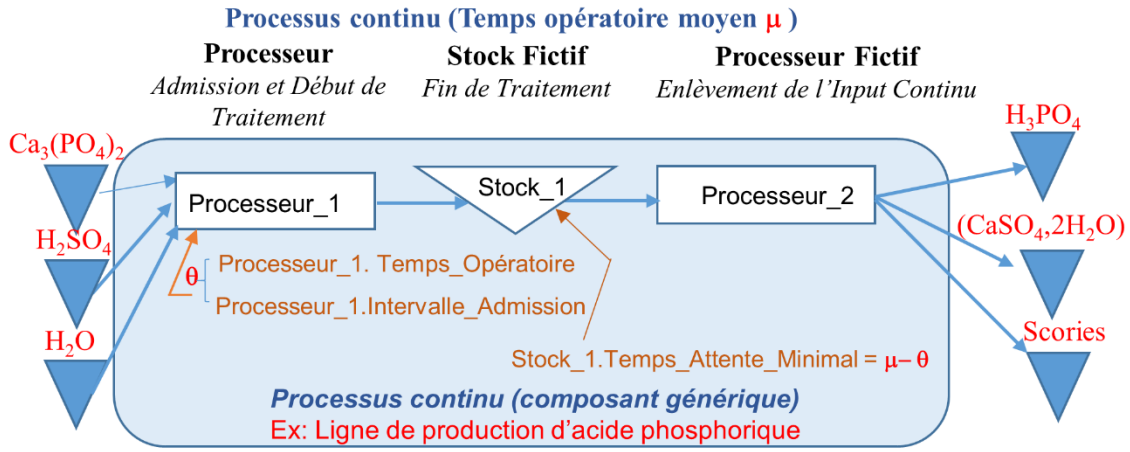

Figure 22 : Composant générique « Processus Continu »

3.3.2 Modélisation du composant générique « Stock Capacitaire »

Le second problème évoqué à la fin de la sous-section 3.1, est relatif à la gestion d'un stock de fluide ou granules, mobilisant une capacité disponible ou utilisée, définie en volume ou en poids, et non en nombre d'items. Pour le résoudre, on a créé le composant générique Stock Capacitaire, utilisable par les SED ne disposant pas de cette fonctionnalité. Ce composant générique mobilise trois composants de base, un processeur fictif et deux stocks (voir figure 23).

Le stock capacitaire est caractérisé par les labels Stock_3.Capacite_ Offerte et Stock_3.Capacité_Utilisée, dont les valeurs, exprimées en poids (ou en volume), sont initialisées en début de simulation. Le premier label est statique et garde la valeur définie en début d'initialisation. Le second label varie dynamiquement en fonction de l'utilisation instantanée de ce stock. Les items entrants sont caractérisés par le label Item.Poids.

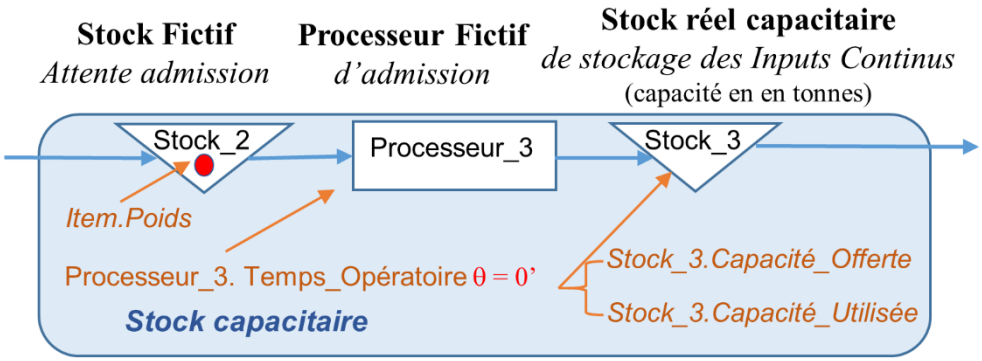

Figure 23 : Composant Générique « Stock Capacitaire »

- Le stock fictif 'Stock_2' peut contenir un nombre maximal d'items égal au nombre de processus alimentant ce stock.

- Le processeur fictif 'Processeur_3', ne peut accepter d'items que si la capacité résiduelle du stock réel est suffisante. Ceci est assuré par le programme suivant, exécuté avant prélèvement de l'item :

Si *Stock_3.Capacité_Utilisée+Item.Poids < Stock_3._Capacité_Offerte*

Alors *admettre l'item dans le Processeur_3*

Sinon *bloquer le prélèvement de l'item*

- À l'entrée d'un item dans le stock réel capacitaire (Stock_ 3), la mise à jour de la capacité utilisée est effectuée par le programme suivant :

Stock_3. Capacité_Utilisée ←Stock_3.Capacité_Utilisée+ Item.Poids

À la sortie d'un item de ce stock, la mise à jour de la capacité utilisée est effectuée par le programme suivant :

Stock_3.Capacité_Utilisée←Stock_3.Capacité_Utilisée- Item.Poids

Un stock capacitaire peut être alimenté par d'autres stocks ou par des processus continus. Un processus continu qui émet des outputs alimentant des stocks capacitaires, doit s'arrêter dès que l'un de ces stocks capacitaires est saturé. La solution consiste alors à ajouter un programme s'inspirant du test décrit ci-dessus pour bloquer l'alimentation du processus continu ; ce test est à effectuer à l'entrée du Processeur_1 de la figure 22.

3.3.3 Modélisation du composant générique « Convertisseur »

Le couplage entre deux processus continus liés par un stock est impossible si les poids des items continus émis par le processus amont ne correspondent pas à ceux demandés par le processus aval. Pour résoudre ce problème (le troisième des quatre problèmes listés en fin de la sous-section 3.1), nous proposons le composant générique « Convertisseur » qui utilise quatre de composant de base d'un SED (deux processeurs fictifs et deux stocks fictifs (figure 24)). Cette primitive permet d'alimenter un processus continu par un item continu ayant le poids requis, obtenu à partir d'items continus de poids variables, prélevés dans un stock capacitaire alimenté par un ou plusieurs processus continus.

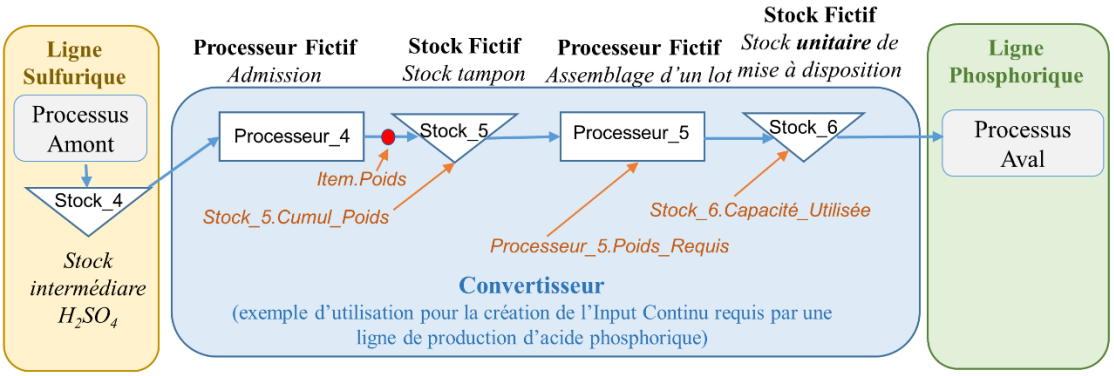

Figure 24 : Composant générique « Convertisseur »

- Le Stock_6 est utilisé pour recevoir l'item continu ayant le poids requis. Ce stock, qui possède le label Stock_6.Capacité_Utilisée, a une capacité unitaire pour assurer une conversion au fur et à mesure des besoins de la production.
- Le Stock_5 est utilisé pour recevoir les items qui vont permettre la création d'un item ayant le poids requis. Ce stock possède les labels Stock_5.Cumul_Poids et Stock_5.Nombre_items. À l'arrivée d'un item dans ce stock le programme suivant est exécuté :

  Stock_5.Cumul_Poids ← Stock_5.Cumul_Poids+ Item.Poids

- Le premier processeur fictif (Processeur_4) a pour fonction de déplacer, du stock capacitaire Stock_4, des items continus vers le stock Stock_5, à condition que le Stock_6 soit vide et que, dans le Stock_5, le poids requis par le processus continu aval (consigné dans le label Processeur_5.Poids_requis) ne soit pas dépassé ; ce poids requis est mis à jour dynamiquement, en fonction de l'évolution des productions du processus continu aval. Ces

conditions sont vérifiées par le programme suivant, exécuté avant l'admission par le Processeur_4 :

__Si__ Stock_6.Capacité_Utilisée =1 __Alors__ Bloquer le prélèvement de l'item

__Si__ Stock_5.Cumul_Poids ≥ Processeur_5.Poids_requis __Alors__ Bloquer le prélèvement de l'item

- Un second processeur fictif, Processeur_5, est utilisé pour prélever et fusionner tous les items séjournant dans Stock_5 à condition que le Stock_6 soit vide et que le cumul du poids des items dans le stock Stock_5 (valeur du label Stock_5.Cumul_Poids) soit supérieure à la valeur du label Processeur_5.Poids_Requis. Ces conditions sont vérifiées par le programme suivant, exécuté avant l'admission par le Processeur_5 ; ce programme utilise un paramètre k pour gérer l'utilisation de ce processeur :

k ← 0

__Si__ Stock_6.Capacité_Utilisée =1 alors k ← 1

__Si__ Stock_5.Cumul_Poids < Processeur_5.Poids_requis alors k ← 1

__Si__ k=1 __alors__ Bloquer le prélèvement des items

__Sinon__ :

Prélever tous les items du Stock_5 et les fusionner en un item unique avec

Item.Poids ← Stock_5.Cumul_Poids -Processeur_5.Poids_requis

Mettre à jour la capacité utilisée du Stock_5 :

Stock_5.Cumul_Poids ←Stock_5.Cumul_Poids - Processeur_5.Poids_requis

- Le Processeur_5 émet ensuite deux items identiques, le premier vers le Stock_5 et le second, vers le Stock_6. À l'entrée de l'item continu dans Stock_6, son poids est corrigé par le programme suivant :

Item.Poids← Processeur_5.Poids_requis

Les primitives génériques « processus continu » et « convertisseur » assurent une modélisation réussie, par le biais de la SED, de toute configuration de processus liés en coproduction.

3.3.4 Modélisation du composant générique « vanne »

Ce composant générique constitue la solution proposée au quatrième des problèmes posés par la modélisation de processus continus par la SED. Le transfert des items continus, d'un stock à un autre, implique le recours à une vanne mettant en œuvre la décision de transférer, à une date donnée, une certaine quantité de produit, avec un certain débit. Le composant générique « Vanne » (figure 25) fait intervenir le composant générique « convertisseur », un point d'entrée, un processeur (Processeur_7), un processeur fictif (Processeur_6) et un stock fictif (Stock_8).

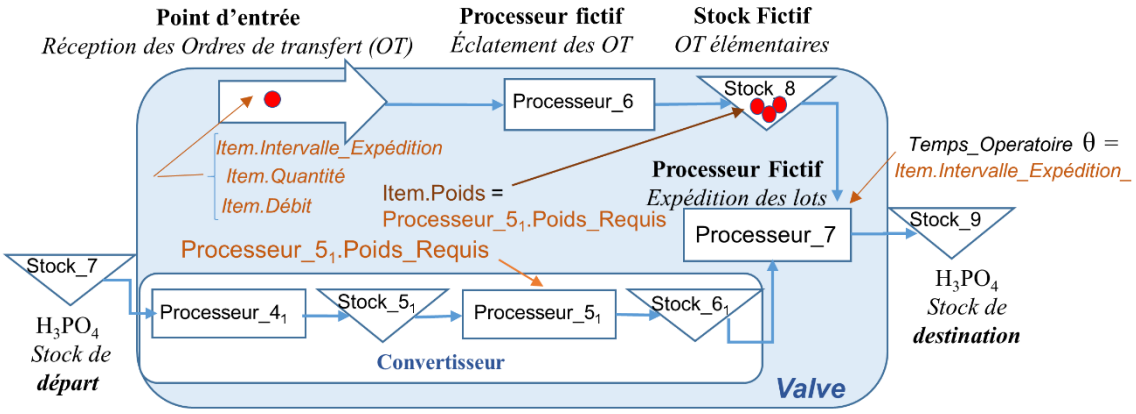

Figure 25 :composant génétrique « Vanne »

- Le Point d'entrée est utilisé pour recevoir les items correspondant à des ordres de transfert d'un stock (Stock_7) à un autre stock (Stock_9). Les labels Item.Quantité et Item.Débit, sont lus dans un tableau du simulateur et affectés à l'item entrant.
- Le processeur fictif, Processeur_6, est opérationnel seulement à la date de début d'un transfert. Il fractionne l'item entrant (ordre de transfert) en *m* items à la sortie, correspondant à autant d'ordres de transfert élémentaires. Ce nombre *m* est calculé lors de l'admission d'un item, par l'exécution du programme suivant :

  m ← Rounded[Item.Quantité/Item.Débit]

  Le label Item.Poids de l'item sortant et celui, Processeur_5$_1$.Poids_Requis, utilisé par le convertisseur pour préparer les items continus requis, sont définis par le programme :

  Item.Poids ← Item.Quantité/m

  Processeur_5.Poids_Requis← Item.Quantité/m

- Le processeur_7 fusionne l'item prélevé du stock_8 (information) avec celui prélevé du Stock_61 (matière). Son temps opératoire θ prend la valeur de Item_Intervalle_Expédition.

3.3.5 Modélisation de pilotage d'un processus continu par des ordres de fabrication

Nous décrivons maintenant la démarche à utiliser pour résoudre ce problème de pilotage à flux tirés. Elle mobilise les trois premiers composants génériques et nous l'illustrerons avec la production d'une séquence d'ordres de fabrication assignés à l'une des lignes de production d'engrais, ces ordres de fabrication portant sur des engrais de composition différente. Ces ordres de fabrication sont à exécuter au plus tôt et le changement de formule d'engrais induit un temps de lancement significatif, dépendant de la séquence d'engrais. Dans notre étude de cas, le *reporting* se fait sur une base horaire. Les temps de production des ordres de fabrication étant de plusieurs heures, on éclate un ordre de fabrication en plusieurs ordres de fabrication élémentaires correspondant à une heure de production sur la ligne considérée, ce qui définit le poids des items continus d'engrais et, par voie de conséquence, ceux des inputs. Cette modélisation de la production à flux tirés d'une ligne d'engrais est représentée dans la figure 26.

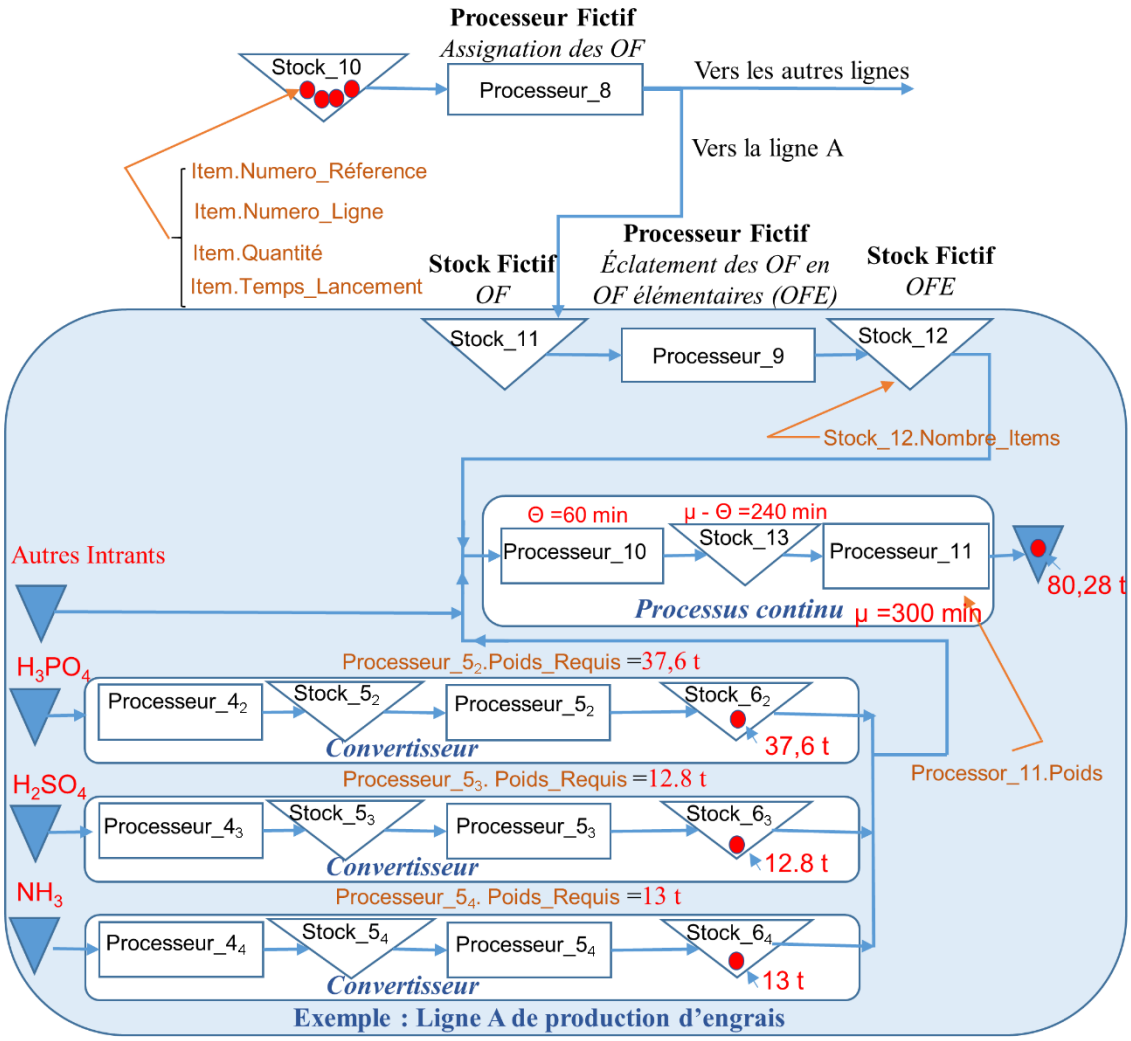

Figure 26 : Modélisation d'une ligne de production à flux tirés (utilisant 3 convertisseurs)

- Le Stock_10 est initialisé en début de simulation à partir d'une liste d'ordres de fabrication à exécuter (un item par ordre de fabrication). Chaque ordre de fabrication est caractérisé par la référence à produire (Item.Numéro_Reference) et un label contenant le numéro de la ligne pour laquelle elle est affectée (Item.Numéro_ligne), la quantité à fabriquer (Item.Quantité) et le temps de lancement (Item.Temps_Lancement). Les commandes sont traitées en premier arrivé premier servi (FIFO).

- Le processeur fictif, Processeur_8, assure le routage des ordres de fabrication sur les lignes de production suivant le label Item.Numero_Ligne. Les ordres de fabrication impliquant la ligne de production étudiée ici sont reçus dans le Stock_11.
- Le processeur fictif Processeur_9 éclate ensuite chaque ordre de fabrication en *n* ordres de fabrication élémentaires, ce nombre étant calculé comme le quotient de la quantité à produire (par exemple 11 640 t), par le débit de production de la ligne (par exemple

1,347 t/minute), multiplié par l'intervalle d'admission θ (par exemple 60 minutes). Dans notre exemple, l'ordre de fabrication de 11 640 t est éclaté en n = 145 ordres de fabrication élémentaires caractérisés par un poids d'engrais à produire de 80,28 t. Le Processeur_9 ne peut accepter un nouveau item que si le stock_12 est vide (stock_12.Nombre_item = 0).

- Le processus continu, piloté par le Processeur_10, prélève ensuite, à la cadence d'admission retenue pour ce processus (θ = 60 min), un ordre de fabrication élémentaire (information) et les items (matière) correspondants aux inputs nécessaires (acides…) et les fusionne en un item continu unique de 80,28 t, émis toutes les 60 min. Dans cet exemple, le poids des composants utilisés est de 37,6 t pour l'acide phosphorique, 54,13 t pour l'ammoniac et 12,8 t, pour l'acide sulfurique.

Nous ne tenons pas en compte ici de la mise à jour du temps d'admission θ et du temps de traitement μ qui pourraient dépendre de la gamme en cours et qui peuvent être déduits du numéro de la ligne et de l'identifiant d'engrais. Les nomenclatures et les gammes de deux commandes successives sur une même ligne changeant nécessairement, une actualisation des poids des inputs, à préparer par les convertisseurs et le poids des lots de l'ordre de fabrication élémentaire, est réalisée juste après l'admission d'un nouvel item dans le Processeur_9, en exécutant du programme suivant :

Lire *Item.Numero_Réference*

Si la référence à produire est différente de la référence en cours **Alors mettre à jour** : *Processeur_5$_2$.Poids_Requis,*

Processeur_5$_3$. Poids_Requis,

Processeur_5$_4$. Poids_Requis

Processor_11.Output_Weight

Dans la sous-section suivante nous décrivons le simulateur que nous avons développé moyennant ces composants génériques et nous présentons son apport managérial.

Sur le plan pratique, les primitives génériques que nous proposons, sont faciles à implémenter dans les logiciels utilisant la simulation à événements discrets. Cette solution, testée avec succès sur un problème de très grande taille (3.4), peut être considérée comme une réponse technique à un problème qui se pose dans de nombreuses CL combinant des processus continus et discrets. Nous considérons que cette réponse n'est pas uniquement technique, dans la mesure où elle combine, de manière originale, des primitives de simulation existantes pour résoudre de manière rigoureuse les 4 problèmes méthodologiques pointés dans l'utilisation de

la SED pour modéliser / simuler des processus continus pour analyser les conséquences de décisions opérationnelles et tactiques.

3.4 *Simulateur de la production de Jorf*

Cette section a pour objectif de présenter le simulateur de pilotage opérationnel que nous avons développé. On commencera par examiner rapidement l'usage des composants génériques dans la modélisation, avant de présenter l'apport managérial du simulateur.

3.4.1 Développement et caractéristiques du simulateur

L'utilisation des composants génériques dans la modélisation du système productif décrit en figure 14, par un simulateur de type SED (en l'occurrence, Simul8) est résumée dans le tableau 6.

Tableau 6 : Nombre de composants génériques utilisés dans la modélisation

Continuous process	Capacity Stock	Converter	Valve	Continuous pull production line
80	74	151	51	13

Une approche de modélisation hiérarchique a été utilisée. Par exemple, les composants génériques utilisés pour décrire une ligne de production d'engrais (voir figure 26) ont été assemblés pour créer un super-composant « ligne d'engrais » qui a été ensuite dupliqué pour créer les usines d'engrais. Les valeurs des labels utilisés par les composants génériques sont saisies dans un classeur Excel, préalablement à la simulation, et importé dans des tableaux de données du SED en début de simulation. Cette approche offre toute la souplesse nécessaire pour traiter des instances de problème variant au cours du temps mais aussi pour adapter facilement le modèle de simulation aux changements de configuration du complexe industriel étudié.

L'intervalle de temps retenu pour établir les rapports d'évolution des productions et des stocks est de 60 min, cet intervalle permettant de repérer avec suffisamment de précision les incidents de production susceptibles d'intervenir. En conséquence, l'intervalle d'admission θ d'un processus continu est $\theta = \mu$ si $\mu < \theta$ et $\theta = 60$ min dans le cas contraire. On peut ajouter que le remplacement de l'intervalle de 60 min par un intervalle 2 ou 3 fois plus faible n'allonge pas de manière importante la simulation, sur l'horizon de simulation retenu de 2 ou 3 semaines (de l'ordre de quelques minutes).

3.4.2 Apport managérial du simulateur

La production des acides à Jorf est poussée par l'arrivée de la pulpe du phosphate depuis la mine tandis que la production des engrais est tirée par un carnet de commandes à satisfaire. Les stocks en aval des lignes d'acide sont suffisamment importants pour assurer le découplage entre les flux poussés et les flux tirés. Très peu des 80 lignes de production de Jorf sont identiques (figure 14), d'où une grande variété de débits de production et de nomenclatures. Une interconnexion forte des différentes entités de production permet des échanges d'acide contrôlés par des vannes qui conduisent à une certaine interdépendance.

Nous ne nous intéressons pas au niveau contrôle des transformations chimiques de la production, à savoir les paramètres de la température, de la pression, des catalyseurs des réactions chimiques, etc. Notre objectif est le niveau opérationnel assuré par les gestionnaires. En effet, les managers des entités à Jorf disposent d'une certaine autonomie de gestion sur des décisions opérationnelles relatives à l'ouverture des lignes, leurs débits (susceptibles de varier dans une certaine plage pour accélérer ou ralentir la production), leurs programmes de maintenance préventive, l'ordonnancement des ateliers de fabrication des engrais, le programme d'échanges d'acides entre les 8 entités juridiquement distinctes. Les objectifs à atteindre, au niveau du site de Jorf, sont définis lors de la planification tactique assurée par le *Business Steering* moyennant le modèle d'optimisation intégré (chapitre 2). Cependant, ces objectifs sont rarement atteints par les opérationnels. Il y a souvent un problème de désalignement entre la planification tactique et les décisions opérationnelles. Ce désalignement est dû au fait que les décisions tactiques et opérationnelles sont prises à deux niveaux hiérarchiques différents (différentes perceptions d'objectifs (local versus global) et risque d'asymétrie d'information concernant l'état réel du système productif) et au fait que les outils d'aide à la décision à ces deux niveaux décisionnels adoptent des représentations différentes du système productif.

Pour assurer l'alignement des décisions opérationnelles avec les objectifs tactiques, le comité de pilotage (entité SC-Jorf) organise la Tour de Contrôle (chapitre 2) pour veiller sur l'examen de l'impact de l'ensemble de ces décisions opérationnelles proposées localement, pour en évaluer la compatibilité globale et, si nécessaire, en modifier certaines pour atteindre les objectifs et pour éviter des arrêts de production coûteux provoqués par certaines incohérences. Cependant, l'approche actuellement utilisée à Jorf, fondée sur l'usage d'un tableur, ne s'avère pas toujours pertinente, en raison des interdépendances décisionnelles dans

le temps et dans l'espace, difficiles à prendre en compte par un tableur. Dans ce contexte, nous avons développé un simulateur de la production ayant pour objectif l'amélioration du processus de la prise de décisions opérationnelles tout en renforçant son alignement avec la planification tactique. Pour ce faire, le simulateur a deux usages : le premier est dans une logique descendante (top-down) tandis que le deuxième s'inscrit dans une logique ascendante (down-up).

3.4.2.1 Usage descendant

La première utilisation du modèle de simulation s'inscrit dans une logique descendante. La sortie du modèle d'optimisation tactique du *Business Steering*, après avoir l'éclaté dans le temps (maille journalière/horaire) et dans l'espace (niveau ligne de production), constitue une entrée du modèle de la simulation. Le modèle part de l'état initial du système et de l'ensemble de décisions opérationnelles prises pendant la Tour de Contrôle. En réponse à ces décisions, le modèle reproduit le fonctionnement du système productif. Ceci est traduit par la génération de l'évolution horaire de la production par ligne et de l'évolution horaire des niveaux de stocks. Pour cet usage le modèle considère un horizon allant jusqu'à 15 jours et anticipe les éventuelles incohérences décisionnelles dues, principalement, à des saturations de stocks en aval ou à des ruptures de stocks en amont.

En cas d'anticipation de problèmes, la simulation identifie les causes des problèmes et, en faisant appel à l'expertise des gens sur le terrain, permet de restaurer la cohérence décisionnelle, en permettant de tester rapidement d'autres scénarios en modifiant ou en complétant les décisions initialement prévues. Par exemple, une saturation du stock situé en aval de l'atelier de production d'acide phosphorique 29 peut être évitée : par une diminution du débit de production de certaines lignes de production de cet acide, par une modification du programme de la maintenance préventive, par un délestage d'acide vers les stocks d'acide phosphorique 29 d'autres entités ou par une modification du programme de production des engrais (la consommation de cet acide variant fortement d'un engrais à un autre).

3.4.2.1.1 Utilisation du modèle de simulation

Pour l'exploitation du simulateur par les opérationnels de l'OCP, une interface informatique a été développée par des étudiants de l'EMINES dans le cadre d'un projet informatique. Elle est composée de deux volets : le premier volet concerne la saisie des informations inputs du simulateur, le deuxième volet concerne l'affichage et le diagnostic des résultats de la simulation.

3.4.2.1.2 Interface de saisie des données du scénario à étudier

La saisie des informations se fait par entité. Pour chaque entité, l'utilisateur remplie les informations concernant les lignes de production (la disponibilité, le régime de marche et le programme de la maintenance préventive de chaque ligne), l'ordonnancement des lignes de production des engrais, le niveau initial des stocks et le programme des échanges (pour l'entité en question quel est le programme des transferts d'acides qu'elle va recevoir de chacune des autres entités). La figure 27 est une capture de l'interface input à l'étape de la saisie des informations concernant les lignes de productions de l'entité MP34.

Figure 27 : capture de l'interface de la saisie des inputs du simulateur

3.4.2.1.3 Interface de visualisation des résultats de la simulation

Les résultats de la simulation concernent l'évolution horaire de la production des lignes de production et celle des niveaux des stocks. Les seuils de saturation et de rupture sont des paramètres déterminés par l'utilisateur. Les mêmes outputs, concernant la situation des lignes et celle des stocks, sont générés pour toutes les entités.

Pour un scénario de sept jours nous présentons ci-dessous des captures des résultats obtenus. La figure 28 représente l'évolution du stock de l'acide sulfurique de l'entité MP34. Les lignes jaune et rouge définissent les seuils de rupture et de saturation respectivement. La courbe bleue représente l'évolution du stock. La même convention est adoptée pour tous les stocks de toutes les entités.

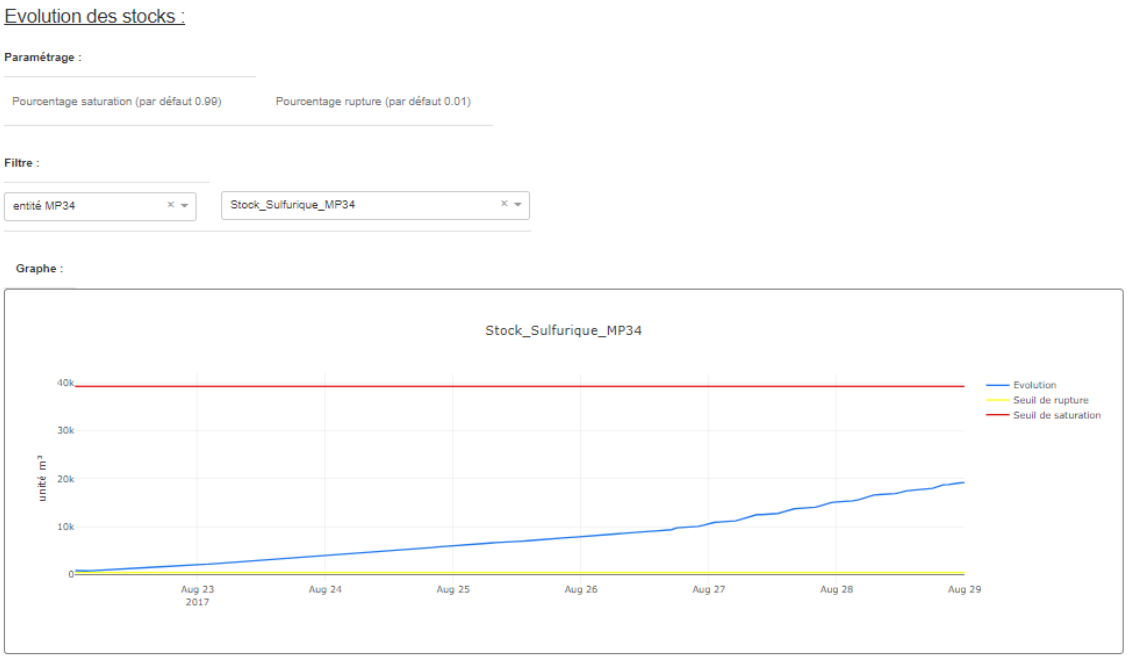

Figure 28 : évolution du stock de l'acide sulfurique de l'entité MP34 (output du simulateur)

La figure 29 montre le statut des lignes ouvertes à l'entité MP34. Le vert montre que la ligne de production est en production normale suivant la cadence définie par les opérationnels, le jaune signifie une plage de maintenance préventive et le rouge signifie un arrêt de production non programmé.

Figure 29 : état des lignes de production ouvertes de l'entité MP34 (output du simulateur)

La figure 30 zoome sur la partie concernée par des arrêts de production. Il s'agit de deux lignes de production d'acide phosphorique 29%. En considérant un environnement certain, ces

arrêts non programmés sont forcément dus soit à la rupture du stock de l'un des inputs en amont soit à la saturation du stock de l'un des outputs en aval. Pour vérifier l'utilisateur a la possibilité d'afficher l'évolution des stocks amont et aval de ces lignes sur la période concernée (figure 31). Les courbes à gauche concernent les stocks des inputs (acide sulfurique et la pulpe de phosphate) : dans ce scénario il n'y a aucune rupture du stock. Par contre la courbe de l'évolution de l'acide phosphorique 29% en aval atteint son seuil de saturation. Ceci signifie que les arrêts de production sont engendrés par le débordement du stock d'acide 29% en aval.

Figure 30 : zoom sur des arrêts de production non programmés sur des lignes d'acide phosphorique 29% de l'entité MP34

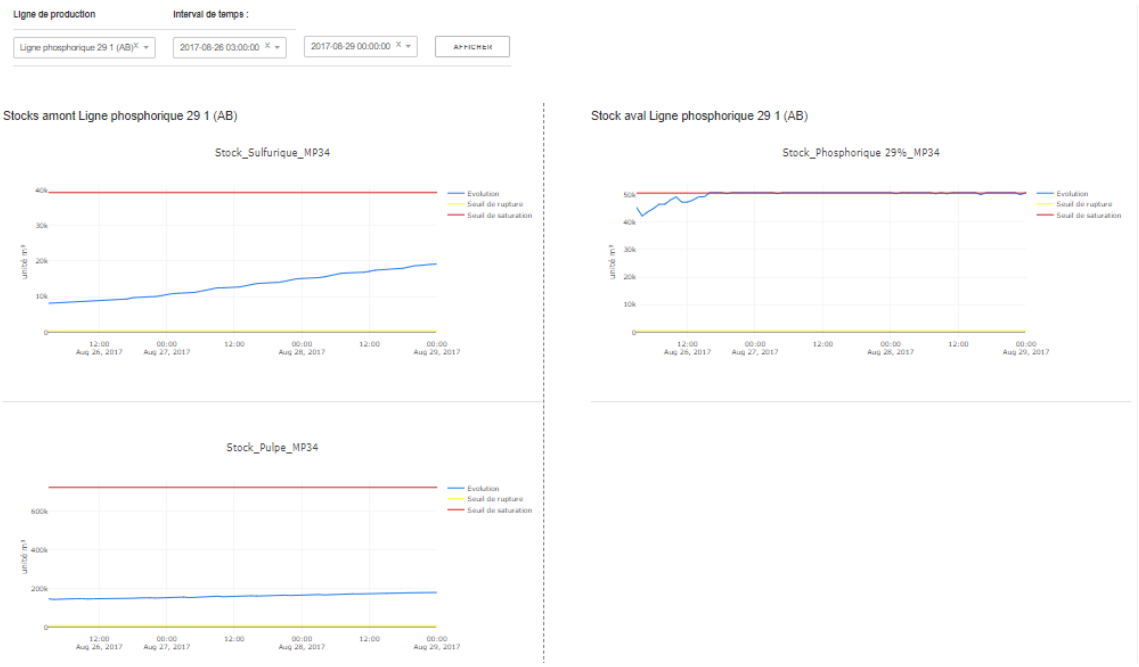

Figure 31 : état des stocks amont et aval des lignes de production ayant subi des arrêts de production non programmés

Les tests que nous avons réalisés avec des simulations de cette CL hybride fondées sur notre approche, ont montré qu'il est possible de s'assurer, a priori, de la cohérence des décisions prises, en l'absence d'incidents. Cette cohérence décisionnelle *ex ante* peut, bien sûr, être ensuite invalidée par des événements inattendus (ex. pannes).

Nous précisons que l'objectif du simulateur n'est pas de proposer tout un scénario mais de vérifier la cohérence entre un ensemble de décisions prises par les managers. En cas d'incohérences, le modèle en détecte les causes et les managers, en se basant sur leur expertise, font des redressements de scénarios jusqu'à la stabilisation du fonctionnement du système productif.

3.4.2.1.4 Validation de la simulation

Le processus de validation de ce premier usage du simulateur a été fait par étapes via plusieurs réunions que nous avons eues avec le comité *Business Steering*. Les éléments de validation portaient surtout sur la granularité du modèle, le périmètre physique considéré et le temps d'exécution. Nous avons validé les caractéristiques du modèle limité à la plus grande entité (MP34) avant de faire l'extension du modèle à toutes les autres entités (*Jorf Fertilizer Companies* et joint-ventures). L'ensemble des réunions faites ont été listées dans la partie 4.8.1 du chapitre 2.

3.4.2.1.5 Expérimentation de la simulation

Au moment où cette expérimentation a été effectuée, notre modèle se limitait à l'entité MP34. À plusieurs reprises, nous avons comparé, les résultats de notre simulation avec ceux obtenus par l'équipe de pilotage de ce site, en partant des mêmes données (même état initial du système productif et même ensemble de décisions opérationnelles). La simulation a permis d'anticiper des incidents non détectés par l'actuelle démarche fondée sur Excel. Le plus souvent, ces incidents primaires, induits par des incohérences décisionnelles, correspondaient à des arrêts de production provoqués par une saturation de stock en aval, avec des effets induits en amont et en aval. La détection de ces incidents et de leur propagation est difficilement détectable autrement que par la simulation et leur non-détection conduisait à des décisions correctives coûteuses.

3.4.2.2 Usage ascendant

La deuxième utilisation du modèle de simulation s'inscrit dans une logique ascendante (la sortie du modèle de simulation est une entrée du modèle d'optimisation tactique). Non encore testée, cette deuxième utilisation potentielle consiste à calculer la capacité maximale possible de chaque nœud du système productif sur un horizon d'un mois. Dans ces conditions, la capacité de production possible d'un nœud est conditionnée par les capacités de production en amont et en aval (saturation des stocks). En effet, parce que l'OCP veille sur l'alignement de ses opérations avec la satisfaction de ses clients, il fait de la coopération et de la coordination des maillons de sa CL un de ses leviers. Le modèle part de l'état actuel du système productif concernant les lignes de production disponibles, leurs vitesses possibles, le niveau des stocks de produits, le programme mensuel de la maintenance préventive et le carnet de commandes mensuel des engrais. Dans ce cas, les vannes contrôlant les transferts d'acides entre entités sont désactivées dans le modèle. C'est-à-dire que les flux de matières circulent spontanément dans le système et sont tirés par la satisfaction de la demande des clients. De cette façon, le modèle permet une estimation relativement fiable de la capacité maximale disponible pour le premier mois de l'horizon de planification (trimestre) à considérer dans le modèle d'optimisation tactique de l'entité *Business Steering*. On en tire aussi les opérations d'échange nécessaires.

Pour les deux derniers mois du trimestre, on peut considérer la capacité maximale puisqu'on n'a pas encore les détails de leur capacité. La capacité est calculée chaque mois par

le modèle de simulation et utilisée comme entrée dans le modèle tactique pour le trimestre à venir. Cette approche nécessite l'exécution du modèle tactique de l'OCP en mode horizon glissant (rolling horizon). Les capacités des deux derniers mois sont mises à jour au début de chaque mois. Cette utilisation du modèle mathématique de l'OCP, suivant la logique de l'horizon glissant, permet de réduire l'effet de l'incertitude en utilisant des informations plus fiables, fournies par le modèle de simulation, relatives au système productif et à la demande.

4. SYSTÈME INTERACTIF D'AIDE À LA DÉCISION D'ORDONNANCEMENT

Cette section porte sur le problème d'ordonnancement d'un ensemble de lignes de production d'engrais à partir d'une date de début, sans aucune interférence avec les commandes déjà en cours de production à cette date (Azzamouri *et al.,* 2019a). Chaque ordre de fabrication est caractérisé par un engrais à fabriquer, un volume et une fenêtre de temps dans laquelle la production doit être achevée ; la production d'engrais est principalement tirée par le chargement des navires, les ordres de fabrication sont définis en fonction du stock disponible d'un engrais donné et des dates d'arrivée prévues des navires, ce qui définit les dates de livraisons au plus tard; les dates au plus tôt sont plus difficiles à définir car elles dépendent de l'espace disponible dans les différents hangars de stockage d'engrais, dépendant à son tour de la variété de produits en stock. L'ordonnancement doit tenir compte des arrêts de production requis par les opérations de maintenance préventive, et ces arrêts ne doivent pas avoir d'incidence sur le temps de production des ordres de fabrication en cours. Le temps de traitement des ordres de fabrication varie d'une ligne à l'autre, notamment en raison de leurs caractéristiques techniques qui sont différentes et de la possibilité d'ajustement des cadences de production. L'ordonnancement doit également tenir compte d'un temps de nettoyage important entre deux commandes de qualités différentes sur la même ligne. Ce temps de préparation (lancement) dépend de la ligne elle-même et de la production précédente.

L'ensemble des lignes d'engrais des différentes entités de Jorf font un total de 13 lignes de production parallèles hétérogènes. Rappelons qu'environ 50 références d'engrais y sont produites, dont 19 références sont produites sur des lignes spécifiques ce qui génère l'environ de 115 gammes de production. Une analyse de la nomenclature des engrais a révélé une forte dispersion des taux de consommation des inputs (par exemple, la production d'une tonne du produit "MAP (Clair 11-54)" nécessite 14 fois plus d'acide phosphorique pur que la production

d’une tonne de produit “NPk (14-18-18-9,5S-1B2O3)”. Cela signifie que les ordonnancements ont un impact significatif sur les taux de consommation des acides et des autres matières premières et doivent donc éviter d'épuiser les stocks de ces ressources critiques.

La production d'engrais est transportée par des convoyeurs. La capacité de chaque espace de stockage varie en fonction du nombre d'engrais stockés, car il y a risque de contamination par mélange ce qui conduit à des spécifications non respectées et donc des engrais non utilisables. L'affectation des zones de stockage aux familles de produits change au fil du temps et plusieurs zones peuvent être consacrées à une seule famille. Les engrais stockés sont déplacés par des convoyeurs pour être chargés sur les navires en fonction des commandes, dont la plupart sont limitées à un seul engrais. Le chargement prend quelques jours qui peuvent dépendre des conditions météorologiques. La capacité de stockage résiduelle pour un engrais donné varie donc dans le temps. L’ordonnancement choisi déterminera l'accumulation des stocks d'engrais et ne sera pas possible si l'accumulation des stocks ne correspond pas à la capacité de stockage.

L’ordonnancement proposé a des conséquences immédiates en amont et en aval qui peuvent le rendre irréalisable en raison de problèmes de désamorçage (en amont) et/ou de saturation des stocks d'engrais (en aval), ce qui place le problème d’ordonnancement centralisé des engrais dans un cadre plus large orienté CL, compte tenu de la relative autonomie décisionnelle des entités juridiques.

Une revue de littérature (Azzamouri *et al.*, 2019a) est présentée dans la sous-section 4.1. Elle analyse, sur la base d’une grille détaillée, un ensemble d’articles portant sur cette classe de problème d’ordonnancement, et décrit le cadre conceptuel des systèmes d’aide à la décision (DSS). La sous-section 4.2 décrit le problème structuré encapsulé dans le DSS proposé ainsi que les fondements de l’architecture du DSS. La sous-section 4.3 illustre l’utilisation de ce DSS.

4.1 *Revue de littérature*

Nous commençons par montrer l’originalité du modèle linéaire, que nous proposons pour résoudre le problème d’ordonnancement introduit, avant de positionner, par rapport à la littérature des DSS (d’un point de vue technique), le système d’aide à la décision encapsulant le modèle linéaire d’optimisation.

4.1.1 Problème d'ordonnancement en RO

Malgré le fait que le processus d'engrais traite des fluides et des granulés, il s'agit d'un processus discret car le temps de traitement d'un ordre de fabrication sur une ligne donnée est déterminé par la ligne elle-même et par l'engrais produit précédemment (nécessitant un temps de lancement). Notez que la prise en considération des étapes élémentaires d'une ligne production n'est pas pertinente dans le cas de l'ordonnancement car la production est implicitement définie à la fin de la ligne. Chaque ligne peut être considérée comme un processeur autonome (section 2) et l'ensemble des processeurs constituent un groupe hétérogène puisque les lignes de production ont des performances différentes. Le problème d'ordonnancement consiste à affecter les ordres de fabrication aux lignes de production et de faire le séquencement des ordres de fabrication affectés à chaque ligne de production tout en respectant toutes les contraintes listées précédemment.

Pour positionner ce travail, 60 articles, portant sur l'ordonnancement des ordres de fabrication sur des processeurs hétérogènes, publiés dans de bonnes revues scientifiques ont été analysés. L'analyse est fondée sur 5 dimensions expliquées ci-dessous. La synthèse de cette analyse est présentée dans le tableau 7 dont la dernière ligne montre les caractéristiques retenues dans l'approche que nous proposons.

- ***Caractéristiques du processeur***. Le système productif contient des processeurs parallèles. Ces derniers peuvent être identiques, si tout ordre de fabrication implique le même temps de traitement sur n'importe quel processeur, et hétérogènes dans le cas contraire. La *disponibilité* des processeurs peut être permanente ou non (maintenance préventive…) et au début de l'échéancier certains processeurs peuvent ne pas être disponibles (commandes encours de traitement).
- ***Caractéristiques des ordres de fabrication*** : tous les ordres de fabrication peuvent être disponibles pour être lancés au début de l'échéancier d'ordonnancement ou pas (arrivée progressive). Dans les deux cas, les caractéristiques des ordres de fabrication sont connues. Des contraintes de fenêtre de temps peuvent ou pas être exigées. La préemption peut être autorisée ou pas. Certains articles stipulent un fractionnement automatique des quantités des ordres de fabrication. Les conséquences de la solution, sur l'amont et sur l'aval de la CL, peuvent impliquer l'introduction des contraintes additionnelles dans la définition du problème.

- ***Caractéristiques conjointes aux ordres de fabrication et au processeur*** : l'hétérogénéité implique des temps de traitement différents et l'impossibilité, pour certains processeurs, de traiter certains ordres de fabrication. Des temps de lancement, dans le cas échéant, peuvent dépendre de la séquence et/ou du processeur.
- ***Critère d'optimisation*** : peu d'articles, traitant de l'ordonnancement, adoptent un critère économique ; la majorité considère l'efficacité (ex. makespan). La liste des critères d'optimisation utilisés dans les articles analysés est fournie dans le tableau 8.
- ***Objectif de l'article***. Chaque article se concentre sur un objectif spécifique. Nous classons les objectifs en trois catégories : *orienté-résolution* (ex. nouvel algorithme pour résoudre une classe spécifique de problèmes, analyse des limites d'un algorithme existant) ; *orienté-modèle* (nouvelle formulation d'un problème compliqué, des fois précédé d'une étude de cas ou suivie d'une petite étude de cas académique pour illustrer la formalisation du problème) ; et enfin, une catégorie non représentée dans les articles analysés : *orientée-description*, visant à expliquer des situations complexes de la vie réelle.

Partant de cette revue de littérature, l'approche que nous proposons, fondée sur le modèle mathématique décrit dans (Giard *et al.*, 2015, 2016), considère une combinaison de plusieurs éléments qui n'a pas été traitée jusqu'à présent dans les autres articles d'ordonnancement analysés. Ce constat est illustré par la dernière ligne du tableau 7 résumant les éléments considérés dans cette approche par rapport aux éléments énumérés dans la revue.

Le modèle que nous proposons traite l'ordonnancement des ordres de fabrication des engrais sujet à un confinement strict des ordres de fabrication produits, dans des lignes hétérogènes parallèles, avec des routages, nomenclature et lancements dépendant de la ligne et de la formule d'engrais et en considérant des fenêtres de dates de livraison. Les ordres de fabrication sont bien définis avant le problème d'ordonnancement, ainsi la grille d'analyse exclut les articles portant sur le dimensionnement des lots. Le modèle considère un programme de maintenance préétabli. La recherche de la solution optimale est fondée sur la minimisation des coûts de production plus des coûts de lancement.

Tableau 7 : grille d'analyse des articles des problèmes d'ordonnancement

Numéro de l'article	Auteur(s)	Année	Objectif			Caractéristiques des machines			Caractéristiques des ordres de fabrication							Caractéristiques conjointes des ordres de fabrication et des machines						Critère d'optimisation
			Modélisation / Formalisation de problème	Algorithme de résolution spécifique	Utilisation de méthodes de résolution générales	Typologie des machines parallèles Identiques (I), Hétérogènes (H)	Niveau de disponibilité des machines parallèles : Total au début de l'ordonnancement	Niveau de disponibilité des machines parallèles : Prise en compte des arrêts des machines	Possibilité de retarder l'arrivée de certains ordres de fabrication	Dates de livraison : Non prises en compte	Dates de livraison : Prises en compte : Date de fin	Dates de livraison : Prises en compte : fenêtres de temps	Prise en compte de la consommation des inputs dans la modélisation	Prise en compte des contraintes des stocks des outputs	Prise en compte de la priorité des ordres de fabrication	Préemption	Temps de production dépendant des machines	Temps de lancement : Nul	Temps de lancement : Dépendant des machines	Temps de lancement : Dépendant de la séquence	Possibilité de traiter toute commande sur toute machine	
1	Adamopoulos and Pappis	1998		X		H	X	X			X							X	X			X	C10,C12
2	Afzalirad and Razaeian	2016	X	X		H	X	X	X		X						X	X		X	X		C2
3	Anghinolfi and Paolucci	2007		X		I	X	X			X							X		X	X	X	C6
4	Behnamian et al.	2010		X		I		X				X									X	X	C10
5	Berrichi and Yalaoui	2013	X			I		X			X											X	C6
6	Cao et al.	2005	X	X		H	X	X			X					X		X	X			X	C8,C12
7	Chansombata et al.	2018	X			H	X	X			X						X	X		X			C15
8	Chen and Wu	2006	X	X		H	X	X			X							X		X	X		C6
9	Chen Jeng-Fung	2005	X	X		H	X	X		X								X		X	X		C2
10	Chen Jeng-Fung	2010		X		H	X	X			X							X		X	X	X	C6
11	Fang and Lin	2013	X	X		H	X	X			X		X					X	X			X	C8,C12
12	Fanjul-Peyro et al.	2017	X	X		H	X	X		X							X		X			X	C2
13	Fu et al.	2011		X		I				X						X			X			X	C4
14	Gabrel Virginie	1995	X	X		I	X	X	X			X							X				C3
15	Gacias et al.	2010		X		I	X	X	X		X										X	X	C3,C9
16	Gedik et al.	2016	X			I	X			X								X			X	X	C14
17	Guinet A.	1993		X		I	X	X		X											X	X	C1
18	Hashemian et al.	2014	X	X		I				X							X		X			X	C2
19	He et al.	2016		X		I		X		X									X			X	C2
20	Hidri et al.	2008	X	X		I	X	X	X		X								X			X	C2
21	Ivanov et al.	2016	X	X		I	X	X			X						X		X			X	C6
22	Jeong and Kim	2008		X		I	X	X	X		X								X				C10
23	Jiang et al	2017	X	X		H	X			X								X	X				C2
24	Joo and Kim	2015	X	X		H	X	X			X						X	X		X	X		C2
25	Kim et al.	2003			X	H	X	X			X					X					X	X	C8
26	Kim et al.	2002		X		H	X	X			X							X			X	X	C6
27	Lee Chung-Yee	1991	X	X		I		X		X									X				C2
28	Lee et al.	2013b	X	X		H	X	X			X							X		X	X	X	C6
29	Lee Ik Sun	2016	X			I		X			X					X						X	C17
30	Lee et al.	2013a	X	X		H	X				X							X				X	C10
31	Lee and Kim	2015		X		I	X	X			X						X		X			X	C6
32	Lee and Pinedo	1997		X		I	X			X						X			X			X	C8
33	Li and Milne	2014		X		H	X			X								X		X	X		C16
34	Liao et al.	2007		X		I				X									X			X	C2
35	Liao et al.	2005		X		I				X							X		X			X	C2
36	Liao et al.	2017	X	X		I	X	X		X							X	X	X				C2,C13
37	Lin and Ying	2014	X	X		H	X	X		X								X		X	X	X	C2
38	Lin et al.	2011		X		H	X	X			X							X		X	X	X	C6
39	Logendran et al.	2007		X		I	X	X	X		X										X		C8
40	Manupati et al.	2017	X	X		H			X		X									X	X	X	C3,C7
41	Monemi et al.	2015	X	X		H	X	X														X	C5
42	Moon et al.	2013	X	X		H	X	X			X		X					X	X			X	C2,C12
43	Nait Tahar et al.	2006	X	X		I	X	X		X											X	X	C2
44	Obeid et al.	2014	X	X	X	H	X	X		X											X		C2
45	Omar and Shaik	2018	X		X	H	X	X			X		X	X			X	X			X	X	C14
46	Paula et al.	2010	X	X		H	X				X					X		X			X	X	C8
47	Pereira Lopes and de	2007	X	X		H		X	X		X					X		X			X	X	C8
48	Rocha et al.	2008	X	X		H	X	X			X					X		X		X	X	X	C2,C8,C12
49	Rodrigues et al.	2014		X		I	X	X	X			X				X			X			X	C8
50	Sáenz-Alaniset al.	2016		X		H	X	X		X							X				X		C2
51	Schutten and Leussink	1996		X		I	X	X	X		X										X	X	C9
52	Vallada and Ruiz	2011	X	X		H	X	X		X								X		X	X	X	C2
53	Van Hop and	2004	X	X		H	X	X		X											X	X	C12
54	Weng et al.	2001	X	X		H	X	X		X						X		X			X	X	C4
55	Xi and Jang	2012		X		I	X	X	X		X					X					X	X	C8
56	Zeidi and Hosseini	2015	X	X		H					X						X	X			X		C10
57	Zhao et al.	2011		X		I	X	X			X					X					X	X	C4
58	Zhu and Heady	2000	X		X	H	X	X			X							X		X	X	X	C10
59, 60	Giard et al.	2015, 2016	X		X	H	X		X			X	X	X			X	X		X	X		C1,C2,C10, C11,C12

Tableau 8 : liste des critères d'optimisation

Code	Critère d'optimisation
C1	Minimiser les coûts de production
C2	Minimiser la date de fin de production
C3	Minimiser le total des délais de livraison
C4	Minimiser le total des délais de livraison
C5	Minimiser le total des délais des opérations de maintenance
C6	Minimiser le total des retards

Code	Critère d'optimisation
C7	Minimiser le nombre de commandes en retard
C8	Minimiser la somme pondérée des retards de livraison
C9	Minimiser le maximum des retards
C10	Minimiser la somme des coûts/pénalités liés à la précocité et au retard
C11	Minimiser le pic de consommation
C12	La somme pondérée des fonctions objectif de base

Code	Critère d'optimisation
C13	Minimiser les coûts de maintenance
C14	Maximiser le profit
C15	Minimiser les coûts des pénalités de retard et de précocité ; les coûts de de stockage ; les coûts de maintenance préventive ; et les coûts lancements, de production, de transfert et de temps d'arrêt de la production
C16	Minimiser le total des coûts de lancements
C17	minimiser les coûts de programmation, y compris le temps de réalisation, la somme (pondérée) des temps de réalisation, le retard maximum et la somme des retards

Comme la résolution du modèle, intégrant les contraintes de la disponibilité des inputs (ex. acides, matières premières) en amont et de la disponibilité de l'espace dans les hangars de stockage en aval, est difficilement possible en temps compatible avec la prise de décision, compte tenu de sa taille, le DSS proposé est fondé sur une logique de négociation de contraintes avec l'amont et l'aval en vue d'éviter toute rupture du stock en amont ou saturation du stock en aval.

4.1.2 Les fondements du DSS

L'analyse suivante couvre un ensemble d'articles, publiés dans des revues ou des proceedings scientifiques, portant sur des DSS d'ordonnancement. Un générateur de systèmes d'aide à la décision fondé sur l'optimisation, conçu par (Maturana *et al*., 2004) génère automatiquement une base de données, un solveur et une interface en utilisant PowerBuilder. Olteanu (2011) s'intéressant à une usine de production dans l'industrie des biocarburants, propose un système qui optimise les principales activités de la chaîne de valeur des biocarburants et assiste le processus décisionnel de gestion. Il propose un DSS fondé sur la simulation (GeSIM) (Heilala *et al*., 2010) pour une fabrication orientée-client. L'approche vise à intégrer les données, à générer un modèle de simulation et à afficher les résultats, et permet des ajustements interactifs. Krishnaiyer et Chen (2015) proposent un DSS visuel fondé sur le Web pour planifier le processus de livraison de courriers aux clients. Le département de production d'électricité du National Institute of Technology (Sharma *et al*., 2017) propose un DSS pour la planification et l'optimisation de l'exploitation de la centrale hydroélectrique de Sewa (SHEP). Les auteurs des recherches d'IBM décrivent dans Keskinocak *et al*. (2002) un DSS pour l'ordonnancement de la production de papier (A-Team) qui a été déployé dans l'environnement IBM. Freed *et al*. (2007) présentent un système d'aide à la décision en matière d'ordonnancement mis en œuvre

sur VBA appelé "Dispatcher". Krishna *et al*. (2009) s'intéressent à la conception d'un DSS qui intègre l'ordonnancement des machines et la gestion des stocks dans une industrie de fabrication multi-produits.

Pour résoudre le problème d'ordonnancement des lignes de production des engrais, l'approche orientée DSS de la figure 32 a été adoptée :

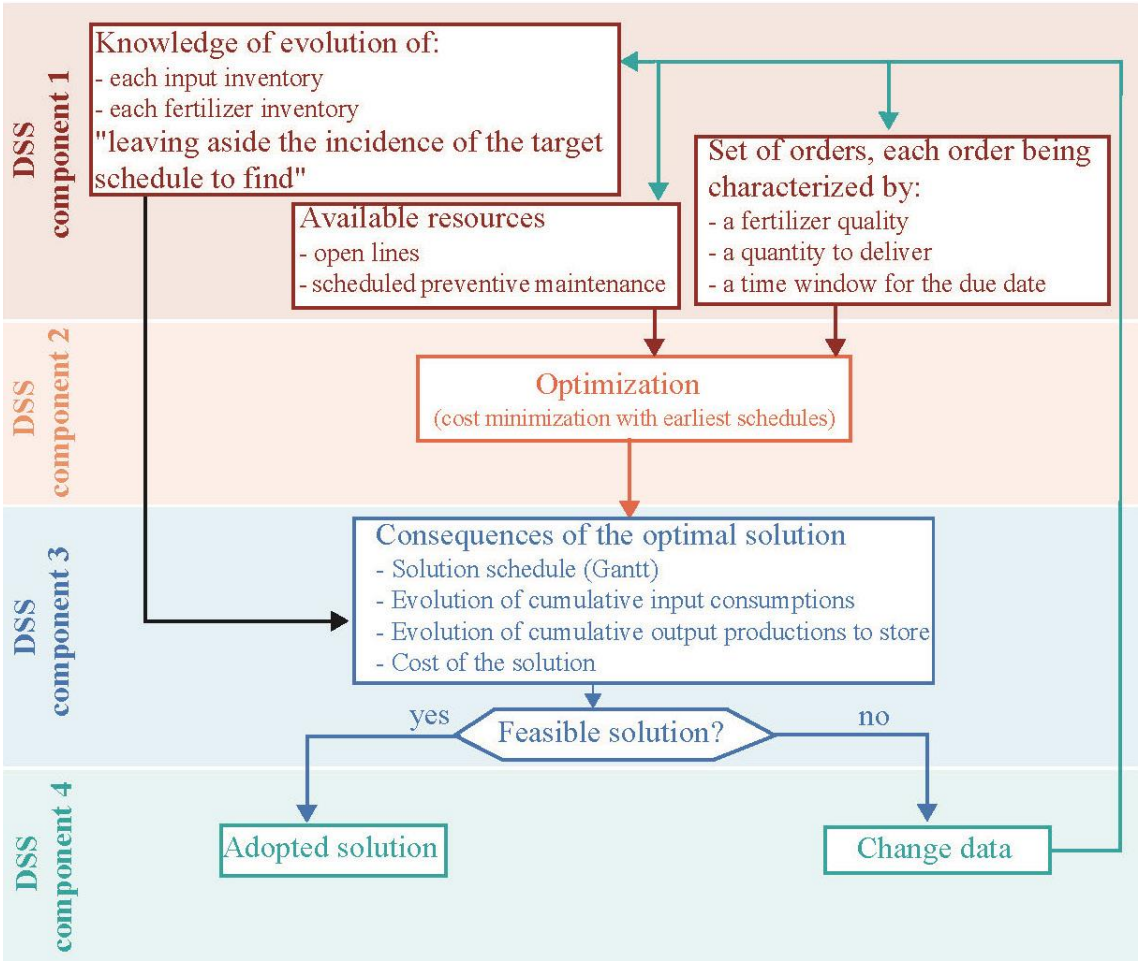

Figure 32 : Fonctionnement du DSS (Azzamouri *et al.*, 2019a)

4.2 *Description du DSS et du modèle d'ordonnancement encapsulé*

Avant de présenter l'architecture du DSS (4.2.2), nous commençons par présenter le modèle d'ordonnancement encapsulé dans le DSS proposé (4.2.1).

4.2.1 Le modèle d'ordonnancement

Deux modèles d'ordonnancement ont été développés et illustrés dans Giard *et al*. (2015, 2016).

Le premier est fondé sur une approche locale et ignore une éventuelle indisponibilité des matières premières (en amont de la CL) ou une éventuelle saturation des stocks d'engrais (en aval de la CL). Le second prend explicitement en compte ces contraintes mais implique une telle explosion combinatoire que nous avons dû retenir le premier modèle dans notre DSS. Cette approche permet à l'utilisateur (le manager) de vérifier si la solution optimale trouvée génère certains problèmes en amont et en aval et, le cas échéant, permet de définir un nouveau problème. Nous décrivons donc le modèle 1 en détail dans cette section, une description mathématique du modèle 2 est présentée dans Giard *et al.* (2015, 2016).

4.2.1.1 Définition des commandes

Un ensemble $\mathscr{E}_0$ de commandes (ordres de fabrication) $(o = 1,...,\mathrm{O})$ doivent être ordonnancées sur un ensemble de L lignes parallèles non identiques $(l = 1..\mathrm{L})$. Les L premiers ordres de fabrication sont en cours de traitement au début de l'échéancier d'ordonnancement, car ils ont été lancés auparavant ; ils définissent l'ensemble $\mathscr{E}_{0'}$. Les $(\mathrm{O}-\mathrm{L})$ ordres de fabrication suivants concernent les nouvelles commandes $(o = \mathrm{L}+1,...,\mathrm{O})$ à programmer ; ils définissent l'ensemble $\mathscr{E}_{0''}$. L commandes fictives sont ajoutées, une pour chaque ligne de production $(o = \mathrm{O}+1,...,\mathrm{O}+\mathrm{L})$, pour qu'elles soient les derniers ordres de fabrication à traiter (Elles correspondent aux tâches fictives dans la formulation classique des problèmes de planification des projets MILP) ; l'ensemble $\mathscr{E}_{\mathrm{O}''}$ $(o = \mathrm{L}+1,...,\mathrm{O}+\mathrm{L})$ est constitué des commandes nouvelles et des commandes fictives. Le tableau 9 présente un exemple de définition des ordres de fabrication :

Tableau 9 : Exemple de définition d'un ensemble des ordres de fabrication (avec L = 2 et O = 7)

		Ordres de fabrication nouveaux à lancer et fictifs $\mathscr{E}_{0''}$						
Ordres de fabrication en cours et à lancer $\mathscr{E}_{\mathrm{O}}$								
Ordres de fabrication en cours $\mathscr{E}_{0'}$		Nouveaux ordres de fabrication $\mathscr{E}_{0''}$					Ordres de fabrication fictifs	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Le paramètre booléen $\beta_{lj} = 1$, si l'engrais de l'ordre de fabrication *j* peut être produit sur la ligne *l*. Le temps total θ_{lij} de production de l'ordre de fabrication *j* sur la ligne *l* juste après *i* est la somme du temps de lancement (pour changer la formule d'engrais) plus le temps de

traitement, calculé comme étant le quotient de la quantité requise par l'ordre de fabrication *j* sur le débit de production de l'engrais sur la ligne *l*.

4.2.1.2 Représentation du temps

Dans la MILP, le temps est défini par des périodes (ex. heures) au lieu des dates. Parce que des périodes d'indisponibilité des lignes sont programmées (principalement de la maintenance préventive), les indices $p\,(p=1,...,\mathrm{P})$ des périodes absolues doivent être remplacées par des indices de périodes relatives π_{lp} dépendant de la ligne *l*. Le booléen $\psi_{lp}=1$, si la ligne est indisponible pendant la période *p*, et 0, sinon, nous écrivons donc $\pi_{lp|\psi_{lp}=0}=p-\sum_{t=1}^{t=p}\psi_{lp}$.

L'utilisation de périodes relatives est obligatoire en présence de dates de livraison de commandes, prises en compte dans nos modèles, et dans le cas de contraintes de temps sur certains inputs ou outputs. Dans le problème étudié, la production interrompue par la maintenance (cases jaunes du tableau 10), peut être reprise sans modifier le temps total de traitement.

Tableau 10 : Exemple de définition du temps relatif

Périodes d'indisponibilité périodes→ $\psi_{lp}=1$

ψ_{lp}		Période *p* (temps absolu)									
		p =1	*p* =2	*p* =3	*p* =4	*p* =5	*p* =6	*p* =7	*p* =8	*p* =9	*p* =10
Ligne *l*	*l* =1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	l =2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

Calendrier relatif π_{lp} (dépendant du temps absolu *p* et de l'indisponibilité des lignes)

π_{lp}		Période *p* (temps absolu)									
		p =1	*p* =2	*p* =3	*p* =4	*p* =5	*p* =6	*p* =7	*p* =8	*p* =9	*p* =10
Ligne *l*	*l* =1	1	2	3			4	5	6	7	8
	l =2	1	2	3	4			5	6	7	8

4.2.1.3 Variables de décision

La variable de décision binaire $x_{lij}=1$ si l'ordre de fabrication *j* $(j\in\mathscr{E}_{0''})$ est traité par la ligne *l* juste après l'ordre de fabrication *i* $(i\in\mathscr{E}_0)$; dans cette formulation, le temps est indirectement pris en compte via des contraintes de précédence (voir équation ((5)). La variable x_{lij} existe si

seulement si $\beta_{li}=1$ et $\beta_{lj}=1$. La relation (1) définit le prédicat $\mathscr{H}_1$ associé à l'ensemble de variables de décision x_{lij} qui sont pertinentes. L'usage des prédicats est très utile dans le cas des langages de modélisation algébrique (Algebraic Modeling Languages (AML)), à savoir press-IVE ou GAMS.

$$l,i,j \,\big|\, i \in \mathscr{E}_{O} \wedge j \in \mathscr{E}_{O'''} \wedge i \neq j \wedge \beta_{li}=1 \wedge \beta_{lj}=1 \Rightarrow \mathscr{H}_1 = True \quad (1)$$

La date de livraison est une variable de décision (de type réel), correspondant à la dernière période de traitement de l'ordre de fabrication *j*. La relation entre y_j et x_{lij} est expliquée dans ce qui suit.

4.2.1.4 Contraintes d'affectation

Un ordre de fabrication $j\,(j \in \mathscr{E}_{O'''})$, nouveau ou fictif, est affecté à une seule ligne de production $(l=1,...,L)$. Un ordre de fabrication en cours de traitement au début de l'ordonnancement $(j \in \mathscr{E}_{O'})$ ne peut pas être suivi de plus d'un nouvel ordre de fabrication et ne peut être suivi d'aucun ordre de fabrication si la ligne n'est pas disponible.

$$\sum_{l,i|\mathscr{H}_1=True} x_{lij}=1\,,\forall j \in \mathscr{E}_{O''}\ ;\ \sum_{l,j|\mathscr{H}_1=True} x_{lij} \leq 1, \forall i \in \mathscr{E}_{O'} \quad (2)$$

4.2.1.5 Respect des fenêtres de dates de livraison

La dernière période de traitement de l'ordre de fabrication *j* correspond à sa date de livraison y_j. Cette date est comprise entre une date au plus tôt et une date au plus tard, définies par rapport au calendrier relatif de la ligne *l*. Ces contraintes concernent les nouveaux ordres de fabrication $(\mathscr{E}_{O''})$ via la relation (3)

$$\sum_{l,i,j|\mathscr{H}_1=True} L_{lj} \cdot x_{lij} \leq y_j \leq \sum_{l,i,j|\mathscr{H}_1=True} U_{lj} \cdot x_{lij}, \forall j \in \mathscr{E}_{O''} \quad (3)$$

Un nouvel ordre de fabrication produit sur la ligne *l* doit avoir un prédécesseur *i* (en cours ou nouveau) produit sur la même ligne. La relation (4) fait que l'ordre de fabrication *i* est produit sur la ligne *l* si $x_{lij}=1$

$$\sum_{k \in \mathscr{E}_{O} | k \neq j \wedge \beta_{lk}=1} x_{lkj} = \sum_{h \in \mathscr{E}_{O''} | h \neq j \wedge \beta_{lh}=1} x_{ljh}, \forall j \in \mathscr{E}_{O''} \wedge \forall l \,\big|\, \beta_{lj}=1 \quad (4)$$

4.2.1.6 Contraintes de précédence

Les relations (5) empêchent la production de l'ordre de fabrication *j* tant que la production de l'ordre de fabrication *i* est en cours, lorsque les deux ordres de fabrication sont produits sur la même ligne. Dans ces relations, le nombre P de périodes joue le rôle de la constante "grand M".

$$y_j - y_i \geq \sum_{l|\mathscr{X}_1=True} \theta_{lij} \cdot x_{lij} - \mathrm{P} \cdot (1 - \sum_{l|\mathscr{X}_1=True} x_{lij}), \forall i \in \mathscr{E}_{\mathrm{O}}, \forall j \in \mathscr{E}_{\mathrm{O}''} \,|\, i \neq j \quad (5)$$

4.2.1.7 Critère d'optimisation

Le coût γ_{lij} de production de l'ordre de fabrication *j* sur la ligne *l*, après l'ordre de fabrication *i* est la somme du coût requis par le changement de la formule d'engrais sur la ligne *l* plus le coût variable direct de la production de l'engrais *j* sur la ligne *l*. Le coût de production C_1 induit par l'ordonnancement des ordres de fabrication est donné par la relation (6) :

$$\mathrm{C}_1 = \sum_{l,i,j|\mathscr{X}_1=True} \gamma_{lij} \cdot x_{lij} \quad (6)$$

Plusieurs ordonnancements peuvent engendrer le même coût minimal C_1, car des creux (périodes de chômage de la ligne) peuvent exister entre les ordres de fabrication affectés à la même ligne de production (y_j est une variable de décision de type réelle, le nombre de solution peut être infini). Parmi les ordonnancements possibles, celui favorisant les dates de livraison au plus tôt est généralement préférable pour maintenir le système productif occupé dans le court terme. Ceci est obtenu en ajoutant une pénalité K (relation 7), ayant α comme coefficient de pondération, à C_1, ce qui mène au critère d'optimisation C_2 (relation 8). La valeur de α doit être suffisamment faible pour ne pas altérer les valeurs de variables de commande x_{lij} et $x_{lij\pi_{lt}}$. La valeur du coefficient ρ_j $(0 \leq \rho_j \leq 1)$ a pour objectif de tirer la production de l'ordre de fabrication *j* vers sa date de livraison au plus tôt quand $\rho_j = 1$ et de le pousser vers sa date de livraison au plus tard ; quand $\rho_j = 0$. Le résultat souhaité n'est pas atteint lorsque des conflits surviennent entre des ordres de fabrication programmés sur la même ligne ; dans ce cas, il faut trouver le meilleur ordonnancement parmi les meilleurs.

$$\mathrm{K} = \Big[\sum_{j \in \mathscr{E}_{\mathrm{O}''}} \rho_j \cdot (y_j - \sum_{l,i|\mathscr{X}_1=True} \mathrm{L}_{lj} \cdot x_{lij}) + \sum_{j \in \mathscr{E}_{\mathrm{O}''}} (1 - \rho_j) \cdot (\sum_{l,i|\mathscr{X}_1=True} \mathrm{U}_{lj} \cdot x_{lij} - y_j) \Big] \quad (7)$$

$$C_2 = C_1 + \alpha \cdot K \quad (8)$$

Les fondements de la valorisation économique utilisée dans ce DSS sont décrits en détail dans le chapitre 4.

4.2.2 Architecture du DSS

Un DSS, appliquant les fonctionnalités du DSS décrites dans la partie 4.1.2, a été conçu. Le schéma de la figure 32 instancie le DSS original dont l'architecture est décrite ci-dessous.

Un cadre graphique interactif a été développé. Il utilise des technologies génériques et portables combinées à la gestion de données pour assurer l'intégrité avec un concept orienté objet permettant une flexibilité adéquate des cardinalités (Azzamouri *et al*. 2019b). Tous les modules DSS sont regroupés dans un package qui peut fonctionner séparément ou en suivant le workflow DSS. L'architecture technique du DSS est présentée dans la figure 33 (qui comprend les figures 34 à 36).

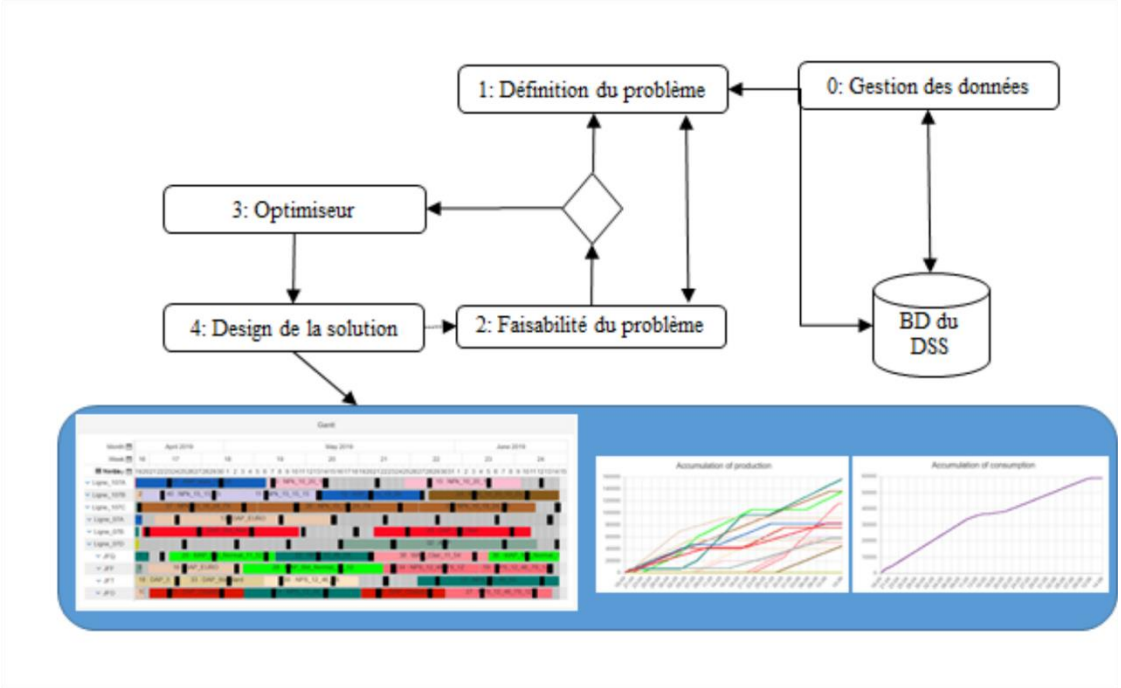

Figure 33: architecture du DSS

- Le module de la gestion de données est utilisé pour définir les caractéristiques structurelles du problème d'ordonnancement. Ces données sont relativement stables et

sont mises à jour uniquement dans de la suppression, la transformation ou l'ajout d'une ligne de production des engrais ou d'une référence d'engrais.

- Le module de la définition du problème propose de définir les paramètres d'un problème d'ordonnancement nécessitant les données structurelles mentionnées ci-dessus et les complète avec les données relatives au problème.
- Le module de faisabilité du problème permet à l'utilisateur de tester la possibilité de trouver une solution, afin d'éviter de lancer inutilement l'optimisation.
- Le module optimiseur, fondé sur AML de FICO Xpress, cherche la solution optimale pour chaque problème spécifique. L'instance est activée par un ensemble de données comprenant toutes les informations définissant le problème.
- Le module designer de la solution présente la solution optimale proposée, à l'aide d'une interface utilisateur graphique et permet aux utilisateurs de modifier et d'adapter cette solution, tout en respectant les contraintes, et de visualiser l'impact de leurs changements.

4.3 *Exemple*

Nous illustrons le résultat du DSS en nous appuyant sur le carnet de commandes d'engrais du tableau 11. Le problème de l'ordonnancement concerne un horizon de deux mois (du 19/04/2019 au 15/06/2019). Dix des treize lignes de production d'engrais sont ouvertes. Un programme de maintenance prédéfini est prévu, dans lequel chaque ligne ouverte fait l'objet d'une maintenance hebdomadaire de 4 heures et d'une maintenance mensuelle de 8 heures.

Tableau 11 : carnet de commandes utilisé pour exécuter le DSS

Statut de l'ordre de fabrication	Numéro d'ordre de fabrication	Produit engrais	Quantité / t	Date de livraison au plus tôt	Date de livraison au plus tard
Production en cours	1	DAP_Std_Noir	1000	20/04/2019 (00:00)	20/04/2019 (00:00)
	2	DAP_EURO	800	19/04/2019 (23:00)	19/04/2019 (23:00)
	3	ASP	2000	20/04/2019 (23:00)	20/04/2019 (23:00)
	4	ASP_euro_19_38	800	20/04/2019 (00:00)	20/04/2019 (00:00)
	5	Fictitious PO	0	19/04/2019 (00:00)	19/04/2019 (00:00)
	6	MAP_Clair_11_52	200	19/04/2019 (07:00)	19/04/2019 (07:00)
	7	NPS_12_48_5S	2000	20/04/2019 (22:00)	20/04/2019 (22:00)
	8	ASP	1500	19/04/2019 (23:00)	19/04/2019 (23:00)
	9	Fictitious PO	0	19/04/2019 (00:00)	19/04/2019 (00:00)
	10	DAP_EURO	3000	20/04/2019 (07:00)	20/04/2019 (07:00)
Nouveaux ordres de fabricatio	11	NPk_15_15_15	25000	25/04/2019 (00:00)	19/05/2019 (07:00)
	12	ASP_euro_19_38	35000	30/04/2019 (00:00)	30/05/2019 (07:00)
	13	DAP_EURO	45000	23/04/2019 (00:00)	15/05/2019 (07:00)
	14	NPS_12_48_5S	50000	29/04/2019 (00:00)	20/05/2019 (07:00)
	15	NPk_10_20_10	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	16	DAP_EURO	40000	20/04/2019 (00:00)	05/05/2019 (00:00)
	17	NPS_12_48_5S	60000	10/05/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	18	DAP_Standard	15000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	19	NPS_12_46_7S_1Z	30000	25/05/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	20	MAP_Std_Normal_11_52	45000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	21	ASP_euro_19_38	45000	21/04/2019 (00:00)	20/05/2019 (00:00)
	22	NPS_12_48_5S	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	23	NPk_10_20_10	20000	15/05/2019 (00:00)	10/06/2019 (00:00)
	24	NPK_10_20_10_Zn_Br	45000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	25	DAP_Chambal	40000	27/04/2019 (00:00)	20/05/2019 (00:00)
	26	NPk_10_18_24_7S	55000	20/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	27	NPS_12_46_7S_1Z	45000	21/04/2019 (00:00)	14/06/2019 (00:00)
	28	MAP_Std_Normal_11_52	60000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	29	DAP_Std_Noir	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	30	NPS_12_46_7S	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	31	NPk_10_18_24_7S	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	32	ASP	50000	01/05/2019 (00:00)	12/06/2019 (00:00)
	33	DAP_Standard	40000	21/04/2019 (00:00)	10/05/2019 (00:00)
	34	NPS_12_46_7S_1Z	40000	21/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	35	DAP_Std_Noir	40000	20/04/2019 (00:00)	30/05/2019 (00:00)
	36	MAP_Std_Normal_11_52	30000	20/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	37	NPk_10_18_24_7S	40000	01/05/2019 (00:00)	30/05/2019 (00:00)
	38	MAP_Clair_11_54	50000	09/05/2019 (00:00)	10/06/2019 (00:00)
	39	DAP_Chambal	35000	01/05/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)
	40	NPk_15_15_15	35000	22/04/2019 (00:00)	15/06/2019 (00:00)

Le DSS fournit le diagramme de Gantt de l'ordonnancement optimal pour les lignes de production ouvertes. Chaque engrais est représenté par une couleur différente. Les blocs noirs (figure 34) correspondent à la maintenance préventive.

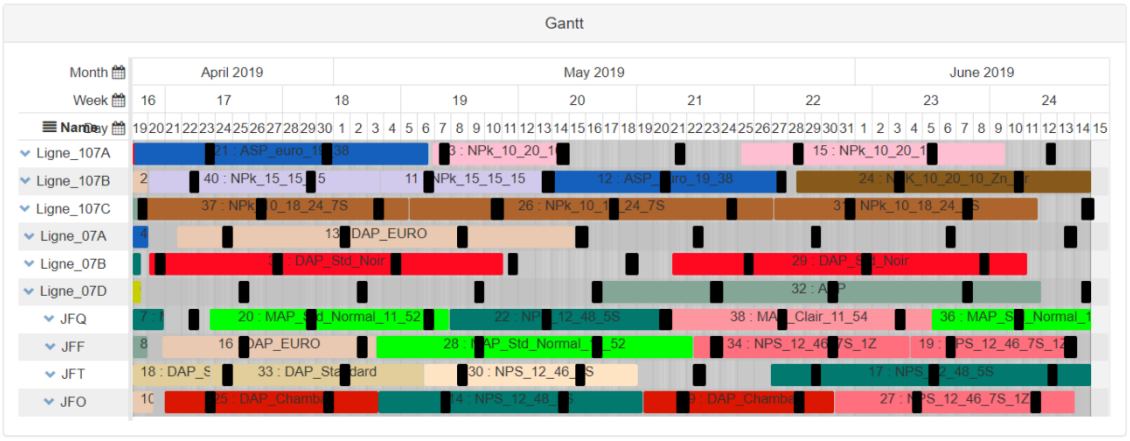

Figure 34 : diagramme Gantt de la solution optimale

Le DSS fournit une représentation graphique permettant de visualiser l'impact de la solution optimale sur les contraintes de stock en amont et en aval. De nombreux autres graphiques sont générés : consommation d'acide périodique et cumulée, production d'engrais périodique et cumulée. Nous présentons ci-dessous (figures 35 et 36) deux graphiques : le premier montre la production globale d'engrais et le deuxième montre la consommation totale d'acide phosphorique à 54 %. Des filtres sont disponibles (non utilisés ici) pour montrer les résultats par entité de production.

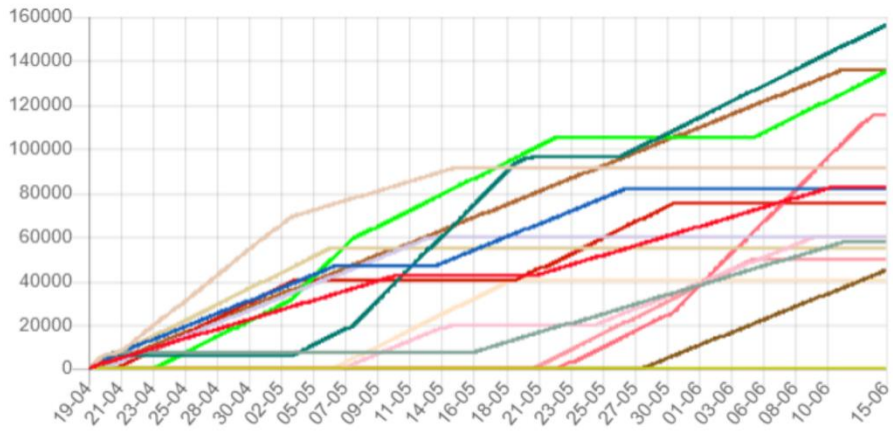

Figure 35 : production cumulée des engrais (toutes les entités)

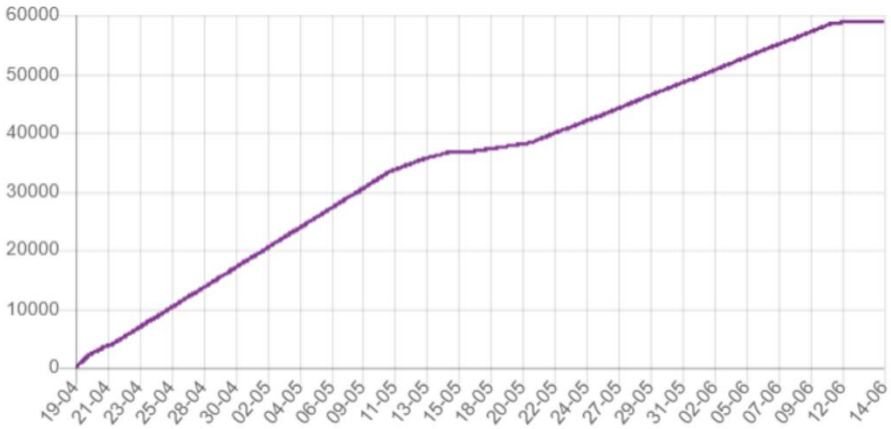

Figure 36 : consommation cumulée de l'acide phosphorique 54% (toutes les entités)

La solution optimale de ce problème est obtenue après un temps d'exécution de 51 secondes dans un ordinateur ayant les caractéristiques suivantes (Intel ® Core(TM) i7-7600U CPU @ 2.80GHz 2.90GHz – 8 Go (RAM)). Lorsqu'une contrainte de stock en amont ou en aval n'est pas respectée, l'utilisateur peut déplacer les rectangles de commandes sur le diagramme de Gantt sur la même ligne ou sur une autre ligne (ce qui peut entraîner une modification du temps de traitement ou du temps de préparation) ; ce déplacement est limité par la capacité disponible et les dates de livraison. Tous les graphiques sont ajustés en temps réel. Lorsque aucune solution satisfaisante n'est trouvée, le DSS est utilisé pour modifier le problème d'ordonnancement (changement des fenêtres de temps de livraison, changement du programme de la maintenance, etc.).

5. CONCLUSION

Ce chapitre a porté sur des outils d'aide à la décision à court terme. Nous avons commencé par la présentation d'un ensemble de règles de transformation qui nous ont permis de passer du niveau du granularité très détaillée des informations recueillies du terrain vers un niveau de granularité pertinent à la modélisation des décisions opérationnelles. Nous avons présenté deux outils décisionnels : un simulateur de la production et un système d'aide à la décision d'ordonnancement des lignes de production d'engrais.

Le simulateur est fondé sur la simulation à évènements discrets. La CL de l'OCP est de nature hybride en combinant des processus de production discrets et continus. Nous avons développé un ensemble de composants génériques permettant la modélisation des CLs hybrides

par la simulation à événements discrets. Le simulateur développé intègre toutes les entités de Jorf. Il a deux usages :

i) Un usage top down dans lequel les opérationnels partent des objectifs définis par la planification tactique et préparent des plannings sur des périodes d'une à deux semaines. Dans cet usage, le simulateur part de l'état initial du système productif (niveaux des stocks, et disponibilité et cadence des lignes) et d'un ensemble des décisions opérationnelles prises par les différentes entités et anticipe, par conséquent, le comportement du système productif dans la semaine ou les deux semaines qui viennent. Le simulateur anticipe par conséquent des éventuelles incohérences décisionnelles et identifie les causes de ces incohérences facilitant ainsi aux preneurs de décisions de faire des redressements de scénarios.

ii) Un deuxième usage potentiel s'inscrit dans une logique bottom-up. Le simulateur part de l'état réel du système productif (provenant du niveau opérationnel) et calcule la capacité du système productif du mois à venir. Cette estimation de la capacité est utilisée comme entrée dans le modèle d'optimisation tactique pour la planification trimestrielle. Le modèle d'optimisation tactique est exécuté selon un horizon glissant (chaque mois) pour mettre à jour la capacité mensuelle des nœuds du système productif.

Le second outil proposé considère la planification tactique comme un intrant et permet d'optimiser l'ordonnancement global de toutes les lignes de production d'engrais de l'OCP. Il s'agit d'un modèle d'optimisation encapsulé dans un système interactif permettant d'étudier l'impact de l'ordonnancement optimal obtenu sur les contraintes de proximités en amont et en aval. En cas de non-faisabilité, ce DSS peut montrer la nécessité une nouvelle planification tactique.

Les deux modèles opérationnels, dont le niveau de détail est suffisamment fin pour tenir compte des contraintes réelles de l'atelier, permettent d'améliorer le processus décisionnel opérationnel à Jorf. Par ailleurs, via des interactions avec le modèle tactique d'optimisation, ces modèles opérationnels peuvent améliorer l'alignement entre les deux niveaux décisionnels opérationnel et tactique. La figure 37 décrit une utilisation intégrée des deux modèles opérationnels avec le modèle tactique d'optimisation.

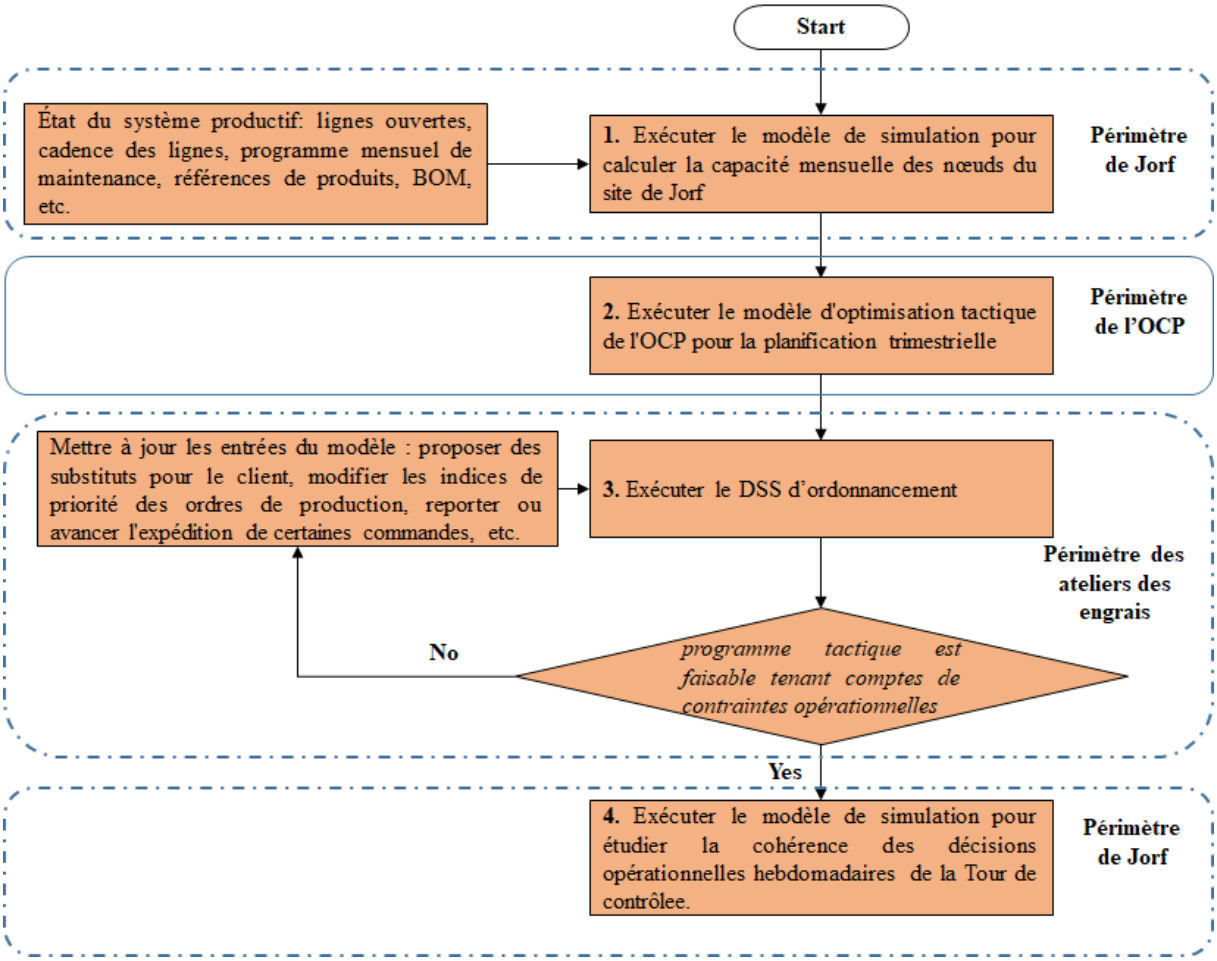

Figure 37 : Schéma de l'utilisation intégrée le modèle tactique et les modèles opérationnels

Les modèles présentés permettent une modélisation physique fidèle du fonctionnement du système productif de Jorf au niveau opérationnel. Leur utilisation permet de trouver les solutions efficaces vis-à-vis les contraintes considérées. Pour atteindre l'efficience, ces modèles doivent s'appuyer sur une évaluation économique appropriée à leur contexte décisionnel. Pour ce faire, le chapitre suivant est dédié au volet valorisation économique dans les modèles de décision. Nous y mettrons en évidence la forte contingence entre la modélisation faite du système physique, et les principes de valorisation économique utilisée. Finalement, nous présenterons les principes d'une approche de valorisation économique des décisions à court terme. Nous décrirons l'application de ces principes pour l'étude de cas des décisions d'ordonnancement des ordres de fabrication d'engrais. Nous soulignerons la pertinence de l'utilisation de l'approche dans le DSS de l'ordonnancement des engrais.

CHAPITRE 4

ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES DÉCISIONS

1. INTRODUCTION

Ce chapitre aborde le volet valorisation économique dans les modèles de décision. Il est constitué de deux sections principales (2 et 3). La section 2 porte sur une revue de littérature critique d'un ensemble d'articles proposant des modèles d'aide à la décision dans le domaine de la CL (Bara *et al.,* 2019). Dans cette revue de littérature structurée, nous relevons un ensemble de défis liés à l'utilisation de l'évaluation économique dans les modèles de décision. La section 3 présente les principes d'une approche de valorisation économique des décisions à court terme (Bara *et al*., 2020c). Nous y détaillons les résultats d'une étude de cas portant sur la valorisation économique des décisions d'ordonnancement des engrais. Nous nous appuyons sur les principes que nous proposons et nous montrons leur pertinence dans le cas du DSS d'ordonnancement des engrais (présenté dans le chapitre précédent).

2. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES MODÈLES DE DÉCISION : REVUE DE LITTÉRATURE CRITIQUE

Des travaux précédents avaient discuté l'insatisfaction des managers par rapport aux coûts qui leur sont fournis pour étudier les décisions (voir 4.3.2 du chapitre 1). Cette section a pour objectif de compléter ces travaux par une revue de littérature critique concernant l'utilisation de l'évaluation économique dans les modèles de décision. Il passe en revue un ensemble de 110 articles, proposant des modèles, afin de comprendre jusqu'à quel point les auteurs vérifient l'adéquation des modèles économiques qu'ils utilisent, avec les modèles de décision qu'ils développent, et de montrer comment une approche d'évaluation économique inappropriée peut compromettre les fondements économiques des décisions élaborées.

Cette section est organisée comme suit : la section 2.1 présente un cadre théorique; la section 2.2 présente la méthodologie de la revue; la section 2.3 décrit les résultats de l'analyse des articles, et la section 2.4 présente une discussion des résultats.

2.1 *Cadre théorique*

Cette sous-section présente un cadre théorique nécessaire pour la présentation des résultats et des discussions évoqués dans ce chapitre. La partie 2.1.1 a pour objectif de relever les limitations des systèmes de comptabilité de gestion des entreprises par rapport à la prise de décision. La partie 2.1.2 est dédiée à la présentation des concepts pivots dans l'évaluation

économique des décisions.

2.1.1 Limites des systèmes de comptabilité de gestion dans la prise de décision

Un système de coûts fait référence au système d'information par lequel une organisation relie les coûts aux objets de coûts (unités organisationnelles, produits, décisions). Il « peut être vu comme un système connectant la comptabilité financière aux systèmes de gestion physiques pour produire des signaux qui sont en partie récupérés sous forme monétaire » (Mévellec, 2005). Le périmètre couvert, la maille d'analyse (définissant la granularité), la causalité (qui renvoie à la capacité du système de coûts à associer une conséquence à chaque cause) et la traçabilité (la capacité du système de coûts à structurer le flux de ressources, de l'entrée à la sortie de l'organisation) sont les caractéristiques principales d'un système de coûts. Nous reviendrons sur ces trois caractéristiques après avoir introduit une présentation du système de comptabilité de gestion en coûts complets et de la méthode *Activity Based Costing* (ABC).

2.1.1.1 Comptabilité de gestion classique

La comptabilité de gestion en coûts complets vise à imputer, à la fin d'une période prédéfinie (mois...), les coûts aux produits et services. Dans ce système, le comportement des coûts est souvent fondé sur leur variabilité par rapport au volume de production ; ce qui conduit à distinguer les coûts variables et les coûts fixes ; les premiers varient avec le volume, alors que les seconds ne varient pas. Par ailleurs, la comptabilité de gestion en coûts complets calcule des coûts agrégés sur la base d'une succession de déversements de charges de centres de coûts vers d'autres centres de coûts en utilisant généralement des bases de répartition volumiques. Ces bases de répartition sont utilisées car les coûts indirects ne peuvent pas être directement associés à des objets de coûts spécifiques. L'utilisation des bases de répartition est l'une des principales raisons de la critique des systèmes de comptabilité de gestion traditionnels dans la littérature (Johnson et Kaplan 1987 ; Cooper et Kaplan, 1988 ; Bakke et Helberg, 1991). En effet, l'utilisation de bases de répartition "indifférenciées" entraîne une distorsion du calcul en raison des relations non proportionnelles entre les coûts indirects et les bases de répartition utilisées et du taux élevé des charges indirects, l'industrie étant de plus en plus automatisée.

La pertinence des coûts obtenus dépend de la pertinence des clés de répartitions utilisées en fonction du niveau décisionnel étudié. Si on est intéressé par un niveau consolidé, par exemple le calcul des coûts d'une usine, les coûts fournis par la comptabilité de gestion

classique fournissent une estimation correcte. Les clés de répartition ont néanmoins un impact, lorsqu'elles sont utilisées pour intégrer, dans le calcul des coûts de l'usine, des charges venant des entités externes (siège…) et lorsque l'on a besoin de descendre à un niveau de détail plus fin, par exemple le calcul du coût de production d'un produit sur une ligne de production ou celui d'une intervention de maintenance, etc. Ces coûts sont obtenus suite à une répartition des charges des centres d'analyse au moyen des clés de répartition. Si les centres d'analyse ne sont pas homogènes, les coûts obtenus, suite à l'allocation de leurs charges, sont biaisés. Ce critère d'homogénéité est mesuré par le degré de proportionnalité des charges d'un centre d'analyse par rapport à une mesure de l'activité du centre en question, unique, appelée unité d'œuvre ou mesure d'activité. Un centre d'analyse est dit homogène, si les charges qui le constituent ont un comportement solidaire par rapport à l'unité d'œuvre choisie (Bouquin, 1997).

2.1.1.2 La méthode ABC

S'occuper pertinemment des charges indirectes est la raison principale de l'émergence de la méthode ABC. Elle s'est développée à partir des années quatre-vingt, et est fondée sur le principe que les activités consomment les ressources, et que les produits et services consomment les activités (maille d'analyse). En pratique la définition d'une activité est délicate. Nous retenons ici la définition décrivant une activité comme une tâche ou un ensemble de tâches permettant de fournir des produits ou des services. La méthode ABC s'intéresse aux activités qui s'exercent au sein de l'entreprise (Gunasekaran *et al.,* 2000), au coût de réalisation de chacune des activités et aux facteurs générateurs de ces activités. Elle dépasse le système traditionnel en allouant les ressources, en se basant non uniquement sur des unités volumiques, mais également sur la diversité et le degré de complexité des produits (Cooper et Kaplan, 1998). La méthode ABC cherche surtout à établir des relations de cause à effet entre les ressources consommées par une entreprise et les activités consommant ces ressources.

Il est ici nécessaire, de faire la distinction entre une unité d'œuvre et un inducteur d'activité. L'*unité d'œuvre* (ou mesure d'activité) est une unité physique qui permet de répartir les charges d'un centre d'analyse ou d'une section analytique homogène sur un ensemble de récepteurs (produits ou services). Elle doit être corrélée au niveau d'activité du centre. La mesure d'activité est une mesure quantitative de l'output de l'activité (Cooper et Kaplan, 1998). On distingue entre trois types de mesures d'activités : *1*) la transaction, mesure le nombre de fois où l'activité est effectuée, *2*) la durée, mesure le temps pris pour la réalisation de l'activité

et *3*) l'intensité, mesure les ressources consommées à chaque fois que l'activité est réalisée. Le choix de la mesure d'activité à utiliser dépend d'un compromis entre la pertinence souhaitée et le coût de son obtention. L'intensité est la mesure d'activité la plus pertinente mais la plus coûteuse à implémenter. Un *inducteur d'activité* est le facteur qui déclenche la réalisation de cette activité.

Selon ABC les coûts sont variables ou fixes par palier. Les coûts variables à court terme varient en fonction du volume de production, les coûts variables à long terme (coût semi-variable) varient en fonction d'autres inducteurs d'activité et les coûts fixes ne varient pas, sur une période donnée, avec aucun inducteur d'activité (Cooper et Kaplan, 1988). C'est-à-dire qu'à long terme, tous les coûts peuvent varier (Bakke et Helberg, 1991). ABC distingue entre plusieurs niveaux d'inducteurs d'activité :

- Inducteurs de niveau « unité » : concernent les activités effectuées à chaque fois qu'une unité est produite.
- Inducteurs de niveau « lot » : concernent les activités effectuées à chaque fois qu'un nouveau lot est démarré. L'introduction de ce niveau d'inducteur dans la modélisation de coûts, dépasse la distinction classique entre les charges fixes et charges variables. Par exemple les coûts de lancement dans la décision d'ordonnancement des lignes de production, sont des charges relativement fixes. Ils sont fixes du moment où nous avons démarré la production, parce qu'ils ne sont pas variables par rapport au volume produit, mais si on considère l'horizon d'ordonnancement, les coûts de lancement sont des charges qui varient (ils dépendent du nombre de lancement effectué, du type de séquencement de produits, etc.). Ainsi, il ne suffit pas de distinguer les charges fixes et les charges variables en fonction de leur relation probable avec le volume de production (Morto *et al.*, 1957), la modélisation des coûts peut être plus complexe.
- Inducteurs de niveau « produit » : concernent les activités qui relèvent de l'existence de produits (R & D…).

Par ailleurs, le coût de réalisation d'une activité évolue dans le long terme. L'analyse de la chaîne de valeur est un moyen permettant d'analyser les activités pour relever des avantages concurrentiels induits, suite à la réalisation de ces activités mieux que les concurrents (Hergert et Morris, 1989). Chaque activité a sa structure et son comportement qui déterminent son coût. Ces déterminants, introduits pour la première fois par Porter (1985), ont été ensuite adaptés et appelés " inducteurs de coûts " par les tenants de l'ABC. Porter distingue dix causes possibles

de l'évolution des coûts d'une activité : *i)* les économies ou déséconomies d'échelle qui rendent les coûts unitaires sensibles au volume, *ii)* le phénomène d'apprentissage qui crée une dépendance entre les coûts unitaires et le temps, *iii)* les coûts de capacité ayant un impact significatif sur les coûts unitaires fixes, *iv)* la dépendance entre les activités qui rend un coût d'activité dépendant d'autres coûts d'activités ; soit dans la même chaîne de valeur ou dans les chaînes de valeur des fournisseurs ou des acheteurs, *v)* l'interrelation qui signifie qu'une activité, une ressource rare ou un savoir-faire pourrait être partagé entre différentes unités stratégiques, *vi)* le degré d'intégration verticale qui peut réduire les coûts de transaction, *vii)* le timing qui fait que le premier qui arrive sur le marché a un avantage ou un désavantage, *viii)* les politiques discrétionnaires qui se réfèrent à la conception des produits ou des services, *ix)* la localisation géographique qui peut avoir un impact sur les compétences de la main-d'œuvre, les coûts de transport… et *x)* le changement de l'environnement institutionnel et réglementaire qui peut affecter les coûts unitaires des activités de l'organisation (Hergert et Morris, 1989).

Dans ce qui suit nous allons comparer les systèmes de comptabilité de gestion classique avec la méthode ABC sur la base des trois dimensions de la maille d'analyse, de la causalité et de la traçabilité :

- La maille d'analyse, dans les systèmes de comptabilité de gestion traditionnels, repose sur la décomposition technique des produits (gammes et nomenclature technique pour les coûts directs) et l'organisation hiérarchique (centres de coûts). Dans le système ABC, en plus de la nomenclature technique des produits, la maille d'analyse est fondée sur les activités de l'organisation, généralement rattachées à des centres de coûts.
- En ce qui concerne la causalité, elle est plus pertinente dans l'ABC (Stratton *et al.,* 2009) car il est plus facile de définir des relations de cause à effet en traitant des activités (avec différents niveaux d'inducteurs d'activité) plutôt que des centres de coûts et des outputs de processus. La causalité est liée à l'homogénéité des coûts regroupés dans une activité et à l'inducteur retenu (qui peut être testée statistiquement). Tous les systèmes de comptabilité de gestion en coûts complets que l'ABC ont des limites en termes de causalité en raison de l'existence de déversements, qui limite la causalité et donc la capacité du système de coûts à prévoir les coûts futurs. En effet, même le système ABC peut se préoccuper des déversements de coûts en cascade lorsqu'il distingue les activités primaires et secondaires.
- La troisième dimension est la traçabilité : lorsqu'elle n'est pas totale (coût direct ou coût variable), certaines consommations de ressources risquent de ne pas être estimées (par

exemple, dans un système de coûts variables, l'hypothèse fondamentale est celle d'une indépendance totale entre coûts fixes et les coûts variables, ce qui n'est vrai qu'à très court terme et que la causalité entre les coûts variables est parfaite et totalement linéaire).

En outre, tant les systèmes comptables traditionnels que l'ABC sont souvent orientés vers le contrôle par le biais de calculs rétrospectifs des coûts historiques. Le calcul des coûts est beaucoup plus orienté vers les entités organisationnelles et les outputs des processus de production (produits) que vers les décisions. Dans leur recherche de la pertinence de la comptabilité de gestion pour la prise de décision, Bakke et Helberg (1991) concluent que « l'ABC est essentiellement conçue pour fournir des informations plus précises sur la production et les activités de support... » en raison de la différence en termes de causalité et de la maille d'analyse «..l'ABC n'est pas conçue pour déclencher des décisions automatiques, mais pour appuyer des choix éclairés de la part du personnel qualifié ». Sénéchal et Tahon (1997) présentent une liste des limites de la comptabilité de gestion traditionnelle dans le contexte de la prise de décision. Il est donc essentiel que la recherche en sciences gestion améliore l'utilité du système de comptabilité de gestion pour appuyer les processus de la prise de décision (Wouters et Verdaasdonk, 2002 ; Lawson, 2018).

2.1.2 Évaluation économique pour la prise de décision

La prise de décision s'intéresse à l'avenir et se concentre sur la comparaison entre les différentes décisions possibles. L'évaluation économique des décisions doit donc estimer des coûts futurs et établir des comparaisons entre les alternatives. Cet objectif est différent de l'évaluation des performances passées (assurée par les systèmes de comptabilité de gestion des entreprises). En outre, l'évaluation économique dans les modèles de décision repose sur l'évaluation des variables d'état générées par la modélisation faite de la problématique décisionnelle étudiée. Cette évaluation est très rarement traçable par les systèmes de comptabilité de gestion ; parce que les variables d'état sont généralement spécifiques (ne sont pas nécessairement considérées comme des KPI (*Key Performance Indicators*) dans le processus de diagnostic) et peuvent être différentes d'un modèle de décision à l'autre. L'évaluation économique dépend donc du contexte de la prise de décision. Burlaud et Simon (2003) vont plus loin en affirmant qu'un coût est une opinion plutôt qu'un fait, pour insister sur la nature contingente des coûts. Par ailleurs, les conséquences de décisions peu efficaces peuvent compromettre les attentes des managers du système productif (mesurées par les variables d'état), invalider certaines hypothèses sur la

demande et remettre en cause la pertinence des solutions proposées par le modèle. Parfois, les modèles peuvent ajouter au modèle économique des coûts de pénalité, dont l'estimation à partir du système de coûts est difficile.

L'évaluation économique dans la prise de décision nécessite des informations spécifiques sur les quantités de ressources et leurs coûts qui peuvent ne pas être disponibles dans le système de comptabilité de gestion. La granularité utilisée par les systèmes de comptabilité (impactée par les capteurs de consommation de ressources) n'est souvent pas compatible avec la granularité requise pour la prise de décision. Par exemple, la consommation de l'énergie électrique dans une usine ne disposant que d'un seul capteur, pour l'énergie électrique, signifie que la dépense d'énergie électrique est un coût indirect, alors que si chaque machine disposait de son propre capteur, elle pourrait être considérée comme un coût direct. Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les critères possibles pour la comparaison économique des décisions. Ensuite, nous introduisons des concepts de coûts pertinents pour l'évaluation économique de décisions. Finalement, nous abordons le calcul du coût différentiel des décisions alternatives.

2.1.2.1 Critères économiques dans les modèles de décision

Nous distinguons ici deux critères économiques de décision : les coûts et le profit. Le profit est la somme des recettes moins les coûts. Lorsque les recettes sont données (les ventes et les prix sont indépendants des variables de décision), la maximisation du profit peut être remplacée par la minimisation des coûts.

L'expression mathématique du critère choisi dépend de l'impact des décisions étudiées. On sait que les décisions opérationnelles et tactiques ont un horizon limité par rapport aux décisions stratégiques d'investissement pouvant avoir un effet sur plusieurs années. C'est-à-dire que les décisions stratégiques d'investissement diffèrent des décisions opérationnelles et tactiques dans la mesure où leurs études impliquent des flux de trésorerie qui sont sécrétés sur un long horizon et nécessitent la prise en compte de l'évolution de la valeur de l'argent dans le temps (Shillinglaw, 1963 ; Lucey, 2003). Leur évaluation peut nécessiter l'utilisation de la valeur actuelle nette (VAN). Cette dernière est une technique d'agrégation des flux de trésorerie survenant à des dates éloignées, sur un horizon généralement supérieur à l'année, en tenant compte des principes d'actualisation qui instancie une préférence temporelle de la disponibilité des sommes monétaires. Par conséquent, l'utilisation de la VAN des flux de trésorerie est

appropriée pour étudier les alternatives de décisions stratégiques d'investissement (Van Mieghem, 2003), lors de l'établissement de leur bilan différentiel. L'étude des décisions opérationnelles et tactiques est fondée sur les coûts et revenus actuels anticipés. Les bénéfices comptables ne sont pas adaptés aux décisions d'investissement ; ils sont orientés période (trimestre, année…) et nécessite une comptabilité d'exercice classique (Lucey, 2003) se concentrant sur le contrôle budgétaire.

2.1.2.2 Concepts de coûts pour l'évaluation économique des décisions

Cette section vise à présenter un ensemble de concepts pertinents pour l'évaluation économique des décisions alternatives. Il s'agit du concept de coût différentiel entre les décisions alternatives, de la solution de référence, du concept de coûts irrécupérables, du concept de coûts d'opportunité et enfin du coût marginal.

Clark (1923) souligne que le coût différentiel est le concept de coût qui est pertinent pour la prise de décision. Rorem (1928) le définit comme l'ensemble des « coûts qui doivent être engagés si une unité supplémentaire d'activité commerciale est menée, et qui n'ont pas à être engagés si cette unité supplémentaire d'activité commerciale n'est pas menée ». Selon Burch et Henry (1974), le coût différentiel n'est intéressant que dans la comparaison des alternatives de décision. Historiquement, ce concept a été particulièrement intéressant dans l'analyse des décisions d'investissement (par l'analyse des bilans différentiels). Pour Harrison et Shanteau (1993), les managers devraient s'appuyer sur le coût différentiel dans l'analyse des "alternatives de décision", tant pour les décisions à court terme qu'à long terme. De plus, le coût différentiel est orienté avenir, sans tenir compte des coûts précédemment encourus, par le biais d'investissements dans des installations et équipements permanents ou de contrats irrévocables d'achat de matériaux ou de main-d'œuvre (Rorem, 1928). Les coûts moyens, calculés par les systèmes de comptabilité de gestion des entreprises, peuvent servir à comparer les performances passées avec une référence standard donnée, mais ils n'ont pas nécessairement de liens avec les coûts non encore encourus (Rorem, 1928), qui sont pertinents pour le calcul du coût différentiel. En d'autres termes, le coût différentiel est davantage un problème de décision qu'un objet de préoccupation de la comptabilité de gestion. Le coût différentiel dépend de la solution de référence choisie (Giard, 1990).

Lorsque le critère économique est choisi, l'objectif des modèles de décision est de fournir aux managers la solution la plus efficiente possible. Le facteur déterminant dans

l'établissement de toute politique commerciale ou le choix de toute décision est fondé sur son revenu additionnel et son coût additionnel par rapport à une solution de référence. Considérons une CL qui existe déjà et dont les dirigeants souhaitent modifier la structure ; en supposant que ces dirigeants disposent d'un ensemble de *n* structures futures possibles (FS_1, FS_2...FS_n). Le coût de la structure actuelle est obtenu en se basant sur les données historiques, tandis que les coûts des structures alternatives futures sont des coûts futurs estimés. La structure future la plus efficiente à adopter est celle qui présente le coût différentiel le plus faible par rapport à la solution de référence, qui est la structure actuelle. Un modèle de simulation permettant une analyse de scénarios de simulation sur la base d'un critère économique doit reposer sur le coût différentiel entre les décisions alternatives. En ce qui concerne les modèles d'optimisation qui utilisent une fonction-objectif économique, on pourrait penser qu'ils ne reposent pas sur l'approche du coût différentiel, mais il faut souligner que les solveurs essaient d'atteindre l'optimum en recherchant, dans un espace de solutions, une nouvelle solution dont la performance économique est meilleure que la solution courante, ce qui repose implicitement sur une logique du coût différentiel (Bara *et al*., 2020c).

Selon Johnson et Kaplan (1991), le coût différentiel concerne les coûts qui varieront en fonction d'une décision donnée, par opposition aux coûts irrécupérables (sunk costs). Il est à noter que les coûts sont appelés coûts irrécupérables ou non, au regard de la décision étudiée. Ils font référence à l'ensemble des coûts déjà encourus et qui ne découlent pas de cette décision. Par exemple, si l'on considère les décisions tactiques et opérationnelles, les coûts de capacité, définis au niveau stratégique, sont des coûts irrécupérables. Ils ne sont pas contrôlables à court et moyen termes et ne sont donc pas pertinents pour l'estimation du coût différentiel des décisions dont l'impact est observé sur un horizon allant jusqu'à quelques semaines (Burch et Henry, 1974 ; Corbey, 1994).

Corbey (1994) souligne que l'évaluation économique des décisions comporte deux composantes : d'une part, les coûts qui varient en fonction de la décision étudiée et, d'autre part, les coûts d'opportunité qui auraient été évités si la meilleure décision avait été prise. Le coût d'opportunité est un concept qui remonte au XIXe siècle. Il est proposé par Friedrich von Wieser, (1851-1926) qui s'est intéressé à la détermination de la valeur des facteurs de production (Burch et Henry, 1974). Il a défini le coût d'opportunité comme le revenu net généré par ce facteur de production dans sa meilleure utilisation. Andreani, (1967) l'a lié à l'existence d'un conflit entre les opportunités qui pourrait conduire à un manque à gagner. Il affirme en

outre, que le coût n'existe pas en l'absence de choix entre les alternatives. Vera-Munoz (1998) ajoute que les coûts d'opportunité apparaissent lorsque des choix doivent être faits entre un ensemble de décisions alternatives, ce qui signifie que tout choix implique de renoncer à quelque chose. « Si une décision n'exige aucun sacrifice, elle est gratuite » (Burch et Henry, 1974). Le coût d'opportunité est l'ensemble des revenus à tirer des actions possibles mais perdus parce que d'autres actions ont été menées pour atteindre un objectif particulier (Andreani, 1967 ; Vera-Munoz, 1998). Au niveau opérationnel, le coût d'opportunité dépend de l'usage que l'on fait des ressources rares pour atteindre les objectifs. Au niveau stratégique, les coûts d'opportunité apparaissent lorsque l'on est confronté à de multiples choix d'investissement, et que les coûts des opportunités d'investissement manquées doivent être évalués. Harrison et Shanteau, (1993) ; Verdaasdonk et Wouters, (2001) et Bara *et al.,* (2020c) soulignent la pertinence du coût d'opportunité pour l'estimation d'un coût différentiel et pour l'étude son impact sur le temps et l'espace. Verdaasdonk et Wouters (2001) se sont intéressés à la comparaison économique entre des décisions alternatives prises à des moments différents dans le temps sur la base des coûts d'opportunité.

Les modèles de décision fondés sur l'optimisation choisissent la meilleure solution en fonction des contraintes et du critère d'optimisation retenus dans la modélisation. Sans doute lorsque plusieurs alternatives existent, la meilleure solution est la solution optimale. Lorsqu'on prend la meilleure décision possible, le coût d'opportunité est nul (Corbey, 1994).

Le coût marginal correspond au coût engagé pour la production d'une unité additionnelle. (Bouquin, 1997) le définit comme étant « *le coût supplémentaire entraîné par la livraison d'une* commande *supplémentaire* ». Le coût marginal diffère suivant que l'on décide d'augmenter momentanément d'une unité le volume de production, ou si l'on décide de l'augmenter durablement d'une unité (Boiteux, 1951). Dans le premier cas l'unité supplémentaire est satisfaite par la capacité actuelle, par contre le deuxième cas pourrait nécessiter une augmentation de la capacité. Deux types de coût marginaux sont distingués (Bouquin, 1997 ; Turvey 1969) :

- Le coût marginal à court terme qui est calculé en supposant que le volume produit est obtenu sans investissement additionnel ; il n'intègre pas les coûts de capacité. À court terme, les capacités sont déjà installées et permettent d'augmenter le volume de production avec des moyens constants. À court terme, le coût variable direct peut être une bonne estimation.

- Le coût marginal à long terme qui intègre les coûts d'investissement d'extension des capacités, qu'exige une production supplémentaire.

2.1.2.3 Estimation du coût différentiel

L'estimation du coût différentiel nécessite qu'on commence par déterminer les conséquences physiques des décisions alternatives étudiées (Wouters, 1991), à la fois dans l'espace et dans le temps. Les problématiques décisionnelles traitées dans les modèles de décision peuvent concerner n'importe quel maillon de la CL : production, gestion des stocks, transport, *pricing*, design de réseaux, etc. L'analyse des conséquences physiques consiste à identifier les parties impactées de la CL et les ressources consommées. Elle détermine ensuite les variables d'état qui doivent être évaluées et prises en compte dans la fonction-objectif du modèle de décision : voir si les décisions engendrent des coûts de production, des coûts de lancement, des coûts de stockage, des coûts de transport, des coûts de pénalité, des coûts de rupture, etc. En outre, le coût différentiel doit inclure tous les coûts, à l'exception des coûts futurs qui sont similaires et encourus dans toutes les décisions alternatives futures et des coûts irrécupérables puisqu'ils ne peuvent être évités quelle que soit la décision choisie (Harrison et Shanteau, 1993). Il devient nécessaire de comprendre le comportement et la structure (contenu) des coûts pour simuler les coûts des alternatives de décision.

Le périmètre d'une décision peut être soit interne (ordonnancement de la production, localisation de plusieurs usines, transport…), soit aller au-delà des frontières de l'organisation (gestion des interrelations). Le périmètre physique sur lequel se propage l'effet des décisions alternatives définit l'étendue du coût différentiel. Le premier cas (périmètre interne) se contente du système de comptabilité de gestion de l'entreprise (intra-costing). En revanche, le second cas nécessite un système de calcul des coûts inter-organisationnel (inter-costing) dans lequel les organisations concernées doivent étendre leurs programmes de gestion des coûts au-delà de leurs frontières organisationnelles (Cooper et Slagmulder 1998 ; Kulmala *et al*., 2002 ; Schulze *et al.,* 2012). Dans le cas de l'inter-costing, les systèmes de comptabilité de gestion de deux entreprises coopérantes sont rarement similaires, leurs hypothèses implicites sous-jacentes sont probablement différentes. La différence entre les deux approches entraîne des coûts manquant de précision et des pratiques inefficaces (Kulmala *et al.,* 2002). Selon Gulati et Singh (1998), la conception de l'inter-costing nécessite de se concentrer non seulement sur l'utilisation prévue des informations sur les coûts, mais aussi sur la structure la CL. C'est pourquoi la création de

méthodes appropriées pour les questions décisionnelles de partenariat a été l'un des défis de la comptabilité de gestion. En outre, la coopération entre un fournisseur et un client est fondée sur la confiance et leur volonté de partager les informations fournies par leurs systèmes de comptabilité de gestion, en plus de leur capacité à travailler ensemble (Mouritsen *et al.*, 2001 ; Agndal et Nilsson 2009 ; Fayard *et al.*, 2014). Kulmala *et al.* (2002) soulignent que cette volonté de partager l'information (fiabilité) ne suffit pas ; il faut qu'il y ait des approches spécifiques pour générer des informations pertinentes sur les coûts, adaptées au contexte de l'inter-costing.

2.2 *Méthodologie de la revue de littérature*

Rappelons que l'objectif ultime de cette section est de passer en revue un ensemble d'articles pour voir : *i)* dans quelle mesure les auteurs nous informent des difficultés méthodologiques liées à l'utilisation de l'évaluation économique dans leurs modèles de décision ; et *ii)* sur la base du cadre théorique présenté, quels sont les défis des modèles de décision en termes d'évaluation économique. Dans cette sous-section, nous décrivons la méthodologie adoptée dans cette revue de littérature critique.

Nous avons repris la méthodologie adoptée par Maestrini *et al*. (2017) qui s'étaient également appuyés sur des revues systématiques antérieures pertinentes dans le domaine du management des opérations (ex. Hart, 1998 ; Bryman, 2012). Nous avons commencé par : *i)* identifier les articles, par la suite *ii)* sélectionner les articles, *iii)* évaluer les articles et enfin *iv)* les analyser.

2.2.1 Identification des articles

Pour la recherche des articles, nous nous sommes appuyés sur la base *Business Source Complete* (BSC). Comme nous nous intéressons à l'étude de la cohérence entre le modèle de décision développé et le modèle économique utilisé, nous avons utilisé les mots-clés "*Supply Chain Management*", "*Mathematical Model*", "*Simulation Model*" et "*Economic Model*". Lorsque nous avons tapé les quatre mots-clés en une seule fois, cela a donné 93 articles, dont la majorité est fondée sur des modèles de simulation-mathématiques combinés. Pour élargir la plage de recherche des articles, nous avons utilisé deux combinaisons de mots-clés, dans la première nous avons utilisé "Supply Chain Management", "Mathematical Model" et "Economic Model", et dans la seconde combinaison nous avons remplacé "Mathematical Model" par "Simulation

Model". La recherche de ces mots-clés a porté sur des articles complets, y compris leurs résumés et leurs mots-clés.

L'utilisation de deux combinaisons de mots-clés a donné un total de 1225 articles. Pour tomber sur un nombre raisonnable d'articles pertinents, nous avons limité le nombre de revues de publication. Nous nous sommes appuyés sur le site du SJR. Nous avons étudié le champ d'intérêt de chaque revue et son Indice H. Nous avons pris en compte les revues suivantes : IJPE (International Journal of Production Economics), IJPR (International Journal of Production Research), POM (Production and Operations Management), OMEGA (International Journal of Management Science) et PPC (Production Planning & Control) dont l'indice H varie entre 61 et 141. Nous avons également limité la période de publication, nous nous sommes contentés de la période entre 2013 et 2018. Nous avons donc obtenu un échantillon de 200 articles.

2.2.2 Sélection des articles

Nous avons fixé des critères pour sélectionner les articles pertinents à prendre en compte dans la présente revue. Nous avons choisi des articles qui présentent un modèle de décision ayant pour objectif d'aider les utilisateurs à prendre des décisions relatives à un sous-système d'une CL. Il faut donc qu'il y ait des variables de décision explicites qui déterminent les caractéristiques (fonctionnement ou design) de ce système. Nous avons discuté et défini les critères de sélection avec le directeur de thèse. Nous avons fait la sélection sur la base du résumé, de la conclusion et, éventuellement, de l'introduction. En conséquence, nous avons sélectionné un échantillon de 110 articles.

2.2.3 Évaluation des articles

L'étape de l'évaluation consiste à classer les articles selon les dimensions jugées pertinentes à l'analyse. Ces dimensions ont été définies sur la base du cadre théorique présenté ci-dessus. Les attributs de la grille ont été révisés au fur et à mesure de la lecture des articles, et la version finale est présentée dans le tableau 12 :

Cette classification nous permet de voir comment les articles portant sur les modèles sont distribués sur les journaux sélectionnés. Par la suite, nous présentons les articles : nous les classons selon les différents niveaux de décision, domaine du problème, périmètre physique,

degré de certitude des informations et comment les modèles présentés traitent les contraintes de capacité. La classification des articles sur les différents niveaux de décision est fondée sur le degré d'engagement (facilement réversible ou non) des décisions étudiées et leur impact sur le scope de l'entreprise (Shivakumar, 2014). Contrairement à Ganeshan *et al.* (1999) qui ont attribué un domaine de problème décisionnel spécifique à chaque niveau de décision, nous acceptons qu'un même domaine de problème puisse concerner différents niveaux de décision générés par des questions et des horizons temporels variés. Par exemple, la planification et l'ordonnancement de la production concernent respectivement les niveaux tactique et opérationnel. Un autre exemple concerne le VMI (*Vendor Managed Inventory*) : la décision relative à la comparaison entre le VMI et le système traditionnel (quelle politique adopter) est une décision tactique. Cependant, la gestion quotidienne du VMI est assurée au niveau opérationnel. Notez que très peu des modèles examinés semblent aborder deux niveaux de décision différents, nous avons choisi de les affecter à un seul niveau de décision.

Ensuite, dans chaque article, nous avons analysé la fonction économique sur laquelle repose le coût différentiel entre les alternatives de décision : nous relevons les critères de décision adoptés, l'impact des décisions (les variables d'état évaluées, le comportement des coûts et les contextes intra et inter-costing) et les concepts de coûts utilisés.

Tableau 12: grille d'analyse des articles

Attribut	Valeurs possibles	Références
Journal de publication	IJPE, IJPR, POM, OMEGA, PPC	(Maestrini et al., 2017)
Caractéristiques du modèle physique	• Niveau décisionnel : startégique, tactique, opérationnel •Domaine du problème (design, planification de la capacité, planification, approvisionnement, transport, supplier selection fournisseurs, pricing) • Contraintes de capacité considérées or relaxées) • Environnement (certain, stochastique or incertain) • Périmètre physique	(Anthony, 1965; Ganeshan et al., 1999; Schmidt and Wilhelm, 2000; Shivakumar, 2014) (Ganeshan et al., 1999; Capar et al., 2004) (Van Mieghem, 2003) (Wierman, 2010)
Critère de la décision	• Physique • Economique (Coûts ou profit)	(Shillinglaw, 1963), (Bouquin, 1997), (Lucey, 2003; Van Mieghem, 2003)
Impact de la décision	**Variables d'etat évaluées :** • Coût de production • Coût de stockage • Coût de transport • Coût d'achat • Coût de rupture, ect.	(Giard, 2017)
	Inducteurs d'activités: • Niveau infrastructure • Niveau produit • Niveau lot • Niveau unité Concepts de coûts: Coût d'opportunité, costs	(Cooper and Kaplan, 1988) (Clark, 1923; Andreani, 1967)
	• **Intra** versus **inter** costing	(Kulmala et al., 2002)

2.2.4 Analyse des articles

Cette étape consiste à analyser les articles sélectionnés afin de discuter des principaux résultats.

Nous nous sommes appuyés sur la grille d'analyse pour construire des groupes d'articles, puis nous avons examiné leurs caractéristiques. L'objectif final est de mettre en évidence, par une analyse critique, les problèmes méthodologiques rencontrés lorsque les auteurs alimentent leurs modèles par des informations sur les coûts.

2.3 *Résultats de la revue*

Dans cette section, nous présenterons les principaux résultats obtenus à partir de l'analyse des articles passés en revue. Nous commençons par présenter la distribution des articles sur les revues de publication. Dans la partie 2.3.2, nous présentons les articles. La partie 2.3.3 présente les critères de décision adoptés dans l'évaluation des décisions. La partie 2.3.4 est consacrée à la compréhension de la manière dont les auteurs abordent le calcul du coût différentiel dans leurs modèles en fonction de l'impact des alternatives de décision et de la pertinence des concepts de coût.

2.3.1 Revues de publication

Notre analyse a porté sur un nombre final de 110 articles. Leur distribution sur les journaux de publication est présentée dans le tableau 13 :

Tableau 13 : revues de publication des articles

Revue de publication	IJPE	IJPR	OMEGA	POM	PPC
%	47%	41%	8%	3%	1%

2.3.2 Présentation des articles

22% des articles analysés traitent des problématiques stratégiques, 52% traitent des problématiques tactiques et 28% traitent des problématiques opérationnelles. La figure 38 ci-dessous présente, pour chaque niveau de décision, la distribution des articles sur différents domaines de problèmes en SCM.

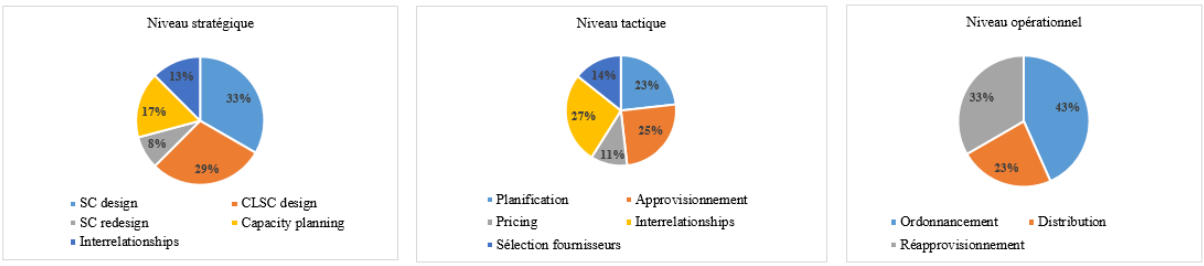

Figure 38 : Distribution des articles sur les domaines de problèmes

Pour chaque niveau de décision et dans chaque domaine de problème, les tableaux 14, 15 et 16 passent en revue la question décisionnelle traitée dans chaque article, le périmètre physique, la nature de l'environnement et la manière dont les contraintes de capacité sont prises en compte dans le modèle.

Tableau 14 : Présentation des articles de modèles stratégiques

Domaine du problème	Question décisionnelle traitée	Contraintes de capacité	Nature de l'environnement	Périmètre physique	Auteurs
SC Design	Design d'un réseau (localisation des unités de production et des entrepôts à ouvrir), définition de leurs capacités et des quantités de transferts des flux de matières entre les maillons de la CL	Définies par le modèle	Stochastique	Fournisseus, usines de production, entrepôts et points de vente	Govindan and Fattahi (2017)
	Design d'un réseau (localisation des unités de production et des entrepôts et des centres de distribution (CD) à ouvrir), définition des quantités de transferts des flux de matières entre les maillons de la CL	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines, entrepôts et CDs	Nurjanni et al. (2017)
	Sélection des fournisseurs et de centres de distribution, affectation de fourinisseurs au CDs, en minimisant les coûts fixes de sélection de chaque fournisseur et de mise en place de chaque CD ainsi que les coûts d'acquisition	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Fourinisseurs, CDs	von Massow and Canbolat (2014)
	Design de la CL énergétique : appliquer des modèles d'optimisation de design de CL au secteur énergétique des pays en développement afin d'atténuer leur situation "riche en ressources et pauvre en énergie": sélection des réserves, emplacement des centrales électriques, approvisionnement en charbon et distribution de l'énergie.	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Réserves de charbon, centrales électriques et Points de consommation	Rafique et al (2017)
	Configuration d'une CL : choisir l'option à chaque stade d'un réseau CL. Un stade peut être l'approvisionnement, la production ou le transport, une option signifie quel fournisseur, quelle usine de production ou quel mode de transport	Prédéfinies comme des contraintes	Stochastique	Fournisseurs, manufacturiers (composants) et usines d'assemblage	Moncayo-Martinez and Zhang (2013)
	Configuration d'une CL agroalimentaire verte: sélection de points de transit, à partir d'une liste de points potentiels, pour relier les entrepôts centraux aux zones clients, en minimisant les coûts de transport et les émissions de carbone	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Entrepôts, points de transit et zones clients	Colicchia et al. (2016)
	Design d'une CL résiliente, en proposant des stratégies de restauration efficientes faisant face aux perturbations de la CL	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines, entrepôts et zones clients	Gong et al. (2014)
	Porduction cellulaire dans une CL: quelles usines utiliser et affecter à chaque usine un nombre de machines et d'opérateurs	Prédéfinies comme des contraintes	Incertain	usines, entrepôts et transport	Aalaei and Davoudpour (2017)
CLSC design	Localisation et allocation dans une Closed loop Supply Chain (CLSC)	Prédéfinies comme des contraintes	Stochastique	Fournisseurs, manufacturiers, entrepôts, distributeurs, détaillants , centres d'assemblage, redistributeurs, centres de collecte	Soleimani et al. (2014)
	Détermination des usines de production à ouvrir par période et les flux de matières entre les maillons d'une CLSC	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Fournisseurs, usines, détaillants, consommateurs, centres de collecte, centres de désassemblage, centres de rénovation	Özceylan and Paksoy (2013)
	Proposition d'un réseau CLSC pour une entreprise de fabrication et évaluation du réseau proposé en termes de viabilité des processus de fabrication	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines (composants) , centres d'assemblage, entrepôts, CDs, consommateurs	Govindan et al. (2016)
	Design d'une CLSC verte: localisation des unités de production et de recyclage et des centres de collecte et de distribution, en considérant l'empreinte carbone	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines de production, CDs, consommateur, centres de collecte, centres de tri, unités de recyclage	Choudhary et al. (2015)
	Design et plannification du réseau (nœuds à ouvrir par période et quantités de flux de transferts entre les maillons de la CL)	Prédéfinies comme des contraintes	Incertain	Fournisseurs, usines d'assemblages, entrepôts, concessionnaires et centres collecte	Shankar et al. (2018)
	Design de réseau: niveau de production dans chaque maillon: dans quelles conditions la CLSC est avantageuse	Prédéfinies comme des contraintes	Incertain	Les maillons d'une CLSC (fournisseurs, fabricant de composants, usines d'assemblage et de désassemblage…)	Gaur et al. (2017)
	Identification de la stratégie (remanufacturing pur, pure production de nouveaux produit ou stratégie mixte) la plus viable. Comparaison entre différents scénarios sur la base des coûts totaux d'exploitation et de la satisfaction de la demande	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines de production, entrepôts, recyclage, rénovation, remanufacturing	Tahirov et al. (2016)
SC redesign	Réallocation des capacités (quantité de capacité à transférer d'une usine à une autre et transferts des flux de matières depuis les fournisseurs)	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Usines de production et fournisseurs	Hammami and Frein (2014)
	Comparaison entre la fabrication traditionnelle et la fabrication additive de pièces de rechange dans une CL, sur la base des coûts totaux et des émissions de carbone	Prédéfinies comme des contraintes	Certain	Plusieurs étapes de la production	Li et al. (2017)
Capacity Planning	Définition des capacités de production et de stockage dans un établissement pénitentiaire (compromis entre les investissements de capacité et les pénalités de rupture de stock)	Définies par le modèle	Incertain	Usine de production	Luangkesorn et al. (2016)
	Comparaison de différentes stratégies de satisfaction client : Sous-traitance versus extension des capacités ou amélioration des rendements de processus	Définies par le modèle	Stochastique	Unités de production et sous-traitants	Sinha et al. (2016)
	Comparison de différentes stratégies: sous-traitance versus extension des capacités	Définies par le modèle	Incertain	Usines de production	Wang et al. (2013)
	Définition des stocks aux différents maillons d'une CL	Définies par le modèle	Stochastique	Plusieurs maillons d'une CL	Fernandes et al. (2013)
Interrelationships	Investissement dans les technologies de conservation des produits périssables du côté du détaillant	-	Certain	Manufacturier et le détaillant	Zhang et al. (2015)
	Evaluation d'un réseau de chaînes de valeur en utilisant la simulation à événements discrets	Prédéfinies comme des contraintes	Stochastique	Fournisseurs, manufacturiers, CDs, clients	Daaboul et al. (2014)
	Construction de relations d'achat verte : comparaison des scénarios de différentes catégories de fabricants et de fournisseurs impliqués dans le recyclage	-	Incertain	Manufacturiers et fournisseurs	Ji et al. (2015)

33 % des modèles stratégiques étudiés (24), présentés dans le tableau 14, considèrent le niveau de capacité comme une variable de décision dans leurs modèles. Par exemple, Govindan *et al.* (2016) et Govindan et Fattahi (2017) abordent les questions de design de CLs, leurs modèles visent à définir l'emplacement des nœuds d'un réseau CL et à déterminer le niveau de capacité dans chaque nœud. Hammami et Frein, (2014) et Li *et al*, (2017) s'intéressent à la reconfiguration de CLs. Le premier détermine la quantité de transfert de capacité entre un ensemble d'usines existantes et le second définit le nombre et le type de machines dans lesquelles il faut investir pour passer de la fabrication traditionnelle à la fabrication additive de pièces de rechange. Les modèles de Fernandes *et al*. (2013) et de Luangkesorn *et al.* (2016) définissent les capacités de production et de stocks. Enfin, Wang *et al*. (2013) et Sinha *et al*. (2016) s'intéressent à la définition du niveau des extensions de capacité par rapport à la stratégie de sous-traitance. En revanche, dans 58 % des modèles stratégiques examinés, le niveau de capacité est défini au préalable et pris en compte comme une contrainte dans le modèle. Par exemple, Nurjanni *et al*. (2017), Moncayo-Martínez et Zhang (2013), Özceylan et Paksoy (2013) et Gaur *et al*. (2017), même s'ils s'intéressent à des questions liées à la conception et à la configuration de CLs, les capacités des nœuds potentiels de la CL étudiée sont considérées comme des paramètres dans le modèle.

Tableau 15 : Présentation des articles de modèles tactiques

Domaine du problème	Question décisionnelle traitée	Contraintes de capacité	Nature de l'environnement	Périmètre physique	Auteurs
Planification	Gestion des stocks de pièces de rechange dans un réseau multi-sites, en minimisant les coûts de stockage, de réparation et de transport	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Réseau de pièces de rechange multi-échelon	van der Heijden et al (2013)
	Planification de la production dans un réseau multi-sites avec interaction verticale, en minimisant les coûts de rupture et de l'excès du stock (valeur résiduelle de produits)	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Réseau multi-sites	Dobhan and Oberlaender (2013)
	Planification dans une CLSC : récupération des produits en fin de vie et planification du remanufacturing, en maximisant le profit attendu	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Centre de collecte/inspection, centre de désassemblage, centre de remanufacturing, centre de rénovation et centre de recyclage	Wang and Huang (2013)
	Plan de transport avec consolidation et délais de livraison incertains, en minimisant les coûts	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Multiple zones client	Leung et al. (2013)
	Planification de la production et de l'approvisionnement dans un système coordonné de fournisseurs et de détaillants, avec fluctuation de la demande	Capacité supposée supérieure à la demande	Stochastique	Fournisseurs et détaillant	Paul et al. (2014)
	Planification de la production sur un horizon glissant (production par stade par période), en minimisant les coûts de lancement, de production, de stockage et de backlogging	Considération de contraintes de capacité	Certain	Deux stades d'une CL	Nedaei and Mahlooji (2014)
	Planification intégrée des stocks et de la production, dans un système composé d'un seul fournisseur et d'un seul acheteur, en considérant des taux de production variables et la possibilité de détérioration des produits, en minimisant des coûts de lancement, de production, de stockage et de détérioration	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Stochastique	Un fournisseur et un acheteur	Chan et al. (2017)
	Comparaison entre la planification intégrée et locale dans une entreprise multi usines en fonction des coûts de production, de stockage et de transport, et en fonction de la performance en termes de niveau de service (retard)	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Réseau multi-sites	Acar and Atadeniz (2015)
	Coordinnation des ventes et la planification des opérations dans la CL automobile, définition du stock de sécurité, prise en compte des coûts de stockage et d'urgence et de la satisfaction des clients (nombre de commandes retardées)	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Département de vente et plusieurs usines de production	Lim et al. (2014)
	Planification de la CL tenant en compte de la fiscalité et la législation sur le carbone : usines et entrepôts à ouvrir, quantité à produire pendant les heures normales et pendant les heure supplémentaires et transferts de matières entre usines et entrepôts, minimisation des coûts fixes, de transport, de stockage, de rupture et d'émission de carbone	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs usines, plusieurs entrepôts	Fahimnia et al. (2015)
	Planification des capacités et ordonnancement des ordres de fabrication à court terme	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Une usine de production	Gansterer et al. (2014)
	Planification des capacités : détermination du niveau des stocks, détermination des commandes à accepter et à rejeter, en maximisant le pourcentage de demandes satisfaites	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Entrepôt	Hung and Hsiao (2013)
	Planification de la distribution et du transport, en minimisant les délais de livraison	Considération de contraintes de capacité	Certain	Fournisseurs, usines, CDs, zones clients	Ivanov et al. (2015)
Approvisionnement	Problème de lot-sizing dans un système de vendeur acheteur en considérant une politique de consignation du stock et logistique inverse sur un horizon infini: détermination du nombre et de la taille des lots, en minimisant les coûts de lancement, de production et de stockage	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Vendeur (production, remanufacturing, collecte, tri et et élimination de déchets). Acheteur (stock)	Jaber et al. (2014)
	Problème d'approvisionnement dans le cas de plusieurs fournisseurs, un seul produit et un seul acheteur : comparaison entre les livraisons immédiates et les livraisons différées, minimisation des coûts de commande, de transport et de stockage	Considération de contraintes de capacité	Certain	Un seul acheteur et plusieurs vendeurs	Beck et al. (2017)
	Problème d'approvisionnement dans une brasserie confrontée à la variabilité du prix de l'aluminium et à une demande de bière incertaine (détermination des quantités d'aluminium à acheter, des options financières et du niveau des stocks), minimisant les coûts d'opportunité anticipés	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Fournisseur, usine de production (brasserie) et CD	Bandaly et al. (2016)
	Approvisionnement d'un seul produit: comparaison entre la quantité économique de commande (economic order quantity (EOQ)) et l'EOQ durable: considération de l'impact des émissions pendant le cycle de vie de produit et les coûts de transport	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Entité d'approvisionnement	Battini et al. (2014)
	Problème combiné de réapprovisionnement, de production et de fixation des prix dans le cadre d'un approvisionnement aléatoire et d'une demande sensible au prix : détermination de la quantité de matières premières, de la quantité de production et de la fixation des prix pour chaque période, en maximisant le bénéfice escompté	Deux cas: considération et relaxation contraintes de capacité	Stochastique	Une usine de production	Zhu (2013)
	Détermination de l'EOQ en cas de problèmes de qualité et possibilité de commande en attente, en minimisant les coûts totaux anticipés	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement	Salehi et al. (2016)
	Coordination d'une CL composée d'un fabricant et de n détaillants en cas de perturbations des coûts et de la demande : comment coordonner la planification de la production après une perturbation, en maximisant le profit total du système	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Un seul fabricant et plusieurs détaillants (concurrents)	Cao et al. (2013)
	Gestion des stocks (EOQ) : détermination du stock de sécurité en cas de demande régulière et de demande d'urgence, minimisation des coûts de commande, de transport de stockage et des coûts liés à l'énergie	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement	Bono et al. (2014)
	Gestion de l'espace des rayons chez un détaillant en fonction d'une demande élastique à l'espace (les ventes augmentent lorsque les produits sont plus visibles), en minimisant les coûts d'achat, de pénalité et la valeur résiduelle (de produits non vendus)	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Rayons d'un détaillant	Schaal and Hübner (2018)
	Planification de la production et des stocks dans toute une CL, y compris la logistique inverse, en minimisant le coût total de lancement, de stockage et de production	Considération de contraintes de capacité	Certain	Fournisseur des matières premières, Fournisseurs de composants, producteur, CD, détaillant, centre de collecte	Jonrinaldi and Zhang (2013)
	Gestion du stock du sang (quantité de chaque type de sang par période), en minimisant les coûts de commande, de stockage, de test, de rupture et d'expiration	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement du sang	Dillon et al. (2017)
	Dans quelles conditions la politique de commande équilibrée (les détaillants commandent à tour de rôle librement pendant une période et reçoivent une quantité fixe pendant une autre période) réduit les coûts totaux d'une CL décentralisé, en minimisant les coûts de stockage, de commandes en attente et de dépenses supplémentaires	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Un fournisseur, deux acheteurs	Chen and Gavirneni. (2013)
	Modèle de gestion des stocks qui minimise les coûts tout en maintenant un niveau de service élevé, selon deux modes de réapprovisionnement : régulier et d'urgence : dans chaque mode, déterminer le point de commande et l'EOQ, en minimisant les coûts de stockage, de commande et de rupture	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement	Roni et al. (2016)
	Prise de décision en matière d'achat de pétrole brut dans un contexte de prix volatils, en minimisant la somme des coûts anticipés	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement	Xie et al. (2013)

Tableau 15 (Suite) : Présentation des articles de modèles tactiques

Domaine du problème	Question décisionnelle traitée	Contraintes de capacité	Nature de l'environnement	Périmètre physique	Auteurs
Pricing	Problème combiné de pricing et de réapprovisionnement dans une CL contenant un fabricant et un détaillant, où le système de production est imparfait possibilité de rework) et où la demande est sensible aux prix : comparaison entre les stratégies de coopération et de non-coopération entre les deux acteurs, pour maximiser le profit	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Single manufacturer and single retailer	Chen (2017)
	Modèle de marketing : fixation des prix et détermination de la durée du cycle de stockage, en maximisant le profit	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Single vendor, single retailer	Ghasemy Yaghin et al. (2014)
	Comment un détaillant doit utiliser ses décisions en matière de commande et de prix pour répondre aux réductions de prix temporaires proposées par son fournisseur, en minimisant les coûts d'achat, de commande et de stockage	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Entité d'approvisionnement (détaillant)	Xia (2016)
	Comprendre les incitations des détaillants en aval en termes de prix et de stocks dans une CL décentralisée, et explorer les différents contrats qui permettent d'atteindre l'efficacité : maximiser le profit, déterminer le prix de gros et l'EOQ de chaque détaillant	-	Stochastique	Un seul fabricant, deux détaillants (concurrents)	Shao et al. (2013)
	Problème combiné de princing et de gestion de l'espace des rayons dans une CL, contenant deux fabricants et un détaillant, où les produits des deux fabricants ont un potentiel marché non symétrique: le détaillant détermine l'espace disponible dans ses rayons, les fabricants déterminent leurs prix de gros et le détaillant détermine l'EOQ à approvisionner de chaque fournisseur et le prix de détail, en maximisant le profit de chacun des acteurs	Considération de contraintes de capacité	Certain	Deux fabricants, un seul détaillant	Wang et al. (2015)
	Étudier l'impact du prix de référence sur le comportement des consommateurs dans le cadre de différentes stratégies de coordination (produits saisonniers) : pourcentage de réduction du prix de référence et le niveau des ventes en période normale	-	Certain	Un fournisseur et un détaillant	Zhang et al. (2014)
Relationship management	L'étude de l'effet de la variété des produits sur la CL inverse : détermination de l'EOQ des produits à remanufacturer. Comparaison entre les stratégies de production, interne et de sous-traitance, fondée sur la maximisation des profits	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Usine de remanufacturing	Huang and Su (2013)
	Comparaison entre l'achat individuel et l'achat groupé en fonction du profit	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Un fournisseur, deux détaillants	Zhou and Xie (2014)
	Coordination entre le fournisseur et le détaillant : déterminer le prix de gros, l'EOQ et la concession que doit faire chcun du fournisseur et du détaillant pour maximiser le profit total, en tenant compte des coûts de production, de sauvetage et des pénalités de rupture	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Un fournisseur, un détaillant	Xu and Meng (2014)
	Comparaison entre les différentes stratégies des fournisseurs et des détaillants par rapport au coût total : *(i)* le vendeur et les acheteurs agissent indépendamment, *(ii)* le vendeur établit un partenariat de consignation des stocks géré par le vendeur (VMI&CS) avec les acheteurs et *(iii)* le vendeur et l'acheteur appartiennent à une entreprise verticalement intégrée où un seul décideur décide des politiques de commande	Deux cas: considération et relaxation de contraintes de capacité	Certain	Un fournisseur, plusieurs acheteurs	Ben-Daya et al. (2013)
	Étudier l'impact des perturbations sur les coûts et sur la demande dans une CL d'un seul fabricant et plusieurs détaillants (concurrents) avec contrat de partage des recettes (prix de gros, part bénéficiaire, l'EOQ (détaillant)) : comparaison entre les politiques centralisées et décentralisées, en tenant compte des coûts de production, de lancement de la production, de commande et de stockage	Relaxation de contraintes de capacité	Incertain	Un vendeur, plusieurs acheteurs	Cao et al. (2015)
	Comparaison entre la stratégie VMI&CS et le système traditionnel dans une CL composée d'un seul fabricant et d'un seul détaillant, en considérant le coût total de commande, de lancement de la production et stockage en plus de la taxe sur les émissions de gaz à effet de serre	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Certain	Un vendeur, un détaillant	Zanoni et al. (2014)
	Comparaison entre le VMI et le système traditionnel, en minimisant les coûts de commande, de production, de lancement, de stockage et de transport (EOQ)	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Stochastique	Un vendeur, un détaillant	Kannan et al. (2013)
	Etude du système VMI en considérant une pénalité appliquée quand le niveau du stock dépasse la limite définie par l'acheteur	Considération de contraintes de capacité du côté de l'acheteur Relaxation de contraintes de capacité du coté du vendeur	Certain	Un vendeur, un détaillant	Chakraborty et al. (2015)
	Comparaison entre le VMI et le système traditionnel, fondée sur la minimisation des coûts de commande, de lancement de la production, de stockage de transport et de commandes différées	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Stochastique	Un vendeur, deux détaillants	Rad et al. (2014)
	Comparaison entre les stratégies coopératives et non coopératives entre le fournisseur et le détaillant : Détermination de l'ordonnancement de la production et de d'expédition en minimisant le coût total commun de l'acheteur et du vendeur	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Un vendeur, un détaillant	Bylka (2013)
	Application d'une politique VMI fractale où une fractale est un ensemble d'agents auto-similaires dont le but peut être atteint par la coopération, la coordination et la négociation avec les autres : EOQ et quantité de transbordement entre les fractales, en minimisant les coûts de commande, de stockage de transport et de commande en attente	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Manufacturier, CD, détaillant	Ryu et al. (2013)
	Comparaison entre les politiques centralisée et décentralisée entre le fabricant et le remanufacturier, en maximisant le profit	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Fabricant, remanufacturier	Zhou et al. (2013)
	Dans un système comprenant un détaillant, un fabricant, un fournisseur et un collecteur, comparer différentes stratégies de coordination *i)* entre tous les membres, *ii)* uniquement entre le collecteur et le fabricant, *iii)* uniquement entre le fabricant et le fournisseur...en maximisant le profit	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Détaillant, fabricant, fournisseur, centre de collecte	Yuan et al. (2015)
	Comparaison entre le VMI dans le transport maritime et le contrat d'affrètement traditionnel : acheminement et stockage des cargaisons	Considération de contraintes de capacité	Certain	Affréteur, compagnie maritime	Stålhane et al. (2014)
	Comparaison entre différentes stratégies de combinaison de contrats entre un fabricant, un distributeur et un détaillant : 1) ne pas utiliser de contrats, 2) utiliser des contrats de rachat (buyback), ou 3) utiliser des contrats de partage des recettes, en maximisant le profit	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Fabricant, distributeur, détaillant	Meng et al. (2017)
Supplier selection	La sélection des fournisseurs et l'affectation de commandes aux fournisseurs dans une CLSC, en maximisant le profit et en minimisant le nombre de pièces défectueuses achetées auprès des fournisseurs, le nombre total de pièces livrées en retard et les facteurs de risque économique des fournisseurs candidats	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Fournisseur, installations de fabrication/rénovation, de désassemblage et d'élimination des déchets	Moghaddam et al. (2015)
	Sélection de fournisseurs et approvisionnement (EOQ par fournisseur sélectionné) avec remise en fonction de la quantité (prix dépendant de l'EOQ), minimisant le coût total de commande, de stockage et les coûts d'achat	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Une usine de production	Kang and Lee (2013)
	Sélection de fournisseurs et approvisionnement durables (EOQ), en minimisant les coûts d'achat, de commande et de stockage et en maximisant les scores qualitatifs environnemental, social et économiques des fournisseurs	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Une usine de production	Azadnia et al. (2015)
	Sélection des fournisseurs sous risque de perturbation, en minimisant les coûts d'achat, de commande et de rupture	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Stochastique	Une usine de production	Fang et al. (2016)
	Sélection des fournisseurs sur la base du prix d'achat, des produits défectueux et des délais	Considération de contraintes de capacité du côté du vendeur Relaxation de contraintes de capacité du coté de l'acheteur	Incertain	Une usine de production	Jadidi et al. (2014)
	Sélection multicritères des fournisseurs en tenant compte de la remise sur quantité	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une usine de production	Babić and Perić (2014)
	Sélection multicritères de fournisseurs où plusieurs parties prenantes sont prises en compte avec des intérêts multiples, en maximisant le score de satisfaction des parties prenantes	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Une usine de production	Scott et al. (2015)
	Sélection des fournisseurs sur la base de la qualité et du rendement de processus	-	Stochastique	Une usine, deux fournisseurs	Wu et al. (2013)

Parce que la définition des capacités est une question stratégique, nous passons en revue les modèles traitant des problématiques tactiques ou opérationnelles (présentés dans les tableaux 15 et 16), selon que les contraintes de capacité sont prises en compte ou relaxées. Concernant le niveau tactique (tableau 15), dans 39 % des articles examinés (56), les contraintes de capacité sont relaxées dans le modèle. La majorité de ces articles définissent la quantité de commande économique (*Economic Order Quantity* (EOQ)) dans des problématiques d'approvisionnement, de *pricing* ou de gestion d'interrelations (ex. Dillon *et al*., 2017 ; Meng *et al*., 2017 ; Jaber *et al.*, 2014) sans tenir compte de la capacité des stocks. Un autre exemple est celui de Dobhan et Oberlaender, (2013) qui s'intéressent à la planification d'une CL. Leur modèle définit le niveau de production dans chaque usine sans tenir compte de la capacité maximale de production. Paul *et al*. (2014) mentionnent que la capacité est supposée être supérieure à la demande. Dans 39 % des modèles tactiques examinés, les contraintes de capacité sont prises en compte dans le modèle. Dans 13% des modèles, soit la capacité de production du vendeur, soit la capacité du stock de l'acheteur est relaxée et non les deux. 4 % des modèles examinés (Zhu, 2013 ; Ben-Daya *et al.*, 2013) étudient à la fois les cas de contraintes de capacité relaxée et non relaxée. Dans le reste des modèles tactiques (5 %), la capacité n'a pas d'impact dans la question décisionnelle traitée (Shao *et al*., 2013 ; Wu *et al*., 2013 ; Zhang *et al*., 2014).

En ce qui concerne le niveau opérationnel, 77 % des articles opérationnels examinés (tableau 16) tiennent compte des contraintes de capacité dans leurs modèles, tandis que dans 23% de ces articles les contraintes sont relaxées.

Tableau 16 : Présentation des articles de modèles opérationnels

Domaine du problème	Question décisionnelle traitée	Contraintes de capacité	Nature de l'environnement	Périmètre physique	Auteurs
Ordonnancement	Problème d'ordonnancement dans une seule machine. Pour chaque produit, déterminer la fréquence des lots et la cadence de production	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une machine	Yan et al. (2013)
	Heuristique pour un ordonnancement intégré de la production et de la distribution, en minimisant le coût total de stockage (entrepôt et CD), d'expédition et de pénalité	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une usine, entrepôt, et CDs	Ma et al. (2013)
	Ordonnancement conjoint (fabricant et entreprise de conception collaborative) dans réseau SC en plusieurs stades, en minimisant les coûts de production, de stockage, de transport et de retard de livraison	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Fabricant, entreprise de conception collaborative	Tang et al. (2013)
	Ordonnancement des tâches et des opérations de modernisation sur un ensemble de machines, en minimisant les coûts de modernisation et en maximisant le niveau de service	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Ivanov and Sokolov (2013)
	Ordonnancement dans un processus de production (taille du lot et temps de démarrage) en présence de l'effet d'apprentissage (le temps de production moyen par unité diminue à mesure que la taille du lot augmente), en minimisant les coûts de lancement, de main-d'œuvre et de stockage	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une machine	Neidigh and Harrison (2013)
	Ordonnancement dynamique des ordres de fabrication en cas de variabilité des délais de transport (en cas de retard dans la livraison de certaines matières premières, mettre à jour l'ordonnancement), en minimisant les coûts de lancement, d'heures supplémentaires et des pénalités de retard	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Une machine	Mogre et al. (2014)
	Programmation de la production d'un seul produit dans des machines parallèles en production pour stock : taille des lots et taux de production dans chaque machine, en minimisant les coûts de lancement, de porduction, de stockage et de transport	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Kim and Glock (2018)
	L'ordonnancement des commandes d'un produit dans une machine, où les clients sont sensibles à la date de livraison (le prix n'est pas le même pour les commandes),en maximisant le profit	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une machine	Jin et al. (2013)
	Problème de Flowshop, minimisant le temps total de fonctionnement de la machine	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Ivanov et al. (2016)
	Problème de Flowshop avec les tampons capacitaires (problèmes d'encombrement), minimisant l'utilisation des machines et des tampons	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Plusieurs machines	Almeder and Hartl (2013)
	Problème de Flowshop à réentrée (une tâche peut visiter une machine plus d'une fois), en minimisant le temps de traitement	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Amrouche et al. (2017)
	Problème d'ordonnancement intégré de la production et du transport sortant, maximisant le nombre de commandes livrées	Considération de contraintes de capacité	Incertain	Plusieurs machines	Ivanov et al. (2014)
	Problème d'ordonnancement intégré de la production et du transport, en minimisant la somme pondérée du temps moyen d'arrivée chez le client	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Wang et al. (2016)
Distribution	Gestion des camions pour transférer les flux de produits d'alimentation animale entre les provenderies et les fermes, en minimisant les coûts de stockage et de transport	Considération de contraintes de capacité	Certain	Plusieurs machines	Piewthongngam et al. (2013)
	Planification de la production et de la distribution (acheminement des véhicules) dans une CLSC : collecte du produit en fin de vie et processus de désassemblage, en minimisant les coûts d'acheminement de la collecte, de stockage, de désassemblage et les pénalité de la demande non satisfaite	Considération de contraintes de capacité	Certain	Usine de désassemblage et plusieurs centres de collecte	Habibi et al. (2017)
	Niveau des stocks de produits finis et d'articles de transport retournables (ATR) tant du côté des fournisseurs que du côté des acheteurs, en minimisant les coûts de stockage des produits et des ATR et les coûts de rupture	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Un fournisseur, un acheteur	Kim et al. (2014)
	Ordonnancement de la production et de la distribution des produits sortants (camion complet ou non), en minimisant les coûts de lancement de la production, les coûts de stockage et les coûts de transport (fixes et variables)	Considération de contraintes de capacité	Certain	Une usine	Sağlam and Banerjee. (2018)
	Problème combiné de lotsizing et d'acheminement : problème intégré de production, de stocks et d'acheminement, en minimisant les coûts delancement, de production, de stockage et d'acheminement	Considération de contraintes de capacité	Certain	Usine, stock, circuit de véhicule	Russell (2017)
	Affectation des quantités de transport par le prestataire de services logistiques (logistics services integrator (LSI) aux prestataires de services logistiques fonctionnels (functional logistics service providers (FLSP), en minimisant le total des coûts variables et fixes générés par les FLSP	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	LSI et plusieurs FLSPs	Liu et al. (2013)
	Adaptation du modèle de lotsizing capacitaire à d'autres problèmes logistiques (congestion dans les terminaux de bus, trafic dans les bureaux des aéroports)	Considération de contraintes de capacité	Certain	Bureaux d'un aéroport Terminal de bus	Bruno et al. (2014)
Réapprovisionnement	Politique (T,r,Q) : Réapprovisionnement dans une épicerie en fonction de la variabilité de la durée de vie des produits, en minimisant les coûts de commande, d'achat, de stockage et d'expiration.	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Stock (épicerie)	Kouki and Jouini (2015)
	Politique (s,S): réapprovisionnement et planification de chaque nœud dans réseau composé d'un distributeur et plusieurs détaillants (CL centralisée et décentralisée), en minimisant les coûts de commande de stockage et de retard des livraisons	Considération de contraintes de capacité	Certain	Un distributeur, plusieurs détaillants	Duan and Warren Liao (2013)
	Modèle intégré du calendrier de livraison dans un réseau composé d'un producteurs et de plusieurs d'acheteurs avec possibilité détérioration, en minimisant les coûts communs de lancement, de commande, de stockage, de commande en attente et de détérioration	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	un fournisseur, plusieurs détaillants	Wu and Sarker (2013)
	Réapprovisionnement mono période des articles froids (problème de stock (EOQ)), en minimisant les coûts de stockage au CD et de transport à partir de l'entrepôt en les coûts associés aux émissions	Considération de contraintes de capacité	Certain	Un entrepôt, un CD	Bozorgi et al (2014)
	Politique (R,S): planification du réapprovisionnement sous l'effet du crossover (variabilité des délais), détermination de R et S, en minimisant les coûts anticipés de commande, d'attente et de rupture	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Une usine	Bischak et al. (2014)
	Démontrer la nature PN-difficile du problème de lotsizing et étudier les conditions de son optimalité, en minimisant les coûts de lancement, de production et de stockage	Relaxation de contraintes de capacité	Incertain	Stock	Hnaien and Afsar (2017)
	EOQ : gestion des stocks dans une SC intégré d'un vendeur et d'un acheteur, avec consignation du stock et une quantité fixe de lots de production, en minimisant les coûts de commande, de lancement, de production et de stockage	Considération de contraintes de capacité	Certain	Un vendeur, un acheteur	Braglia et al. (2013)
	(R,s) réapprovisionnement : mise en œuvre d'une politique de stock de base, en minimsant les coûts de stockage en plus des pénalité	Relaxation de contraintes de capacité	Stochastique	Une usine	Johansen (2013)
	Ordonnancement de la production et de l'expédition dans le cadre du VMI, en minimisant les coûts de production du vendeur, les coûts de stockage du vendeur et de l'acheteur, les coûts de commande et les coûts de mise au rebut	Relaxation de contraintes de capacité	Certain	Un vendeur, un acheteur	Bazan et al. (2014)
	Planification des ressources lorsque les fonctions de production sont mal estimées ou mal spécifiées. Lorsque le processus de prestation de services comporte à la fois des apports du prestataire de services et du client	Considération de contraintes de capacité	Stochastique	Plusieurs processus liés	White (2013)

2.3.3 Critères de décision

Cette partie passe en revue les articles en fonction des critères de décision utilisés. Nous commençons par le critère physique, puis les articles s'appuyant, à la fois, sur un critère physique et un critère économique, et finalement, les articles s'appuyant uniquement sur un critère économique.

2.3.3.1 Critère physique

Dans 12 des 110 articles passés en revue, la recherche de la solution est fondée sur un critère physique. Par exemple, le délai de livraison des commandes (Ivanov *et al.,* 2014), le taux d'utilisation des machines et des stocks (Almeder et Hartl, 2013), etc.

La plupart de ces articles (10 sur 12) porte sur des problématiques opérationnelles ou tactiques : ordonnancement de tâches sur des machines parallèles, problème de *flowshop* avec tampons, affectation de commandes aux fournisseurs, etc. Nous avons identifié deux articles qui adoptent des critères physiques dans des modèles stratégiques (Daaboul *et al*., 2014 ; Rafique *et al*., 2017).

2.3.3.2 Critères physique et économique

La deuxième catégorie d'articles (13 sur 110) considère à la fois un critère économique et un critère physique. Dans (Nurjanni *et a*l., 2017 ; Zanoni *et al.*, 2014 ; Fang *et al*., 2016 ; Li *et al*., 2017 ; Jadidi *et al.,* 2014 ; Bozorgi *et al.,* 2014 ; Tang *et al.,* 2013) la recherche de la solution est fondée sur la minimisation d'un critère économique (coûts) et d'un critère physique (émission de carbone, risques opérationnels, nombre d'articles rejetés...). Dans (Leung *et al.,* 2013 ; Kang et Lee, 2013 ; Azadnia *et al.,* 2015 ; Liu *et al.,* 2013 ; Ivanov et Sokolov, 2013 ; Babić et Perić, 2014) le choix de la solution repose sur la minimisation des coûts et la maximisation d'un critère physique (fiabilité des processus de production ou des fournisseurs, niveau de service, satisfaction des parties prenantes).

Certains de ces articles ne considèrent qu'une seule fonction-objectif en associant au critère physique, des coûts de pénalité. Nurjanni *et al.* (2017) minimisent les coûts plus la taxe sur les émissions et les pénalités de dépassement de la limite d'émission. Tang *et al.* (2013) considèrent les coûts plus des pénalités de retard (mesurant le niveau de satisfaction des clients). En plus des coûts, Ivanov et Sokolov, (2013) considèrent le niveau de service représenté par les pénalités de non-respect des délais de livraison et les pénalités pour le non-respect du planning

de production. Les autres articles considèrent deux fonctions-objectifs distinctes : une fonction économique et une fonction physique. Ils investissent dans les méthodes de résolution (par exemple TOPSIS (Fang *et al.*, 2016), méthode Fuzzy (Jadidi *et al.*, 2014 ; Babić et Perić, 2014), Ɛ-contrainte (Kang et Lee, 2013)) de problèmes d'optimisation multi objectifs.

2.3.3.3 Critère économique

Dans 77% des articles, le choix de la solution proposée repose sur un critère exclusivement économique. Dans ce qui suit, nous exclurons les articles qui se limitent à l'étude d'un critère physique. Nous retenons donc 98 articles

Le tableau 17 présente la répartition des fonctions-objectifs des articles examinés sur les différents critères économiques. La minimisation des coûts est le critère économique le plus utilisé dans les modèles des trois niveaux de décision. La maximisation du profit est également utilisée dans les modèles tactiques et stratégiques mais est très rarement utilisée dans les modèles opérationnels. Les modèles de Xie *et al*. (2013) et Zhu (2013) s'appuient sur la VAN pour calculer la valeur espérée des coûts et du profit respectivement.

Tableau 17 : Distribution des articles sur les fonctions-objectifs économiques

	Fonction objectif économique	
Niveau décisionnel	**Coûts**	**Profit**
Stratégique (22 articles)	(Aalaei and Davoudpour, 2017; Wang et al., 2013; Fernandes et al., 2013; von Massow and Canbolat, 2014; Govindan and Fattahi., 2017; Luangkesorn et al., 2016; Özceylan et al 2013; Nurjanni et al., 2017 ;Tahirov et al., 2016; Sinha et al., 2016; Li et al., 2017; Moncayo-Martinez and Zhang, 2013;Gong et al., 2014; Choudhary et al., 2015; Colicchia et al., 2016)	(Soleimani et al., 2014; Shankar et al., 2018; Govindan et al., 2016; Gaur et al., 2017; Hammami and Frein, 2014; Zhang et al., 2015; Ji et al 2015)
	68%	32%
Tactique (51 articles)	(Acar and Atadeniz, 2015; Salehi et al., 2016; Leung et al., 2013; Bono et al., 2014; van der Heijden et al., 2013; Azadnia et al., 2015; Jaber et al., 2014; Jonrinaldi et al., 2013; Fang et al., 2016; Nedaei and Mahlooji, 2014; Dillon et al., 2017; Chan et al., 2017; Fahimnia et al., 2015; Kang and Lee, 2013; Lim et al., 2014; Beck et al., 2017; Ben-Daya et al., 2013; Zanoni et al., 2014; Kannan et al., 2013; Ryu et al., 2013; Bandaly et al., 2016; Babić and Perić, 2014; Roni et al., 2016; Jadidi et al., 2014; Rad et al., 2014; Battini et al., 2014; Chen and Gavirneni, 2013; Bylka, 2013; Chen, 2017; Xie et al., 2013)	(Dobhan and Oberlaender, 2013; Zhu, 2013; Zhou and Xie, 2014; Yuan et al., 2015; Schaal and Hübner, 2018; Wang and Huang, 2013; Paul et al., 2014; Huang and Su, 2013; Cao et al., 2013; Moghaddam et al., 2015; Meng et al., 2017; Xu and Meng, 2014; Zhang et al., 2014; Zhou et al., 2013; Cao et al., 2015; Ghasemy Yaghin et al., 2014; Chakraborty et al 2015; Xia 2016;Wang et al 2015; Stâlhane et al., 2014; Shao et al., 2013)
	59%	41%
Opérationnel (25 articles)	(Kouki and Jouini, 2015; Russell, 2017; Kim and Glock, 2018; Bruno et al., 2014; Neidigh and Harrison, 2013; Piewthongngam et al., 2013; Mogre et al., 2014; Ivanov and Sokolov, 2013; Tang et al., 2013; Habibi et al., 2017; Hnaien and Afsar, 2017; Johansen, 2013; Yan et al., 2013; White, 2013; Kim et al., 2014; Bischak et al., 2014; Sağlam and Banerjee, 2018; Wu and Sarker, 2013; Bazan et 2014; Liu et al., 2013; Braglia et al., 2013; Bozorgi et al., 2014; Ma et al., 2013; Duan and Warren Liao, 2013)	Jin et al., 2013
	96%	4%

Les articles (Von Massow et Canbolat, 2014 ; Soleimani *et al.*, 2014 ; Choudhary *et al.*, 2015 ; Zhang *et al.* 2015 ; Nurjanni et al., 2017 ; Aalaei et Davoudpour, 2017), qui présentent

des modèles stratégiques, combinent dans leur fonction-objectifs des coûts fixes d'investissement et des coûts d'exploitation sur l'horizon considéré (une seule période). Ce cas spécifique (mono période) suppose que les auteurs considèrent implicitement un coefficient d'actualisation nul. D'autres articles (Wang *et al.,* 2013 ; Özceylan et Paksoy., 2013 ; Hammami et Frein, 2014 ; Govindan *et al.,* 2016 ; Sinha *et al.,* 2016 ; Shankar *et al.,* 2018) combinent dans une fonction économique des coûts fixes liés aux décisions d'investissement et des coûts récurrents liés aux décisions d'exploitation de chaque période.

2.3.4 Évaluation économique utilisée dans les articles examinés

Cette partie passe en revue les articles en termes de calcul du coût différentiel des décisions alternatives étudiées. Nous commençons par présenter, pour chaque niveau de décision, les natures de coût utilisées dans l'évaluation des variables des modèles. Par la suite, nous indiquons dans quelle mesure les auteurs s'intéressent à l'explication du comportement et du contenu des coûts utilisés. Ensuite, nous aborderons des modèles de gestion d'interrelations dont la valorisation économique nécessite un *inter-costing*

2.3.4.1 Évaluation des Variables d'état (natures de coûts)

Le tableau 18 présente les natures de coûts qui sont utilisées dans les fonctions-objectifs des articles examinés. Il distingue les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

Le tableau montre que les coûts de production et les coûts fixes d'investissement, associés à l'ouverture de nouvelles installations, s'avèrent être les natures de coûts les plus couramment impliquées dans les modèles de décision stratégique examinés. Les coûts de stockage, de transport et d'achat sont également utilisés avec des pourcentages assez élevés. En revanche, les coûts plus détaillés liés par exemple aux activités niveau lot ou commande (coût de lancement) ou les coûts de rupture sont très rarement utilisés.

Pour les niveaux tactique et opérationnel, les coûts de production, de stockage et de transport sont utilisés avec des pourcentages assez importants. Aucun modèle de décision tactique ou opérationnel n'utilise les coûts d'investissement (questions stratégiques). Concernant les coûts d'achat, ils sont utilisés dans 33% des modèles tactiques examinés et ne sont pratiquement pas utilisés dans les modèles opérationnels (un seul article).

Des coûts détaillés comme les coûts de lancement, les coûts de rupture, de demande insatisfaite, les coûts de retravail sont utilisés dans un grand nombre de modèles tactiques et

opérationnels, par rapport aux modèles stratégiques. Soulignons que les auteurs supposent implicitement que l'évaluation des variables d'état de leurs modèles est automatiquement traçable dans le système de comptabilité de gestion de l'entreprise.

Tableau 18 : distribution des articles en termes de natures de coûts

Variable d'état	Niveau stratégique		Niveau tactique		Niveau opérationnel	
	Articles (22)	%	Articles (51)	%	Articles (25)	%
Coût de production	Govindan and Fattahi, 2017; Luangkesorn et al., 2016; Soleimani et al., 2014; Özceylan et al., 2013; Nurjanni et al., 2017; Shankar et al., 2018; Govindan et al., 2016; Zhang et al., 2015; Choudhary et al., 2015; Ji et al., 2015; Moncayo-Martínez and Zhang, 2013; Gong et al., 2014; Tahirov et al., 2016; Fernandes et al., 2013; Li et al., 2017	68%	Moghaddam et al., 2015; Zhu, 2013; Paul et al., 2014; Cao et al., 2013; Zhou and Xie, 2014; Jounialdi et al., 2013; Nedaei and Mahlooji, 2014; Chan et al., 2017; Chen, 2017; Acar and Atadeniz, 2015; Xu and, Meng, 2014; Cao et al., 2015, Kannan et al., 2013; Shao et al., 2013; Wang et al., 2015; Zhou et al., 2013; Zhang et al 2014; Meng et al., 2017	35%	Yan et al., 2013; Piewthongngam et al., 2013; Neidigh and Harrison., 2013; Bruno et al., 2014; Hnaien and Afsar, 2017; Russell, 2017; Kim and Glock, 2018; Bischak et al., 2014; Bazan et al., 2014	36%
Recyclage ou remanufacturing	Özceylan et al., 2013; Soleimani et al., 2014; Nurjanni et al., 2017; Govindan et al., 2016; Choudhary et al., 2015; Ji et al., 2015	27%	Moghaddam et al., 2015; Wang and Huang, 2013; Huang and Su, 2013; Jounialdi et al., 2013; Zhou et al., 2013; Jaber et al., 2014	12%	Habibi et al., 2017	4%
Coût de stockage	Govindan and Fattahi, 2017; Luangkesorn et al., 2016; Soleimani et al., 2014; Shankar et al., 2018; Govindan et al., 2016; Sinha et al., 2016; Zhang et al., 2015; Gaur et al., 2017; Moncayo-Martínez and Zhang, 2013; Gong et al., 2014; Tahirov et al., 2016; Aalaei and Davoudpour, 2017; Wang et al., 2013; Fernandes et al., 2013	64%	Moghaddam et al., 2015; Beck et al., 2017; Battini et al., 2014; Zhu, 2013; Wang and Huang, 2013; Huang and Su, 2013; Salehi et al., 2016; Paul et al., 2014; Kang and Lee, 2013; Bono et al., 2014; Azadnia et al., 2015; Jounialdi et al., 2013; Fang et al., 2016; Nedaei and Mahlooji, 2014; Dillon et al., 2017; Chen, 2017; Acar and Atadeniz, 2015; Lim et al., 2014; Ben-Daya et al., 2013; Ghaseny Yaghin et al., 2014; Zanoni et al., 2014; Kannan et al., 2013; Chakraborty et al., 2015; Xia, 2016; Rad et al., 2014; Chen and Gavirneni, 2013; Byika, 2013; Roni et al., 2016; Ryu et al., 2013; Yuan et al., 2015; Xie et al., 2013; van der Heijden et al., 2013; Jaber et al., 2014; Fahimnia et al., 2015	69%	Johansen, 2013; Yan et al., 2013; Ma et al., 2013; Tang et al., 2013; Piewthongngam et al., 2013; Neidigh and Harrison., 2013; Mogre et al., 2014; Bruno et al., 2014; Kouki and Jouini, 2015; Hnaien and Afsar, 2017;. Russell, 2017; Kim and Glock, 2018; Habibi et al., 2017; Duan and Warren Liao, 2013; Wu and Sarker, 2013; Kim et al., 2014; Saghan and Banerjee, 2018; Bazan et al., 2014; Braglia et al., 2013	76%
Coût de transport	Govindan and Fattahi, 2017; Soleimani et al., 2014; Özceylan et al., 2013; Nurjanni et al., 2017; Shankar et al., 2018; Govindan et al., 2016; Hammami and Frein, 2014; Choudhary et al., 2015; Gong et al., 2014; Aalaei and Davoudpour, 2017; Colicchia et al., 2016; Li et al., 2017	55%	Moghaddam et al., 2015; Beck et al., 2017; Battini et al., 2014; Leung et al., 2013; Huang and Su, 2013; Bono et al., 2014; Azadnia et al., 2015; Acar and Atadeniz, 2015; Ben-Daya et al., 2013; Kannan et al., 2013; Rad et al., 2014; Shao et al., 2013; Chen and Gavirneni, 2013; Byika, 2013; Ryu et al., 2013; Stâhlane et al., 2014; Van der Heijden et al., 2013; Fahimnia et al., 2015	35%	Ma et al., 2013; Tang et al., 2013; Piewthongngam et al., 2013; Russell, 2017; Kim and Glock, 2018; Habibi et al., 2017; Bozorgi et al., 2014; Saghan and Banerjee, 2018; Liu et al., 2013; Bischak et al., 2014	40%
Coût d'achat	Soleimani et al., 2014; Özceylan et al., 2013; Shankar et al., 2018; Hammami and Frein, 2014; Ji et al., 2015; Wang et al., 2013; von Massow and Canbolat, 2014	32%	Moghaddam et al., 2015; Battini et al., 2014; Zhu, 2013; Wang and Huang, 2013; Kang and Lee, 2013; Zhou and Xie, 2014; Schaal and Hübner, 2018; Azadnia et al., 2015; Jaddi et al., 2014; Chen, 2017; Xu and Meng, 2014; Ben-Daya et al., 2013; Chakraborty et al., 2015; Babić and Perić, 2014; Zhang et al 2014; Xie et al., 2013; Meng et al., 2017	33%	Kouki and Jouini, 2015	4%
Investment cost	Govindan and Fattahi, 2017; Soleimani et al., 2014; Özceylan et al., 2013; Nurjanni et al., 2017; Shankar et al., 2018; Govindan et al., 2016; Sinha et al., 2016; Hammami and Frein, 2014; Zhang et al., 2015; Choudhary et al., 2015; Gaur et al., 2017; Aalaei and Davoudpour, 2017; Wang et al., 2013; Fernandes et al., 2013; von Massow and Canbolat, 2014; Luangkesorn et al., 2016	73%	-	-	-	-
Coût de maintention	Aalaei and Davoudpour, 2017	5%	Beck et al., 2017	2%	-	-
Coût de niveau lot / niveau commande (coût de lancement…)	Zhang et al., 2015; Ji et al., 2015; Tahirov et al., 2016; Govindan et al., 2016	18%	Moghaddam et al., 2015; Beck et al., 2017; Battini et al., 2014; Wang and Huang, 2013; Paul et al., 2014; Kang and Lee, 2013; Bono et al., 2014; Azadnia et al., 2015 ; Jounialdi et al., 2013; Fang et al., 2016; Nedaei and Mahlooji, 2014; Dillon et al., 2017; Chan et al., 2017; Chen, 2017; Ben-Daya et al., 2013; Ghaseny Yaghin et al., 2014; Zanoni et al., 2014; Kannan et al., 2013; Chakraborty et al., 2015; Xia, 2016; Rad et al., 2014; Shao et al., 2013; Byika, 2013; Roni et al., 2016; Ryu et al., 2013; Yuan et al., 2015; Jaber et al., 2014	53%	Yan et al., 2013; Tang et al., 2013; Neidigh and Harrison., 2013; Mogre et al., 2014; Bruno et al., 2014; Kouki and Jouini, 2015; Hnaien and Afsar, 2017;. Russell, 2017; Kim and Glock, 2018; Habibi et al., 2017; Duan and Warren Liao, 2013; Wu and Sarker, 2013; Bischak et al., 2014; Saghan and Banerjee, 2018; Bazan et al., 2014; Liu et al., 2013; Braglia et al., 2013	68%
Coût de rupture ou d'urgence/ pénalité de perte de vente/ pénalité de la demande non satisfaite	Soleimani et al., 2014; Govindan and Fattahi, 2017; Sinha et al., 2016; Gong et al., 2014	18%	Döbbian et Oberlaender, 2013; Zhu, 2013; Salehi et al., 2016; Paul et al., 2014; Cao et al., 2013; Kang and Lee, 2013; Schaal and Hübner, 2018; Fang et al., 2016; Dillon et al., 2017; Acar and Atadeniz, 2015; Lim et al., 2014; Xu and Meng, 2014; Xia, 2016; Roni et al., 2016; Fahimnia et al., 2015; Bono et al., 2014	31%	Kim et al., 2014; Johansen, 2013; Kouki and Jouini, 2015; Habibi et al., 2017; Duan and Warren Liao, 2013	20%
Valeur résiduelle	-	-	Döbbian and Oberlaender, 2013; Schaal and Hübner, 2018; Xu and Meng, 2014; Meng et al., 2017	8%	-	-
Coût d'amélioration de processus	Sinha et al., 2016	5%	-	-	Ivanov and Sokolov., 2013	4%
Coût de rework / coût de non-conformité, coût de détérioration	Wang et al., 2013	5%	Wang and Huang, 2013; Chan et al., 2017; Van der Heijden et al., 2013	6%	Wu and Sarker, 2013; Kim et al., 2014; Bazan et al., 2014	12%
Coût de backlogging	Gaur et al., 2017	5%	Nedaei and Mahlooji, 2014	2%	Wu and Sarker, 2013; Wu and Sarker, 2013	8%
Coût de commande en attente (backordering)	-	-	Salehi et al. 2016; Paul et al., 2014; Rad et al., 2014; Chen and Gavirneni, 2013; Ryu et al., 2013	10%	Yan et al. 2013	4%
Coût de rachat	-	-	Meng et al., 2017	2%	-	-
Coût d'externalisation	Gong et al., 2014	5%	-	-	-	-
Pénalité/retard, coût de non-accomplissement	-	-	-	-	Ma et al., 2013; Tang et al., 2013; Ivanov and Sokolov., 2013; Mogre et al., 2014	16%
Coût des heures supplémentaires	-	-	-	-	Mogre et al., 2014	4%
Coût de marketing	-	-	Meng et al., 2017	2%	-	-
Taxe sur les émissions	-	-	Zanoni et al., 2014; Fahimnia et al., 2015	4%	-	-
Coût d'expiration	-	-	Dillon et al., 2017	2%	Kouki and Jouini, 2015	4%

2.3.4.2 Inducteurs d'activités et concepts de coûts

Les fonctions-objectifs des articles examinés sont fondées sur des produits de coûts unitaires

par des mesures physiques (variables de commandes ou variables d'état). Ces coûts et ces mesures physiques nous informent sur les différents niveaux d'inducteurs d'activités qui sont pris en compte dans la valorisation économique utilisée. Considérons l'exemple de Soleimani *et al.* (2014) qui se sont intéressés la question de localisation et d'affectation dans une CL. Ils multiplient, dans la fonction-objectif de leur modèle, la variable binaire (ouverture ou non d'une installation) par un coût fixe, la quantité de flux transportés entre les installations par le coût unitaire de transport, la matière achetée par le coût unitaire d'achat, les quantités produites et remanufacturées par le coût unitaire de production et de remanufacturing respectivement et le niveau de stock par le coût unitaire de stockage. Ils mobilisent alors deux niveaux d'inducteurs d'activité : le niveau installation et le niveau unité. Le tableau 19 présente, pour chaque niveau de décision, les différents inducteurs d'activité pris en compte dans les modèles examinés.

Tableau 19 : distribution des inducteurs d'activité sur les niveaux de décision

Niveau décisionnel	Différents niveaux d'inducteurs d'activité				
	Niveau unité	Niveau unité et niveau installation	Niveau unité, niveau lot et niveau installation	Niveau unité et niveau installation	Niveau unité et niveau produit
Niveau stratégique (22 articles)	Moncayo-Martinez and Zhang, 2013; Gong et al., 2014; Colicchia et al., 2016; Li et al., 2017	Govindan and Fattahi, 2017; Luangkesorn et al., 2016; Soleimani et al., 2014; Özceylan et al., 2013; Nurjanni et al., 2017; Shankar et al., 2018; Sinha et al., 2016; Hammami and Frein, 2014; Zhang et al., 2015; Choudhary et al., 2015; Gaur et al., 2017; Aalaei and Davoudpour, 2017; Wang et al., 2013; Fernandes et al., 2013; von Massow and Canbolat., 2014	Govindan et al., 2016	Ji et al., 2015; Tahirov et al., 2016	-
	18%	68%	5%	9%	0%
Niveau tactique (51 articles)	Dobhan and Oberlaender 2013; Bandaly et al., 2016; Zhu, 2013; Leung et al., 2013; Salehi et al., 2016; Cao et al., 2013; Zhou and Xie, 2014; Schaal and Hübner, 2018; Jadidi et al., 2014; Acar and Atadeniz, 2015; Lim et al., 2014; Xu and Meng, 2014; Cao et al., 2015; Shao et al.,2013; Babić and Perić, 2014; Chen and Gavirneni, 2013; Zhou et al., 2013; Zhang et al., 2014; Stålhane et al., 2014; Xie et al., 2013; van der Heijden et al., 2013	Fahimnia et al., 2015	-	Moghaddam et al., 2015; Beck et al., 2017; Battini et al., 2014; Wang and Huang, 2013; Huang and Su, 2013; Paul et al., 2014; Kang and Lee, 2013; Bono et al., 2014; Azadnia et al., 2015; Jonrinaldi et al., 2013; Fang et al., 2016; Nedaei and Mahlooji, 2014; Dillon et al., 2017; Chan et al., 2017; Chen, 2017; Ben-Daya et al., 2013; Ghasemy Yaghin et al., 2014; Zanoni et al., 2014; Kannan et al., 2013; Chakraborty et al., 2015; Xia, 2016; Rad et al., 2014; Bylka, 2013; Ryu et al., 2013; Yuan et al., 2015; Jaber et al., 2014; Roni et al., 2016	Wang et al., 2015; Meng et al., 2017
	41%	2%	0%	53%	4%
Niveau opérationnel (25 articles)	Johansen, 2013; White, 2013; Ma et al., 2013; Ivanov and Sokolov 2013; Piewthongngam et al., 2013; Kim et al., 2014; Jin et al 2013	-	-	Yan et al., 2013; Tang et al., 2013; Neidigh and Harrison, 2013; Mogre et al., 2014; Bruno et al., 2014; Kouki and Jouini, 2015; Hnaien and Afsar, 2017; Kim and Glock, 2018; Russell, 2017; Habibi et al., 2017; Duan and Warren Liao, 2013; Wu and Sarker 2013; Bozorgi et al., 2014; Bischak et al 2014; Sağlam and Banerjee, 2018; Bazan et al., 2014; Liu et al., 2013; Braglia et al., 2013	-
	28%	0%	0%	72%	0%

En ce qui concerne le contenu des coûts, dans la quasi-totalité des articles examinés, les auteurs n'expliquent pas la structure des informations utilisées dans les coûts. Les coûts sont considérés comme des paramètres donnés, fournis par une source externe qui est généralement le système de comptabilité de gestion. Ils ne discutent pas de la pertinence du contenu des coûts en fonction de l'horizon temporel des décisions. Autrement dit, le contenu des coûts est peu exploré. Dans très peu d'articles, les auteurs donnent des détails sur le contenu de certains coûts

utilisés. Par exemple, Lim *et al.* (2014) indiquent que le coût unitaire de l'expédition dépend du prix et du poids de la pièce pour le transport aérien, et de son volume pour le transport maritime. Li *et al.* (2017) expliquent que le coût unitaire des stocks est dû aux coûts d'obsolescence des stocks et aux coûts d'investissement liés aux pièces à faible rotation, et que le coût unitaire de de production exclut tous les coûts de capacité (ex. l'amortissement des machines). Kim et Glock, (2018) considèrent un coût de production unitaire qui est une fonction du taux de production des machines (une variable de décision dans le modèle présenté) et expliquent que le coût de lancement est lié aux opérations de nettoyage. Mogre *et al*. (2014) soulignent que par rapport au changement de produit sur les lignes de production, ils considèrent à la fois le coût et le temps ; le coût en tant que charges supplémentaires engendrées pendant le changement et le temps évalué comme une pénalité d'un éventuel retard de la production. Bozorgi *et al.* (2014), modélisant un problème de réapprovisionnement des articles froids, expliquent que les coûts des stocks sont liés aux coûts fixes d'activation d'un congélateur supplémentaire et aux coûts variables qui sont proportionnels au nombre d'articles stockés. Dans (Ma *et al.,* 2013), il est supposé que la pénalité de retard dépende du retard de la commande et inclut l'insatisfaction du client, la pénalité contractuelle et l'éventuelle perte de réputation. Nurjanni *et al.* (2017) supposent que les services de transport sont assurés par un prestataire logistique externe avec des coûts de transport unitaires prédéfinis pour chaque mode. Dans Shankar *et al*. (2018), les coûts unitaires de transport comprennent les coûts du carburant, les salaires, les rémunérations, les fournitures d'exploitation, les assurances et l'amortissement. Battini *et al*. (2014) expliquent que le coût de transport comprend des coûts fixes et variables et présente des points de discontinuité lorsque la capacité du véhicule est saturée. Ivanov et Sokolov, (2013) mentionnent que les coûts sont supposés être une fonction linéaire des volumes traités. Zhou et Xie (2014) expliquent que le coût opérationnel unitaire du fournisseur dépend des économies d'échelle. Chan *et al*. (2017) soulignent que certains paramètres de coût dépendent du taux de production.

Dans l'évaluation économique qu'ils ont adoptée, Colicchia *et al.* (2016) ont travaillé sur la détermination des inducteurs d'activité pertinents en utilisant l'analyse de corrélation pour étudier la variabilité des coûts sur la base d'un historique des coûts unitaires et de certains paramètres physiques.

Les coûts d'opportunité sont rarement introduits dans les fonctions économiques des articles examinés, sauf dans un modèle stratégique (Fernandes *et al.,* 2013), trois modèles

tactiques (Bandaly *et al.,* 2016 ; Wang et Huang, 2013 ; Ben-Daya *et al.,* 2013) et deux modèles opérationnels (Bozorgi *et al.,* 2014 ; Kim *et al.,* 2014).

2.3.4.3 Modèles d'inter-costing

Les modèles qui traitent des problèmes d'interrelation représentent 23% des articles examinés. Ils requièrent un contexte d'*inter-costing* dans lequel les paramètres de coûts des organisations indépendantes sont mobilisés. Le tableau 20 indique, pour chaque article, les acteurs impliqués dans le modèle et les informations sur les coûts qui doivent être partagées lors de l'exécution du modèle.

Tableau 20 : modèles de gestion d'interrelations

Article	Acteurs	Coûts partagés
Bazan et al., 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de lanccement chez (vendeur) - coût de production (vendeur) - coût de commande (acheteur) - coût de rework (vendeur) - coût de stockage (acheteur) - coût de non conformité (vendeur) - coût de stockage de produit non conforme (vendeur)
Beck et al., 2017	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de lancement - coût de stockage (acheteur) - coût de stockage (vendeur) - coût de transport (vendeur) - coût de manutension (acheteur)
Paul et al., 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de stockage (vendeur) - Coût de stockage (acheteur) - coût de lancement (vendeur) - coût de commande (acheteur) - coût de production (vendeur) - coût de rejet (vendeur) - coût d'inspection - coût de commande en attente - coût de ventes perdues (acheteur)
Cao et al., 2013	Vendeur Plusieurs acheteur	- Coût de production (vendeur) - coût de production (acheteur i) - Coût marginal supplémentaire de l'augmentation de la production par rapport au plan initial
Zhou and Xie, 2014	Vendeur Deux acheteurs	- Coût d'achat (acheteur) - coût de production (vendeur) = f(EOQ)
Jonrinaldi et al., 2013	Vendeur Acheteur	- Coût de commande par cycle (acheteur) - coût de commande par cycle (CD) - coût de commande par cycle (producteur) - coût de stockage (acheteur) - coût de stockage (vendeur) - coût de production (vendeur)
Chan et al., 2017	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de détérioration (acheteur) - coût de stockage (acheteur) - coût de lancement (vendeur) - coût de production et de transport (vendeur) - coût de détérioration (vendeur) - coût de stockage (vendeur)
Chen, 2017	Vendeur Acheteur	- Coût de lancement de réapprovisionnement (acheteur) - coût d'ajout d'une unité dans la commande (acheteur) - coût d'achat (acheteur) - coût de stockage (acheteur) - coût de lancement (vendeur) - coût d'ajout d'une unité dans le programme de poduction (vendeur) - coût de stockage (vendeur)
Xu and Meng, 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de production (vendeur) - prix de détail (acheteur) - valeur résiduelle (acheteur) - pénalité de repture (acheteur)
Ben-Daya et al., 2013	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de réception d'une livraison (acheteur) - coût d'opportunité de stockage (acheteur) - coût de stockage (vendeur) - coût de lancement (vendeur) - coût d'expédition (vendeur) - coût d'achat (acheteur)
Cao et al., 2015	Vendeur Acheteur	- Coût de production (vendeur) - coût de production (acheteur)
Ghasemy Yaghin et al., 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de lancement (vendeur) - coût de stockage (acheteur) - coût de stockage (vendeur)
Zanoni et al., 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de lancement (vendeur) - coût de commande (acheteur) - composante financière de coût de stockage (vendeur) - composante physique de coût de stockage (vendeur) - composante financière de coût de stockage (acheteur) - composante physique de coût de stockage (acheteur)
Kannan et al., 2013	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de réception (acheteur) - coût de transport (acheteur) - coût de stockage (vendeur) - coût de lancement (vendeur) - coût de transport (vendeur)
Chakraborty et al., 2015	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de stockage - prix de gros - coût de lancement (vendeur)
Rad et al., 2014	Vendor Multiple Buyers	- Coût de lancement (vendeur) - coût de commande (acheteur i) - coût de stockage (vendeur) - coût de stockage (acheteur) - coût de commandes en attente
Chen and Gavirneni, 2013	Vendeur Acheteur	- Unit holding cost (retailer) - Unit backorder cost (retailer) - Unit holding cost (supplier) - Unit expediting cost (supplier) (when the supplier hasn't enough quantity and needs to provide from external source with this extra cost
Bylka, 2013	Vendeur Acheteur	- Coût de lancement (vendeur) - coût de stockage (vendeur) - coût de stockage (acheteur)
Wang et al., 2015	Deux vendeurs Acheteur	- Coût de production (vendeur A) - coût de production (vendeur B)
Ryu et al., 2013	Plusieurs groupes d'agents	- Coût de stockage (chaque agent) - Coût de commande (chaque agent)
Yuan et al., 2015	Vendeur Acheteur	- Coût de commande (acheteur) - coût de stockage (acheteur) - prix de vente (achteur) - coût de lancement de production - coût de lancement de remanufacturing - coûts de commande de produits utilisés (producteur) - coût de stockage (producteur)
Meng et al., 2017	Vendeur Distributeur Acheteur	- Coût de marketing (acheteur) - coût de service (acheteur) - coût de production (vendeur) - coût de rachat (vendeur) - coût de distribution (distributeur)
Jaber et al., 2014	Vendeur Acheteur	- Coût de lancement (production et remenufacturing) - coût de stockage (acheteur) - coût de stockage (vendeur) - coût d'inspection, de tri et de stockage des produits utilisés (vendeur)

2.4 *Discussion des résultats : pertinence et usage d'un système de coûts dans les modèles décisionnels*

Le présent travail d'examen de la littérature des modèles de décision en le domaine du SCM révèle un ensemble de défis liés à l'utilisation des coûts dans les modèles de décision. Cette sous-section est organisée comme suit : dans la partie 2.4.1 nous abordons les problèmes méthodologiques liés à l'utilisation d'un coût unitaire d'activité. La partie 2.4.2 se concentre sur l'effet, de la propagation de l'impact de décisions, sur le calcul du coût différentiel entre les alternatives de décision. La partie 2.4.3 aborde la particularité de l'utilisation des coûts de pénalité. À la fin de cette sous-section, nous suggérons un guide méthodologique distinguant les systèmes de comptabilité de gestion de l'évaluation économique dans les modèles de décision.

2.4.1 Coût unitaire d'activité

Cette partie souligne la difficulté de l'utilisation d'un coût unitaire d'activité. L'analyse de l'évaluation économique, utilisée dans les modèles de décision examinés, conduit aux discussions suivantes :

1. Le premier constat est que les variables d'état du modèle ne sont pas nécessairement des objets de coûts apparaissant en tant que tel dans le système de comptabilité de gestion de l'entreprise. En conséquence, les variables d'état sélectionnées dans le modèle de décision ne doivent pas être trop éloignées des objets de coûts de la comptabilité de gestion.
2. Le second constat porte sur le recours à des fonctions de coût linéaires, évoluant principalement sur la base d'inducteurs d'activité de niveau unité (volumes). Ce choix souligne une double hypothèse faite par les auteurs de modèles :

- Une causalité parfaite, qui demeure problématique à obtenir dans les systèmes actuels de comptabilité.
- Une hypothèse de stabilité des coûts unitaires par inducteur d'activité qui supposent des rendements constants pour des éléments variables de coûts ou l'absence d'économies d'échelle. Si, à court terme, ces hypothèses sont admissibles, elles sont plus difficilement acceptables à plus long terme. D'ailleurs, le concept d'inducteur de coût développé par les promoteurs de la méthode ABC invite à une analyse détaillée dans des modèles

stratégiques conduisant à aider les décisions structurelles (ex : localisation des unités de production, choix de moyens de transport…).

3. Le troisième constat porte sur la rétroaction de la solution sur les paramètres du modèle physique ayant servi de fondement au calcul des coûts. Un système de comptabilité de gestion est nécessairement contingent au système opérant, d'où la distinction classique entre le *job order costing* et le *process costing*. La solution proposée peut remettre en cause les coûts unitaires calculés. Pour souligner la forte contingence des informations sur les coûts par rapport aux caractéristiques physiques du système productif étudié, considérons les modèles stratégiques liés aux designs de réseaux et à la définition des capacités. Dans ces modèles, on part d'un scénario de base dont lequel on déduit des coûts unitaires moyens. Le modèle de décision est alimenté par ces informations sur les coûts pour rechercher une nouvelle solution. La résolution du modèle de décision peut mener à des incohérences entre les hypothèses de fonctionnement et les coûts utilisés initialement avec les caractéristiques du nouveau système productif. Ceci pourrait rendre la solution obtenue non faisable ou non pertinente (Giard, 2017). La figure 39 souligne la forte interdépendance entre les caractéristiques physiques et les hypothèses de fonctionnement d'un système avec les informations sur les coûts qui s'y rapportent.

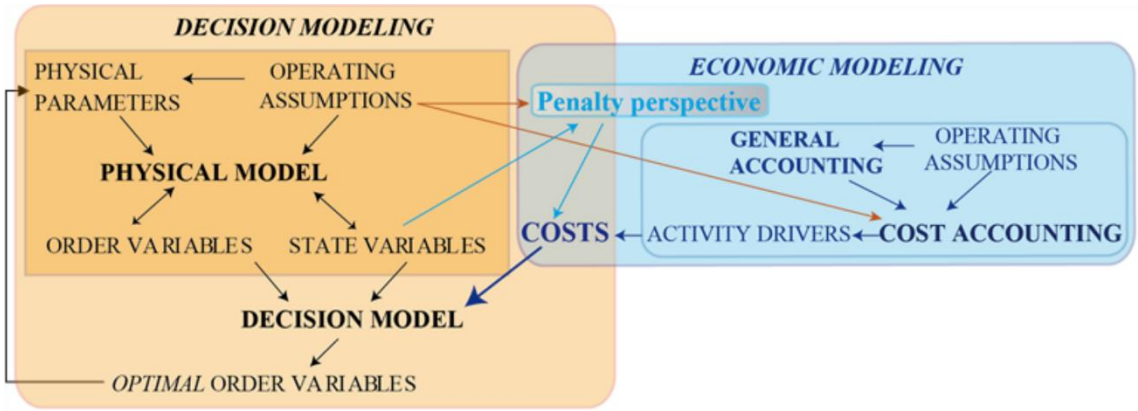

Figure 39 : Interdépendance entre le système physique et les informations sur les coûts

2.4.2 L'étendue des modèles de décision

Parce que les modèles de décision opérationnels devraient fournir un degré de granularité fin (temps et espace), ils traitent généralement des questions décisionnelles centralisées et considèrent pour un périmètre limité du système productif étudié (tableau 16). Ils fournissent, dans ce périmètre, la solution la plus efficiente par rapport aux contraintes considérées et à la

fonction économique définie. Cependant, la solution obtenue peut ne pas être alignée avec les objectifs d'autres entités de la CL intégrée et qui n'appartiennent pas au périmètre du modèle (effet de propagation de l'impact des décisions). Dans ce cas, en considérant la solution obtenue comme la solution de référence, un nouveau calcul du coût différentiel doit être effectué pour rechercher des scénarios possibles permettant de concilier les objectifs des différentes entités (Bara *et al*., 2020c).

La troisième colonne du tableau 20 montre que les articles, qui portent sur des questions du management d'interrelations, proposent des modèles dont la fonction-objectif est fondée sur des paramètres de coût provenant des entreprises différentes et indépendantes juridiquement (ex. fournisseur, fabricant et distributeur ; vendeur et détaillant). Ainsi, l'entreprise qui exécute le modèle doit connaître des coûts qui ne lui appartiennent pas. La validité et l'applicabilité des résultats obtenus à partir de ces modèles sont conditionnées par l'implication et la volonté des entreprises considérées à collaborer et à partager leurs informations sur les coûts avec d'autres entreprises, ce qui n'est pas évident dans la pratique.

En outre, dans ces modèles, aucun article n'examine l'homogénéité des paramètres de coûts et la cohérence des mailles d'analyse qui devraient être fournis par les différentes entreprises, et n'examine la nécessité d'une éventuelle approche spécifique d*'inter-costing* permettant d'obtenir des décisions appropriées. Un manque d'homogénéité des coûts entraîne des incohérences dans les modèles développés. Le lecteur est invité à se référer à Schulze *et al.* (2012) qui se sont appuyés sur la méthode ABC pour suggérer une approche de comment traiter, estimer et répartir les coûts dans un contexte d*'inter-costing*.

2.4.3 Coûts de pénalité

Un autre point qui mérite la discussion est lié au degré de certitude des informations utilisées. Dans un environnement certain, le coût ou le revenu différentiel estimé, entre les décisions alternatives, va automatiquement être, en l'absence des incidents imprévus, visualisé dans le compte de résultat de l'entreprise. Si la demande de prestations et/ou les caractéristiques de fonctionnement du système sont aléatoires, alors les variables d'état sont des variables aléatoires et donc, le critère de performance est aléatoire. La recherche de solutions analytiques passe par le passage d'un modèle liant des occurrences de variables aléatoires à un modèle défini en espérance mathématique. L'exemple des modèles d'approvisionnement peut servir d'appui. Dans ces modèles, en univers aléatoire, les solutions optimales conduisent à des

probabilités de rupture risquant de conduire à une modification progressive des caractéristiques de la demande et, notamment, de son niveau. Il s'ensuit une perte de goodwill que l'on cherche à limiter en introduisant dans le modèle un coût de rupture qui a pour objet d'empêcher ou de limiter les modifications de la demande. Le lien entre ce coût de rupture et la limitation de la perte de goodwill est impossible à établir objectivement ; on est plus dans une logique de pilotage des comportements que dans une logique objective.

Le problème de non-satisfaction de la demande est un problème qui se pose principalement en univers aléatoire. Dans le cas du fonctionnement normal du système productif, la notion de la durée de rupture n'est pas pertinente. Soit la demande insatisfaite est différée, ce qui entraîne un coût administratif, soit elle est perdue. Dans ce dernier cas, le coût de rupture peut être la marge unitaire non-réalisée, sauf si report de la demande sur un bien équivalent, peut s'y ajouter une pénalité correspondant à une perte de goodwill. Le problème de non-satisfaction de la demande pourrait être lié à la durée de la rupture (arrêt du système productif suite à une panne (problème de maintenance) ou à une rupture d'approvisionnement (arrêt de ligne) ; il existe quelques modèles reposant sur l'hypothèse, assez contestable, de la connaissance d'une distribution de probabilité de la durée d'arrêt du système et d'un coût de rupture proportionnel à la durée de l'arrêt - et ne tenant pas compte de la propagation possible de l'incident dans le temps et dans l'espace. En cas d'anticipation minimale de la défaillance, une solution possible (et difficilement contestable) consiste à empêcher cette défaillance, par une solution de rattrapage mobilisable au dernier moment (approvisionnement d'urgence, sous-traitance d'urgence…) ; son coût peut être proportionnel à la durée (exemple nombre de composants manquants sur une ligne d'assemblage ; solution DHL) ou variable par palier (affrètement d'urgence d'un moyen de transport d'une certaine capacité) ; solution retenue dans Sali et Giard (2015).

2.4.4 Synthèse

Il apparaît que l'absence de discussion de la méthodologie d'évaluation économique dans la conception des modèles de décision fait, implicitement, l'hypothèse que les systèmes de comptabilité de gestion sont capables de répondre instantanément à une demande d'estimation des coûts. Or, cette hypothèse remet en cause l'analyse de Clark concernant le coût différentiel. De manière plus systématique, notre analyse conduit au tableau 21. Ce tableau indique clairement que les concepteurs de modèles d'aide à la décision en SCM ne peuvent se

désintéresser de l'évaluation économique, qui conditionne la pertinence et la cohérence des solutions proposées par leurs modèles. Les coûts utilisés dans les modèles ne peuvent être considérés comme des paramètres fixes, immédiatement disponibles dans les comptes de l'entreprise. Comme le souligne Clark (1923), la conception d'un modèle d'aide à la décision suppose une analyse détaillée et fine des coûts utilisés pour l'évaluation économique. En conséquence, les concepteurs de modèles doivent se rapprocher d'urgence des spécialistes de la comptabilité de gestion afin d'améliorer la pertinence de leurs modèles.

Tableau 21 : guide méthodologique

Caractéristiques	Définition	Systèmes de comptabilité de gestion	Evaluation économique dans les modèles de décision
Objectif	Objectif de calcul des coûts	Contrôle et diagnostic : coûts historiques (état actuel du système)	Coûts futurs, état futur du système productif, comparaison entre des décisions alternatives
Objets de coût	Tout élément dont le coût de réalisation est mesuré	Produits, entité fonctionnelle	Décisions
Périmètre temporel	L'horizon temporel considéré dans le calcul des coûts et la nature du découpage du temps (mono ou multi période)	Année en cours ou la période budgétaire	En fonction de l'impact des décisions : court, moyen ou long terme, mono ou multi-période
Granularité temporelle	La plus fine maille temporelle utilisée pour définir des flux de produits ou de prestations dans le modèle	Année en cours ou la période budgétaire	Dépend de la granularité du modèle (ex. heure, jour, mois)
Périmètre couvert	Le système productif, constitué de ressources matérielles et humaines, pris en compte dans le modèle.	Processus internes d'une organisation	Processus internes d'une organisation, opérations ou processus des organisations externes (systèmes d'inter-costing), environnement (clients, marchés, réglementation…)
Maille d'analyse (granularité spatiale)	Les éléments à partir de lesquels est construit le système de coûts	La décomposition technique et la structure des produits, centres de coûts (sections analytiques ou activités)	Variables d'état (partiellement liés à la maille d'analyse dans les systèmes de comptabilité de gestion)
Traçabilité	Les charges incluses dans l'analyse	Coûts partiels: directs ou variables Coûts complets	Coûts d'opportunité et coûts différentiels (dépendant des conséquences physiques des décisions alternatives)
Causalité	Relations de cause à effet	Fondée sur l'homogénéité des coûts dans les centres de coûts et les choix de mesures d'activité (hiérarchie des activités) Fondée sur des fonctions de comportement de coûts simples de type (y = ax) N'est jamais parfaite dans les systèmes de comptabilité gestion : déversements multiples des charges indirectes	Hypothèse de causalité parfaite: le modèle décisionnel suppose que la valeur d'une variable d'état est totalement définie par les valeurs prises par les variables de commande et l'ensemble des relations décrivant le fonctionnement du système étudié et la configuration utilisée par ces relations

Dans la section suivant, nous allons nous concentrer sur les décisions opérationnelles. Nous allons présenter les principes d'une approche d'évaluation économiques des décisions opérationnelles. Nous allons également décrire une étude cas de l'application de ces principes

pour l'évaluation économique des décisions opérationnelles de l'ordonnancement des lignes de production des engrais dans le site de Jorf. Finalement, nous allons montrer la pertinence du couplage de cette approche avec le DSS d'ordonnancement des lignes des engrais à Jorf.

3. ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DU PILOTAGE OPÉRATIONNEL - UNE APPLICATION AUX DÉCISIONS D'ORDONNANCEMENT DES ATELIERS DES ENGRAIS

Chaque niveau de décision nécessite une évaluation économique appropriée (Moss et Haseman, 1957). On s'intéresse ici au problème de l'évaluation économique de décisions opérationnelles alternatives, c'est-à-dire qui ont un impact seulement sur un court terme allant de quelques jours à quelques semaines. Pour faciliter la compréhension des difficultés méthodologiques de cette évaluation et de l'inadéquation de la comptabilité de gestion traditionnelle à cette fin, nous avons choisi de nous appuyer sur une étude de cas (Bara *et al.*, 2020c). Via cette dernière, nous démontrons qu'une approche d'évaluation personnalisée est nécessaire pour une étude, fondée sur les coûts, de décisions opérationnelles. Nous présentons les principes d'une approche permettant une évaluation économique pertinente pour la comparaison de décisions opérationnelles alternatives en utilisant le coût différentiel. Nous montrons que l'utilisation des coûts du système de comptabilité de gestion en coût complets conduit à des résultats biaisés. Enfin, nous expliquons comment l'approche, que nous suggérons, peut être utilisée par un système d'aide à la prise de décisions opérationnelles dans un contexte orienté SCM.

Pour comprendre les principes méthodologiques de l'évaluation économique proposée et démontrer sa pertinence, nous nous référons à une étude de cas réel portant sur l'ordonnancement d'un ensemble de lignes de production parallèles appartenant au site de Jorf. Nous soulignons que les principes que nous proposons sont généraux et ne se limitent pas au cas de l'OCP.

Avant de présenter les résultats d'analyse de notre étude de cas (3.4), nous présentons dans la sous-section (3.1) une description du contexte décisionnel étudié et dans la sous-section (3.2) les principes d'évaluation économique que nous proposons.

3.1 *Description du contexte décisionnel*

Nous avons travaillé sur l'évaluation économique des décisions d'ordonnancement de

l'ensemble des lignes de production des engrais à Jorf. Pour simplifier la présentation de l'approche proposée, nous étudions d'abord le cas de l'entité MP34 (figure 13) avant de généraliser à l'ensemble du site de Jorf. Son usine d'engrais comprend deux ensembles de lignes de production identiques : 3 lignes "107" avec un débit supérieur et 4 lignes "07" avec un débit inférieur. Veuillez noter que les lignes "107" et "07" sont également différentes en termes de gammes et de nomenclature.

Notre étude de cas traite un problème réel concernant l'ordonnancement d'un ensemble de dix-huit ordres de fabrication correspondant à une charge de travail d'environ un mois (carnet de commandes présenté dans le tableau 22). Les sept premiers ordres de fabrication correspondent à la production en cours.

Tableau 22 : carnet de commandes

Statut de l'ordre de fabrication	Numéro d'ordre de fabrication	Produit engrais	Quantité / t	Date de livraison au plus tôt	Date de livraison au plus tard
Production en cours	1	DAP_Standard	1000	01/01/2018	01/01/2018
	2	NPS_12_48_5S	950	01/01/2018	01/01/2018
	3	DAP_Std_Noir	1100	02/01/2018	02/01/2018
	4	DAP_EURO	900	01/01/2018	01/01/2018
	5	NPS_12_48_5S	800	02/01/2018	02/01/2018
	6	DAP_Chambal	1000	02/01/2018	02/01/2018
	7	NPS_12_48_5S	900	01/01/2018	01/01/2018
Nouveaux ordres de fabrication	8	MAP_Clair_11_54	15000	10/01/2018	30/01/2018
	9	ASP_euro_19_38	10000	09/01/2018	30/01/2018
	10	NPS_12_46_7S	10000	08/01/2018	30/01/2018
	11	NPk_15_15_15	10000	05/01/2018	30/01/2018
	12	DAP_Chambal	8000	03/01/2018	30/01/2018
	13	DAP_Chambal	10000	04/01/2018	30/01/2018
	14	DAP_EURO	30000	03/01/2018	30/01/2018
	15	NPk_15_15_15	200000	03/01/2018	30/01/2018
	16	NPS_12_46_7S	15000	04/01/2018	30/01/2018
	17	MAP_TAP_11_52	20000	05/01/2018	30/01/2018
	18	ASP	15000	02/01/2018	30/01/2018
	19	MAP_Clair_11_54	35000	02/01/2018	30/01/2018
	20	NPk_12_24_12	18000	04/01/2018	30/01/2018
	21	DAP_Standard	40000	06/01/2018	30/01/2018
	22	MAP_Std_Normal_11_52	40000	02/01/2018	30/01/2018
	23	DAP_Standard	20000	09/01/2018	30/01/2018
	24	NPS_12_46_7S_1Z	20000	06/01/2018	30/01/2018
	25	DAP_Chambal	20000	03/01/2018	30/01/2018

Notre évaluation économique vise à trouver la meilleure solution parmi un ensemble de solutions alternatives d'ordonnancement issues de l'usine d'engrais de l'entité MP34. Le problème intègre toutes les données techniques (nomenclature et gammes) et les contraintes à respecter, qu'elles soient commerciales ou liées à la production ((Azzamouri *et al.*, 2019) voir section 4 du chapitre 3).

Nous considérons deux solutions d'ordonnancement, représentées par leurs diagrammes de Gantt dans les figures 40 et 41. Les deux solutions sont efficaces puisqu'elles répondent à toutes les données techniques et contraintes énumérées du problème. Il s'agit de savoir laquelle des deux décisions est la plus efficiente pour l'OCP, c'est-à-dire la meilleure d'un point de vue économique. Notre approche est fondée sur l'estimation du coût différentiel entre les deux décisions alternatives. Le contexte décisionnel étudié suppose que les capacités de production et de stockage, ainsi que l'approvisionnement en ressources, sont déjà établies. Nous sommes intéressés par le choix d'une décision conduisant à la meilleure utilisation de ces ressources.

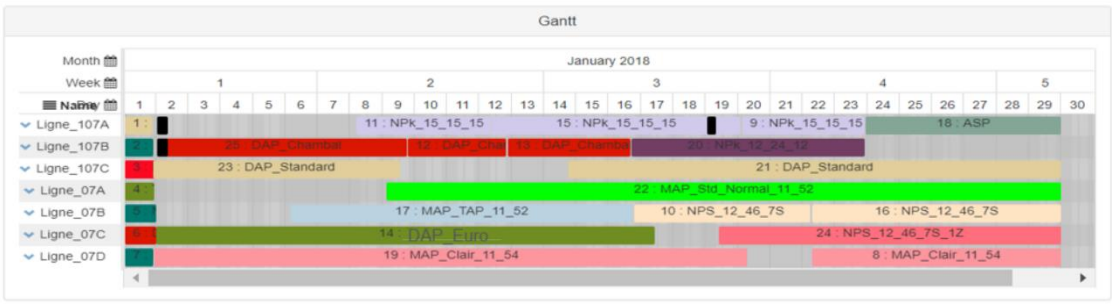

Figure 40 : solution 1 d'ordonnancement

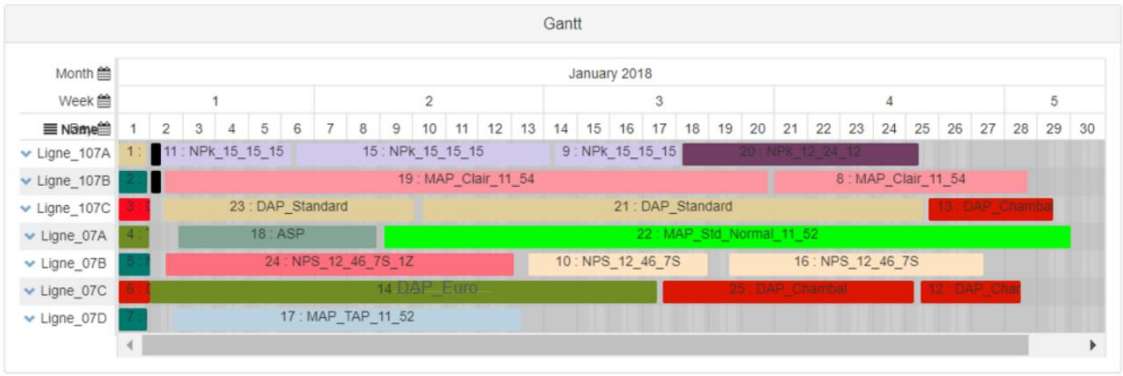

Figure 41 : solution 2 d'ordonnancement

3.2 *Principes retenus pour l'évaluation économique des décisions opérationnelles*

L'objectif de l'évaluation économique va bien au-delà de la simple connaissance des coûts des produits, sur la base des historiques des consommations passées pour contrôler les coûts, en calculant les coûts des décisions futures. L'objectif de cette section est de proposer une approche d'évaluation économique d'un ensemble de décisions opérationnelles alternatives possibles sur la base du concept du coût différentiel défini dans le cadre théorique présenté dans la section 2 de ce chapitre, en tenant compte des éventuelles limites des systèmes de comptabilité de gestion.

Le coût différentiel doit tenir compte de l'impact d'une décision dans le temps et dans l'espace. Ce point important en SCM, nous invite à considérer l'effet de propagation de l'impact d'une décision sur les autres maillons de la CL et l'alignement entre les décisions opérationnelles d'une part, et les décisions tactiques et stratégiques d'autre part. Verdaasdonk et Wouters (1999, 2001) ont travaillé sur l'étude de l'impact du coût différentiel sur le temps. Ils se sont intéressés à l'évaluation et à la dépendance des décisions prises à différents moments d'un horizon moyen de près d'un an (ex. modifier la planification de la production) pendant lequel les décideurs disposent d'une certaine flexibilité pour ajuster les capacités. L'approche que nous présenterons est différente puisqu'elle se concentre sur l'impact du coût différentiel sur l'espace (sur un horizon de temps court) en mettant l'accent sur l'évaluation économique des décisions opérationnelles prises localement et dont l'impact se propage à d'autres points de la CL. Le moment où la décision sélectionnée sera appliquée est le même quelle que soit la décision.

Pour que l'évaluation économique d'une décision soit pertinente, nous proposons les principes suivants (dont la synthèse est présentée dans la figure 42) :

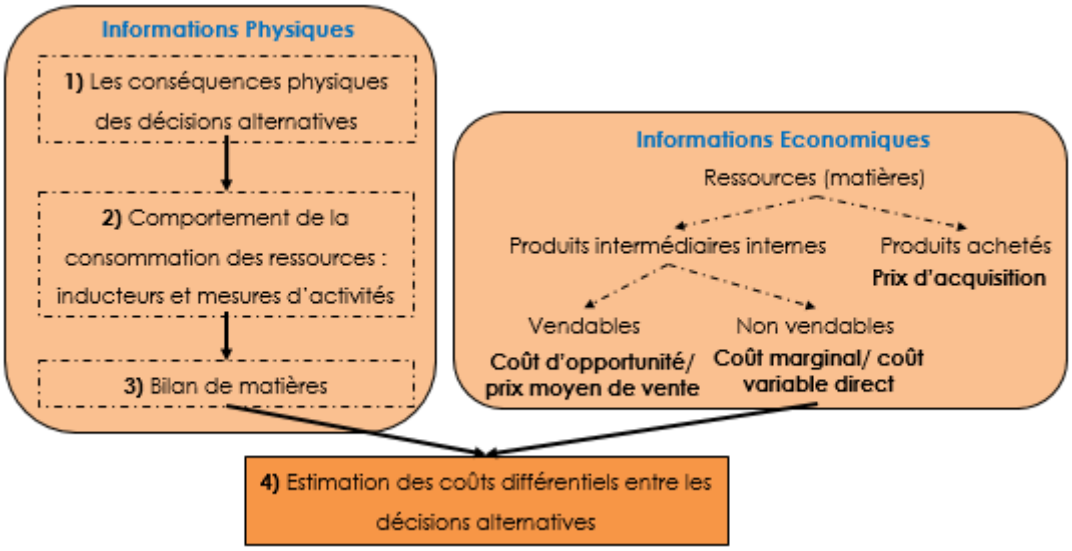

Figure 42 : principes de l'approche d'évaluation économique proposée

Les règles utilisées pour calculer les coûts ne peuvent pas être indépendantes du modèle physique qui va les utiliser (2.4). Ainsi, la première étape consiste à analyser les conséquences physiques des décisions alternatives en question. L'évaluation économique appropriée est contingente aux conséquences physiques survenues. Il faut déterminer comment une décision affecte le système physique pour déterminer les coûts pertinents à utiliser. De surcroît, une évaluation économique de la prise de décisions opérationnelles doit permettre d'obtenir une correspondance étroite avec le système physique concerné. Wouters (1991) et Comelli *et al.* (2008) soulignent la nécessité d'identifier les conséquences physiques des décisions étudiées pour établir leur évaluation économique. Cette analyse physique aboutira ensuite aux trois résultats suivants :

- L'identification de l'impact des décisions sur la consommation des ressources. Il faut comprendre le comportement dynamique des consommations de ressources pour les simuler selon les alternatives (Bouquin, 1997 ; Mehra *et al.*, 2006). Pour ce faire, il est indispensable de faire appel à la méthode ABC pour, d'une part, comprendre, pour chaque scénario, les inducteurs des différentes activités associées et, d'autre part, pour mesurer la consommation de ces activités en utilisant des mesures d'activité pertinentes. Les décisions opérationnelles nécessitent un degré de granularité fin du système physique concerné. ABC peut être une approche pertinente pour retracer l'origine et l'impact des coûts liés aux activités. Elle fournit des informations détaillées sur l'entreprise et ses activités (Gunasekaran *et al.*, 2000). Nous rappelons que la

comptabilité de gestion distingue les coûts de capacité de ceux qui varient en fonction de la décision. Ces coûts de capacité découlent donc de décisions stratégiques définissant les perspectives de l'entreprise. Ils ne sont pas pertinents pour l'évaluation des décisions opérationnelles.

- L'élaboration du bilan de matières pour calculer le différentiel en termes de consommation de matières et de capacités occupées entre les différentes décisions.
- Après avoir calculé le différentiel de ressources, il faut déterminer l'impact des décisions alternatives étudiées sur le compte de résultat ; en estimant l'évaluation financière de ces ressources. On distingue les produits internes des produits achetés auprès de fournisseurs externes. Pour l'évaluation des produits internes qui sont marchands, nous optons pour l'utilisation d'un prix de marché (selon l'approche du coût d'opportunité) et pour les produits intermédiaires invendables, nous utilisons le coût marginal à court terme estimé par le coût variable direct. En ce qui concerne les produits achetés, leur évaluation est fondée sur l'utilisation du prix d'acquisition.

3.3 *L'utilisation des principes proposés pour l'évaluation économique des décisions d'ordonnancement des lignes de production parallèles*

Cette section a pour objectif de présenter l'application des principes de l'évaluation économique proposée à l'étude de cas de l'ordonnancement des lignes de production des engrais. Nous commençons par une présentation détaillée du système de comptabilité de gestion de l'OCP (la structure et les règles de calcul). Nous explicitons ensuite l'utilisation des principes pour la comparaison des solutions 1 et 2 (figures 40 et 41). Par la suite, nous montrons pourquoi le recours au système de comptabilité de gestion de l'OCP, fondé sur l'approche du coût complet, conduit à une évaluation économique faussée. Finalement, nous soulignons la pertinence de l'approche dans le cas du système d'aide à la décision d'ordonnancement.

3.3.1 Le système de comptabilité de gestion de l'OCP

Nous allons présenter le découpage analytique utilisé et par la suite expliciter les différentes étapes de calcul des coûts.

3.3.1.1 Découpage analytique de l'entité MP34

Le système de comptabilité de gestion actuel est fondé sur le découpage analytique et utilise la

méthode du coût complet pour le calcul des coûts des objets de coût.

Les coûts fournis sont destinés au top management pour le contrôle budgétaire, à la comptabilité générale, pour remplir les comptes des produits et charges, et à l'entité *Business Steering* pour alimenter leur modèle d'optimisation utilisé pour prendre des décisions relatives aux programmes tactiques de production.

Chaque site du groupe OCP (Jorf par exemple) est constitué de plusieurs entités juridiques MP34, *Jorf Fertilizer Companies*, JV, etc. contenant, chacune, plusieurs *Business Units* (BU). La méthode de calcul des coûts complets est similaire pour toutes les entités juridiques de Jorf (MP34, JV, etc.).

Dans cette description on se limitera uniquement à l'entité MP34. Elle est composée de quatre BU : atelier acide sulfurique, atelier acide phosphorique, atelier des engrais et *Jorf Phosphate Hub*. Chaque BU est composée de plusieurs stades. Un stade correspond à une étape de production dans la CL : il peut s'agir d'une opération de déchargement ou de chargement au port, de stockage ou de déstockage de produits, d'une étape de production de produits finis ou intermédiaires ou d'une opération annexe à la production. On distingue les stades principaux, ils correspondent à une étape de la production (transformation ou stockage), et les stades auxiliaires englobant les stades utilitaires et les stades prestataires. Les stades utilitaires produisent des utilités (vapeur, eau alimentaire…) et les stades prestataires produisent des services (maintenance). Ces stades auxiliaires sont au service des stades principaux, mais ils font aussi des prestations entre eux.

L'ensemble des BUs, de l'entité MP34, comporte 53 stades (tout type inclus). Le dernier élément du découpage analytique est la section analytique (SA). Il s'agit une division comptable de l'entreprise correspondant le plus souvent à la plus petite entité ayant une fonction élémentaire. Une SA peut appartenir à 100 % à un stade, ou être répartie sur plusieurs stades suivant une clé de répartition. MP34 possède 189 SAs.

La figure 43 illustre le découpage analytique du site de Jorf. Les stades en rouge correspondent aux stades principaux, en vert, aux stades utilitaires et, en noir, aux stades prestataires. La dernière partie de la figure présente des exemples de SAs, celles en bleu se déversent à 100 % sur un stade alors que celles en orange sont réparties entre plusieurs stades.

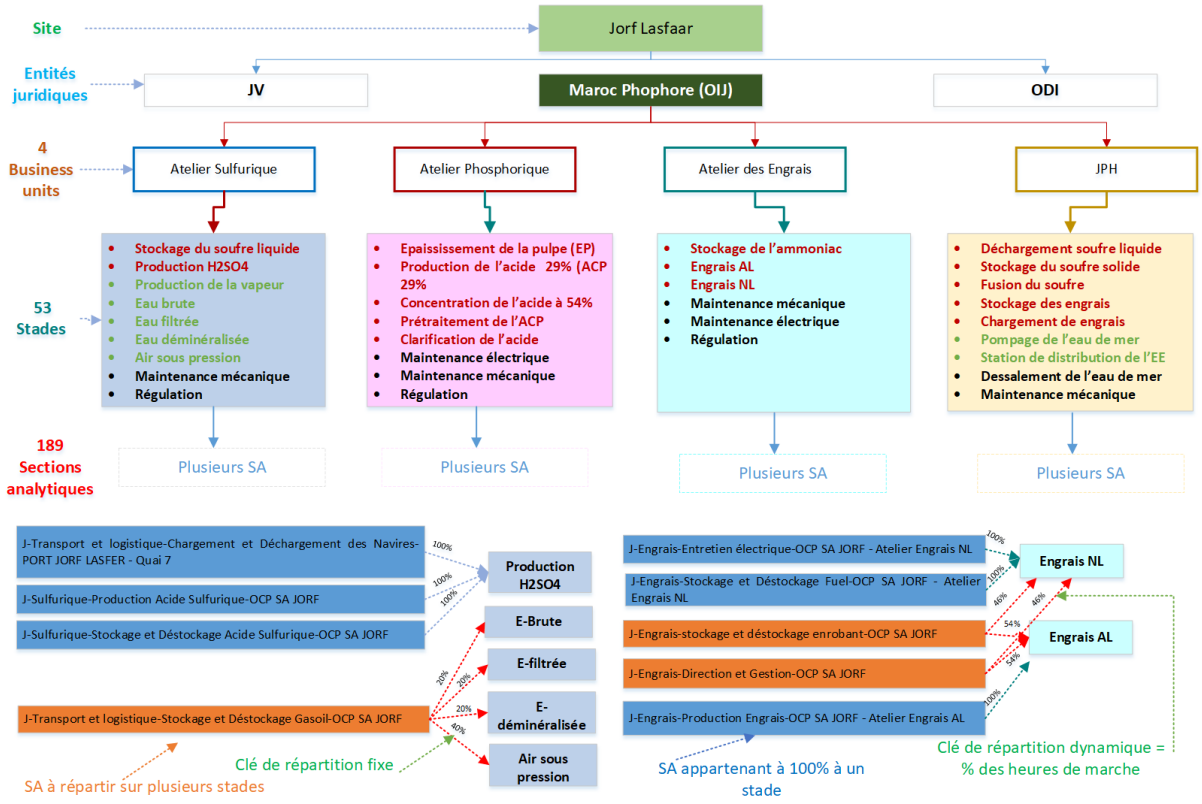

Figure 43 : Découpage analytique de Jorf

3.3.1.2 Étapes de calcul des coûts complets

Le calcul du coût complet des stades est réalisé en fin du mois, en se fondant sur le cumul des volumes et celui des charges depuis janvier de l'année en cours.

3.3.1.2.1 Étape 1 : allocation des charges par nature aux sections analytiques (répartition primaire)

Les contrôleurs de gestion à Jorf n'interviennent pas lors de la phase d'affectation (ou de répartition) des charges par nature aux sections analytiques (répartition primaire). Cette opération est régie par des modules du système d'information (Oracle…), gérés par l'administration fonctionnelle installée au siège.

3.3.1.2.2 Étape 2 : préparation des montants des charges par nature par stade

La première étape du processus de calcul du coût complet, consiste en l'extraction de la balance du système d'information (General Ledger, GL). Cette dernière contient le solde des charges

par nature allouées à chaque SA.

Les charges par nature des SAs qui appartiennent à 100 % à un stade sont affectées directement. Les charges des SAs, partagées entre plusieurs stades, sont réparties entre ces stades, au moyen de clés de répartition qui peuvent être fixes ou dynamiques. La clé dynamique concerne les deux stades des engrais, Anciennes Lignes (AL ou 07) et Nouvelle Lignes (NL ou 107), les SAs partagées entre eux sont réparties suivant leurs heures de marche. Les SAs à répartir sur les autres stades (hors AL et NL) sont réparties moyennant des clés fixes définies depuis longtemps ; on ignore comment elles ont été établies.

Après avoir extrait la balance du système d'information, les contrôleurs de gestion travaillent sur ces données pour calculer pour chaque stade le montant de chaque nature de charge : salaires, pièces de rechange, énergie électrique, assurance, location, etc. Ce montant est obtenu par le cumul du montant des charges des SAs (appartenant à 100 %) auquel s'ajoute la quote-part des SAs réparties (égale au montant de la charge de la SA fois le coefficient de la clé de répartition).

Cas particulier des charges transport du personnel, assurances, et impôts-et-taxes

Les charges transport du personnel, assurances, et impôts-et-taxes ont un traitement particulier. Une facture globale est obtenue par nature de charge, ensuite elle est répartie sur tous les stades suivant des clés de répartition. La charge transport du personnel est allouée aux stades suivant une clé fondée sur l'effectif du personnel de chaque stade sur l'effectif total. Les deux charges d'assurance et impôts-et-taxes sont allouées suivant la clé « part d'amortissement du stade » sur le « montant total de la charge amortissement ». La figure 44 représente le mécanisme de traitement de la balance :

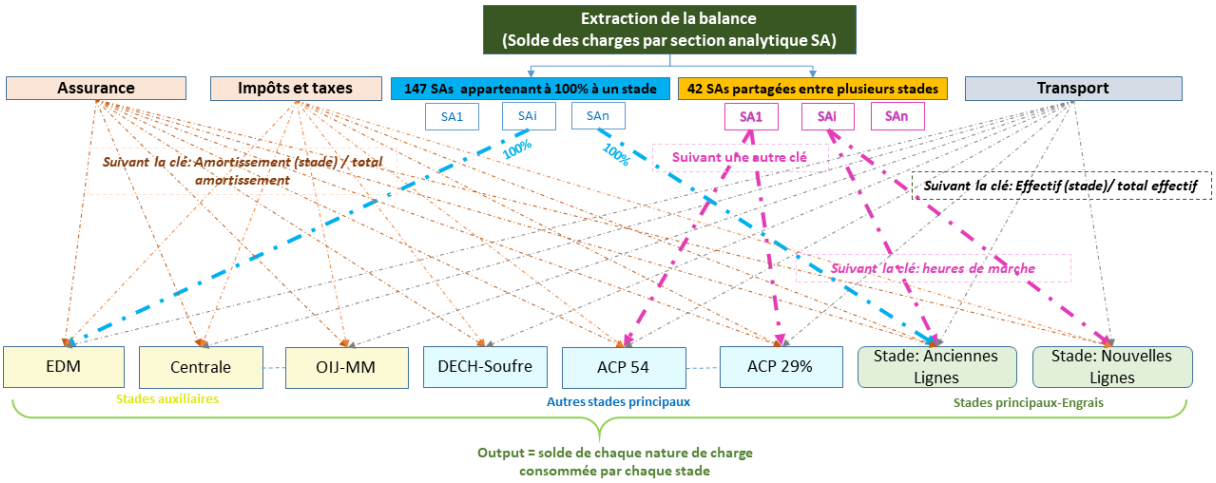

Figure 44 : Traitement de la balance (affectation des charges aux stades)

Passage des stades AL et NL aux nouveaux stades familles engrais

La partie granulation est caractérisée par la diversité des produits d'engrais (produit DAP, MAP, NPS, ASP ou NPK). La majorité de ces produits peuvent être produits sur les AL ou sur les NL. Il n'est donc pas intéressant de s'arrêter aux stades AL et NL. Un coût complet général AL ou NL n'est pas significatif, nous allons parler des stades familles engrais production DAP, production MAP… Par conséquent, parce que le traitement de la balance permet d'établir les montants des charges par nature sur les deux stades principaux AL et NL, le résultat des stades familles engrais est obtenu par la répartition des natures de charge des stades AL et NL sur les stades familles suivant la clé de répartition heures de marches de la famille sur le stade (AL ou NL).

Ceci ne concerne que les engrais parce que, par exemple, les lignes de production d'acide phosphorique 29 % produisent un seul type d'acide 29 %. La figure 45 montre le passage des stades AL et NL vers les stades familles engrais :

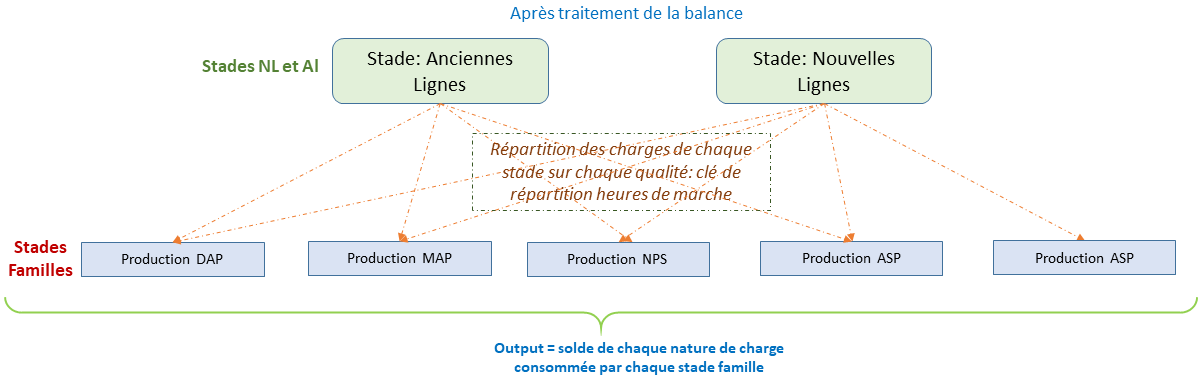

Figure 45 : affectation des charges de la balance aux stades familles

Il faut noter que le contrôle de gestion reçoit des opérationnels le bilan des activités (production), le bilan des utilités et celui des échanges entre les entités… Il structure ces inputs pour préparer un seul fichier output contenant les exploitations (productions) de chaque stade, et les volumes de prestations entre les stades. Ci-dessous nous distinguons entre le calcul des coûts complets des stades auxiliaires et celui des stades principaux.

3.3.1.2.3 Etape 3 : calcul des coûts complets des stades auxiliaires

La méthode du calcul matriciel est utilisée pour calculer la part de chaque nature de charge *c* dans le coût unitaire de chaque stade. Le coût unitaire du stade est donc la somme des parts de toutes les charges dans ce coût unitaire. Cette méthode fait la distinction entre une partie des charges qui sont affectées, *facilement*, à un stade (obtenues par traitement de la balance) et une partie des mêmes natures de charge qu'un stade consomme à travers les prestations qu'il reçoit des autres stades.

Soit :

X_{ic} le montant de la charge *c* imputée au stade *i* après traitement de la balance.

XR_{ic} le montant total de la charge *c* imputée au stade *i*.

p_{ji} nombre d'unités d'œuvre envoyées par le stade *j* au stade *i*. Une unité d'œuvre est le moyen de mesure et de modélisation des coûts dans un centre de coût. Elle n'en est forcément pas la cause. Elle peut se rapporter au volume produit, nombre d'heures machine, heures de main-d'œuvre directe…

$$XR_{ic} = X_{ic} + \sum_{j} \frac{p_{ji}}{\sum_k p_{jk}} * XR_{jc}$$

$$XR_{1c} = X_{1c} + \frac{p_{11}}{\sum_k p_{1k}} * XR_{1c} + \frac{p_{21}}{\sum_k p_{2k}} * XR_{2c} + \cdots \frac{p_{n1}}{\sum_k p_{nk}} * XR_{nc}$$

$$XR_{ic} = \frac{p_{1i}}{\sum_k p_{1k}} * XR_{1c} + \frac{p_{2i}}{\sum_k p_{2k}} * XR_{2c} + \cdots X_{ic} + \frac{p_{ii}}{\sum_k p_{ik}} * XR_{ic} \ldots \frac{p_{ni}}{\sum_k p_{nk}} * XR_{nc}$$

- Le calcul se base sur la résolution de ce système linéaire d'inconnu XR_{ic} la part réelle de la charge *c* dans le stade *i* :

$$\left(1 - \frac{p_{11}}{\sum_k p_{1k}}\right) * XR_{1c} - \frac{p_{21}}{\sum_k p_{2k}} * XR_{2c} \ldots - \frac{p_{n1}}{\sum_k p_{nk}} * XR_{nc} = X_{1c}$$

$$-\frac{p_{1i}}{\sum_k p_{1k}} * XR_{1c} - \frac{p_{2i}}{\sum_k p_{2k}} * XR_{2c} \ldots + \left(1 - \frac{p_{ii}}{\sum_k p_{ik}}\right) XR_{ic} \ldots - \frac{p_{n1}}{\sum_k p_{nk}} * XR_{nc} = X_{ic}$$

$$\begin{pmatrix} 1 - \frac{p_{11}}{\sum_{j \in J} p_{1j}} & \cdots & \frac{-p_{n1}}{\sum_{j \in J} p_{nj}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{-p_{1n}}{\sum_{j \in J} p_{1j}} & \cdots & 1 - \frac{p_{nn}}{\sum_{j \in J} p_{nj}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} XR_{1c} \\ \vdots \\ XR_{nc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{1c} \\ \vdots \\ X_{nc} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} XR_{1c} \\ \vdots \\ XR_{nc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{p_{11}}{\sum_{j \in J} p_{1j}} & \cdots & \frac{-p_{n1}}{\sum_{j \in J} p_{nj}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{-p_{1n}}{\sum_{j \in J} p_{1j}} & \cdots & 1 - \frac{p_{nn}}{\sum_{j \in J} p_{nj}} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} X_{1c} \\ \vdots \\ X_{nc} \end{pmatrix}$$

La part de la charge *c* dans le coût unitaire de chaque stade *i* est obtenue par la division du montant total de la charge réelle imputée à chaque stade sur le nombre d'unités d'œuvre travaillées par ce stade :

$$\begin{pmatrix} U_{c1} \\ \vdots \\ U_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} XR_{1c} \\ \vdots \\ XR_{nc} \end{pmatrix} \Big/ \begin{pmatrix} \sum_j p_{1j} \\ \vdots \\ \sum_j p_{nj} \end{pmatrix}$$

Le coût unitaire U_i du stade *i* est la somme des parts de chaque nature de charge dans ce coût unitaire :

$$U_i = \sum_c U_{ci}$$

3.3.1.2.4 Étape 4 : calcul des coûts complets des stades principaux

Le calcul du coût unitaire est obtenu par la sommation des parts de toutes les charges dans le coût unitaire. Ici nous prenons en considération également les matières premières (MP) et les produits intermédiaires.

Le calcul des coûts unitaires des stades principaux doit être effectué dans l'ordre des stades principaux dans la chaîne. Le stade ACP 29, par exemple, fait appel au coût unitaire des stades production acide sulfurique, réception de la pulpe, etc.

La valorisation des sorties de stocks MP ou produits intermédiaires se fonde sur le coût moyen pondéré. Ce dernier est obtenu en divisant la somme de la valeur du produit qui était initialement dans le stock et la valeur du produit entrant dans le stock, sur la quantité totale.

Le calcul du coût complet d'un stade principal se fait par l'imputation des matières premières et des produits intermédiaires qu'il consomme, de celle des parts des charges par nature consommées via les prestations reçues des stades auxiliaires et de l'imputation des parts des charges par nature obtenues par le traitement de la balance. La figure 46 décrit les étapes de calcul pour l'exemple du stade principal « Production DAP ».

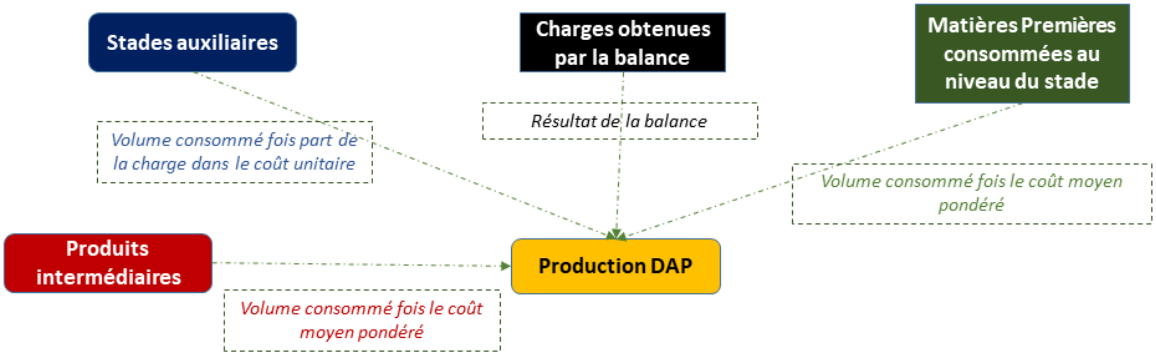

Figure 46 : calcul des coûts complets des stades principaux

3.3.2 Usage des principes proposés

Passons maintenant aux résultats de notre analyse des données de l'étude de cas. La partie (3.4.2.1) reporte l'application des trois premiers principes de notre approche : il s'agit de déterminer les conséquences physiques des décisions alternatives étudiées, en déduire les différents inducteurs d'activités et élaborer le bilan des matières entre les décisions alternatives. Dans la partie (3.4.2.2) nous décrivons le dernier principe à savoir l'introduction des informations économiques pertinentes pour le calcul du coût différentiel des décisions

alternatives.

3.3.2.1 Comparaison physique

Nous supposons que les deux solutions alternatives sont réalisables car elles respectent *i)* les contraintes commerciales liées aux dates de livraison, *ii)* les contraintes de capacité, à savoir la disponibilité des inputs en amont et la disponibilité de l'espace de stockage en aval, et *iii)* les contraintes techniques liées aux gammes de production. Les différences physiques sont donc principalement liées à la consommation des ressources et à l'utilisation des capacités. Le passage de la solution 1 à la solution 2 impacte les affectations des ordres de fabrication aux lignes de production ainsi que le nombre et le type de lancements des lignes. Cela se traduit à son tour par des différences en termes de consommation des ressources et des capacités en raison des différences de performance entre les lignes de production (les gammes et les nomenclatures sont légèrement différentes selon le type de ligne de production) et en raison de l'impact des séquences de production d'engrais sur les prescriptions des lancements des lignes. En conséquence, nous distinguons deux inducteurs d'activité : *i)* le type de ligne de production (07 ou 107) et *ii)* le changement de formule d'engrais sur la ligne de production pour lancer un nouvel ordre de fabrication. Cela se traduit ci-dessous par un différentiel lié à l'affectation des ordres de fabrication et à un différentiel généré par les séquences de lancement sélectionnées. La comparaison ne prend en compte que les ordres de fabrication nécessitant un changement de type de ligne de production d'une solution à l'autre et les changements de formule qui varient d'une solution à l'autre.

Pour des raisons de confidentialité, les calculs présentés ci-dessous sont fondés sur des coefficients de nomenclature qui diffèrent des coefficients réels, et cela est également vrai pour les coûts utilisés pour l'évaluation des coûts de produits et de matières premières. Les résultats de notre analyse amendés comme décrit ci-dessus sont cependant suffisamment proches de ceux obtenus avec les valeurs exactes.

3.3.2.1.1 Les consommations de production

On observe que la solution 1 a favorisé la production sur les lignes 07 avec un poids total de 185,000 t (correspondant à 2 234 heures de production) contre 171,000 t (correspondant à 1 579 heures) sur les lignes 107. Dans la solution 2, en revanche, le volume de production est réparti de manière égale, 178 000 t étant alloués à chaque type de ligne de production. Mais

étant donné que les lignes 107 et 07 ont des capacités différentes, ce volume se traduit par un temps de production différent : 1 644 heures sur les lignes 107 et 2 150 heures sur les lignes 07.

Selon les coefficients de la nomenclature, une commande de production d'engrais consomme des matières premières (ammoniac, etc.), des produits intermédiaires (acide sulfurique, acide phosphorique) et de l'énergie (énergie électrique, vapeur, carburant, etc.). Pour calculer les consommations, nous avons retenu les caractéristiques des lignes 07 et 107 et les coefficients de la nomenclature communiqués par les opérationnels. Les tableaux 23 et 24 présentent le calcul des ressources consommées en production dans les solutions 1 et 2, respectivement. Nous avons écarté à la fois les ordres de fabrication qui n'ont pas entraîné un changement de la ligne de production et ceux qui l'ont fait mais sur le même type de ligne. Par exemple, les ordres de fabrication 9, 11 et 15 ont été attribués à la ligne 107A dans les deux solutions 1 et 2. De même, l'ordre de fabrication 17 a été déplacé de la ligne 07B à la ligne 07D (identiques) ; il entraîne donc les mêmes consommations dans les deux scénarios.

Tableau 23 : consommations de la production dans la solution 1

Solution 1										
Numéro d'ordere de fabrication	Produit Engrais	Quantité	Ligne	Acide phosphorique 54%	Acide phosphorique 29%	Ammoniac	Fuel	Vapeur	Energie électrique	Acide sulfurique
8	MAP_Clair_11_54	15000	07D	7770	600	2130	82500	3000	525000	
12	DAP_Chambal	8000	107B	2704	1096	1792	44000	1600	336000	
18	ASP	15000	107A	2670	3165	3510	120000	3000	630000	2760
19	MAP_Clair_11_54	35000	07D	18130	1400	4970	192500	7000	1225000	
25	DAP_Chambal	20000	107B	6760	2740	4480	110000	4000	840000	

Tableau 24 : consommations de la production dans la solution 2

Solution 2										
Numéro d'ordere de fabrication	Produit Engrais	Quantité	Ligne	Acide phosphorique 54%	Acide phosphorique 29%	Ammoniac	Fuel	Vapeur	Energie électrique	Acide sulfurique
8	MAP_Clair_11_54	15000	107B	7740	600	2085	90000	3000	526050	
12	DAP_Chambal	8000	07C	2720	1096	1832	36000	1600	280000	
18	ASP	15000	07A	2700	3165	3585	97500	3000	525000	2760
19	MAP_Clair_11_54	35000	107B	18060	1400	4865	210000	7000	1227450	
25	DAP_Chambal	20000	07D	6800	2740	4580	90000	4000	700000	

3.3.2.1.2 Les consommations de matières des lancements en production

Le passage de la solution 1 à la solution 2 a impliqué différentes configurations de changements de formule ; en fonction de séquencement de la production d'engrais. Le tableau 25 montre les séquences de production d'engrais correspondant aux changements de formule de chaque solution. Si le passage a permis de supprimer plusieurs changements de formule (surlignés en gris clair), il en a généré de nouveaux (surlignés en gris foncé). Le tableau indique également,

le temps de chaque changement de formule sur le type de ligne correspondant. Nous observons que la solution 1 nécessite 11 configurations : 5 sur les lignes 107 (soit un total de 40 heures) et 6 sur les lignes 07 (soit un total de 36 heures). La solution 2 nécessite 12 changements de formule : 5 sur les lignes 107 (soit un total de 22 heures) et 7 configurations sur les lignes 07 (soit un total de 22 heures).

Tableau 25 : les séquences de changements de formule d'engrais et les temps de lancements dans les solutions 1 et 2

	Solution 1			Solution 2		
Numéro de lancement	Séquence du lancement	Type de ligne	Temps (h)	Séquence du lancement	Type de ligne	Temps (h)
1	DAP_Standard → NPk_15_15_15	107	9	DAP_Standard → NPk_15_15_15	107	9
2	NPk_15_15_15 → ASP	107	9	NPk_15_15_15 → NPk_12_24_12	107	1
3	NPS_12_48_5S → DAP_Chambal	107	9	NPS_12_48_5S → MAP_Clair_11_54	107	8
4	DAP_Chambal → NPk_12_24_12	107	9	DAP_Std_Noir → DAP_Standard	107	4
5	DAP_Std_Noir → DAP_Standard	107	4	DAP_Standard → DAP_Chambal	107	
6	DAP_Euro → MAP_Std_Normal_11_52	07	4	DAP_Euro → ASP	07	8
7	NPS_12_48_5S → MAP_TAP_11_52	07	8	ASP → MAP_Std_Normal_11_52	07	8
8	MAP_TAP_11_52 → NPS_12_46_7S	07	8	NPS_12_48_5S → NPS_12_46_7S_1	07	1
9	DAP_Chambal → DAP_Euro	07		NPS_12_46_7S_1Z → NPS_12_46_7	07	1
10	DAP_Euro → NPS_12_46_7S_1Z	07	8	DAP_Chambal → DAP_Euro	07	
11	NPS_12_48_5S → MAP_Clair_11_54	07	8	DAP_Euro → DAP_Chambal	07	
12				NPS_12_48_5S → MAP_TAP_11_52	07	4

Les conséquences de l'inducteur d'activité "changement de formule d'engrais" diffèrent selon la séquence de production des engrais. Il existe plusieurs inducteurs d'activité chaque fois qu'un "changement de formule d'engrais" est nécessaire. La détermination de la consommation liée à cette activité est fondée sur une cartographie d'activités spécifique que nous avons conçue à partir des résultats de nos entretiens avec différents contremaîtres de lignes de production (figure 47). Nous avons tracé les différentes étapes de production d'une ligne d'engrais (du pré-neutralisateur au convoyeur menant aux stocks). Au niveau de chaque étape, nous avons identifié les activités de base pertinentes qui sont induites par chaque type de séquence. Nous avons ajouté en rouge les ressources consommées par chaque activité de base. Ce degré de détail fin, bien que nécessaire pour l'évaluation des décisions opérationnelles, n'est pas obtenu dans la modélisation physique relativement agrégée sur laquelle repose le système actuel de comptabilité de gestion.

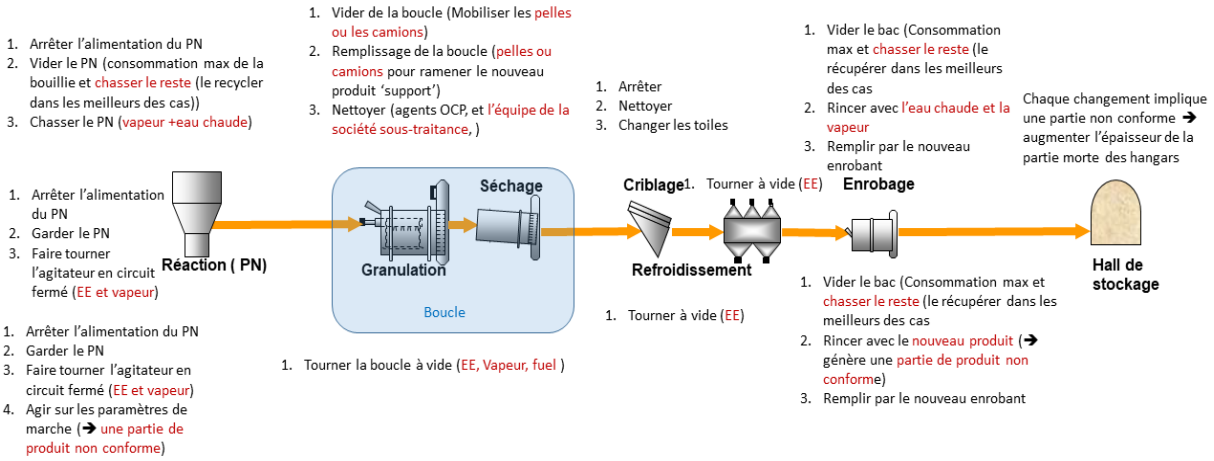

Figure 47 : cartographie d'activités relative à la décision "changer la formule d'engrais"

Les tableaux 26 et 27 présentent, pour chaque solution, le calcul des ressources consommées par les lancements. Par exemple, le passage de DAP_Euro à NPS_12_46_7s_1Z, dans la solution 1, a entraîné la consommation de 33,5 t de P2O5 (acide phosphorique 54%), 23 t de P2O5 induites par la vidange du produit DAP, 8 t de P2O5 perdues à cause de la baisse du rendement au démarrage du produit NPS et 2,5 t de P2O5 perdues lors du processus de nettoyage du pré-neutralisateur. Comme mentionné ci-dessus, nous n'avons pris en compte que les changements de formule qui différaient d'une solution à l'autre.

Tableau 26 : consommations des lancements relatifs à la solution 1

Solution 1								
Lancements (Changements de formule)	**Ligne**	**Acide phosphorique 54%**	**Acide phosphorique 29%**	**Ammoniac**	**Fuel**	**Vapeur**	**Energie électrique**	**Acide sulfurique**
NPK_15_15_15 → ASP	107		28.82	26.03	2492.80	54	6160	33.66
NPS_12_48_5S → DAP_Chambal	107		30.77	32.17	2767.80	54	6160	50.49
DAP_Chambal → NPK_12_24_12	107	37.18	23.07	29.64	2052.80	52.79	4620	
DAP_Euro → MAP_Std_Normal_11_52	07	37.40	23.07	30.19	1942.80	52.79	3850	
NPS_12_48_5S → MAP_TAP_11_52	07		26.60	25.825	1795.35	47	2625	34.425
MAP_TAP_11_52 → NPS_12_46_7s	07	33.68	17.68	17.65	1307.85	47	2625	
DAP_Euro → NPS_12_46_7s_1Z	07	33.50	10.28	22.18	1232.85	47	2625	
NPS_12_48_5S → MAP_Clair_11_54	07		26.60	25.825	1795.35	47	2625	34.425

Tableau 27 : consommations des lancements relatifs à la solution 2

Solution 2								
Lancements (Changements de formule)	**Ligne**	**Acide phosphorique 54%**	**Acide phosphorique 29%**	**Ammoniac**	**Fuel**	**Vapeur**	**Energie électrique**	**Acide sulfurique**
NPk_15_15_15 → NPk_12_24_12	107							
NPS_12_48_5S → MAP_Clair_11_54	107		33.77	34.17	2215.35	54	6160	50.49
DAP_Standard → DAP_Chambal	107		11.00	7	171.45			
DAP_Euro → ASP	07	33.50	10.28	22.18	1232.85	47	2625	0.075
ASP → MAP_Std_Normal_11_52	07	13.50190302	23.83	22.93	1382.85	47	2625	16.725
NPS_12_48_5S → NPS_12_46_7S_1Z	07							
NPS_12_46_7s_1Z → NPS_12_46_7s	07							
DAP_Euro → DAP_Chambal	07		8.00	5	171.45			
NPS_12_48_5S → MAP_TAP_11_52	07		26.53	25.525	1795.35	47	4200	34.425

3.3.2.1.3 Le bilan de matières

Le passage de la solution 1 à la solution 2 génère des gains et des pertes en termes de matières premières, produits intermédiaires et énergie. Ci-dessous nous présentons quelques exemples :

- Par exemple, l'ordre de fabrication n° 8, a été programmé sur une ligne 07 avec des consommations déterminées en termes de P_2O_5 (en acide phosphorique (ACP) 54 %), l'ammoniac (NH_3), le fuel et l'énergie électrique. Il est passé sur une ligne 107 avec des nouvelles consommations spécifiques. Ce changement a généré un gain de 30 t de P_2O_5 et 45 t d'ammoniac et une perte de 7,5 t de fuel et 1 050 kW de l'énergie électrique.
- Le deuxième exemple concerne l'ordre de fabrication n° 25, avec ses propres consommations spécifiques, a passé d'une ligne 107 à une ligne 07, et a généré des pertes de 40 t de P_2O_5 et 100 t de l'ammoniac et un gain de 20 t du fuel et 140 600 kW de l'énergie électrique.
- Finalement, le passage de la solution 1 à la solution 2 a généré à la fois des pertes et des gains dus aux changements de formule.

Dans notre exemple, nous avons comparé les deux solutions sur la base d'un bilan de matière. Le tableau 28 montre les gains et les pertes dus au passage de la solution 1 à la solution 2. Ce tableau illustre le différentiel physique entre les deux solutions (les pertes ont le signe moins (-) et les gains (en italique) sont positifs. Le total des écarts apparaît dans la dernière ligne "Total".

Tableau 28 : la différence de consommations entre les solutions 1 et 2

Inducteurs d'activités	Acide phosphorique 54% (t)	Acide phosphorique 29% (t)	Ammoniac (t)	Fuel (kg)	Vapeur (t)	Energie électrique (kW)	Acide sulfurique(t)
8	30.00	0.00	45.00	-7,500.00	0.00	-1,050.00	0.00
12	-16.00	0.00	-40.00	8,000.00	0.00	56,000.00	0.00
18	-30.00	0.00	-75.00	22,500.00	0.00	105,000.00	0.00
19	70.00	0.00	105.00	-17,500.00	0.00	-2,450.00	0.00
25	-40.00	0.00	-100.00	20,000.00	0.00	140,000.00	0.00
Lancements (Changements de formule)	0.00	28.82	26.03	2,492.80	54.00	6,160.00	33.66
	0.00	-3.00	-2.00	552.45	0.00	0.00	0.00
	37.18	12.07	22.64	1,881.35	52.79	4,620.00	0.00
	3.90	12.80	8.02	709.95	5.79	1,225.00	-0.08
	-13.50	2.78	2.90	412.50	0.00	0.00	17.70
	33.68	17.68	17.65	1,307.85	47.00	2,625.00	0.00
	33.50	10.28	22.18	1,232.85	47.00	2,625.00	0.00
	0.00	18.60	20.83	1,623.90	47.00	2,625.00	34.43
	0.00	-26.53	-25.53	-1,795.35	-47.00	-4,200.00	-34.43
Total	108.76	73.49	27.71	33,918.30	206.58	313,180.00	51.29

3.3.2.2 Comparaison économique

Nous partons donc du principe selon lequel « *c'est la nature de l'usage des coûts qui permet de définir ce que doit être le contenu des chiffres* » (Bouquin, 1997). Nous rappelons que, nous nous intéressons aux décisions opérationnelles, en particulier à la production d'un bilan différentiel permettant de comparer, d'un point de vue économique, plusieurs décisions alternatives possibles. Notre objectif est de montrer que ce type de décision nécessite une évaluation ex ante qui ne peut être obtenue uniquement à partir de la comptabilité de gestion orientée vers le calcul ex post des coûts complets.

3.3.2.2.1 Principes généraux retenus

La décision opérationnelle étudiée (ordonnancement d'engrais) a un impact sur certaines charges et produits à venir dans le compte de résultat. Notre analyse des conséquences physiques des décisions évaluées a montré que les seuls coûts qui varient sont les coûts de production (résultant des différences de performance) et les coûts de lancement générés par les changements de formule d'engrais. Par conséquent, l'impact de décisions antérieurement prises doit être ignoré dans cette comparaison économique des solutions alternatives.

Dans la comparaison de deux solutions, ces inducteurs ont un impact sur les consommations de matières qu'il s'agit de valoriser. Le principe retenu étant celui d'une valorisation ayant un impact direct sur le compte de résultat, cet impact se traduira par des variations de charges mais aussi de variations de produits, lorsque l'on est en présence d'une variation de consommations, certains coûts pouvant correspondre à des manques gagner.

Une évaluation pertinente de décisions opérationnelles mobilise les principes de la méthode ABC, en particulier, ceux veillant sur la relativité de la variabilité et de la fixité des charges, et sur l'introduction des inducteurs d'activité permettant une relation pertinente de cause à effet entre les ressources et les activités qui les consomment. Par ailleurs, une étude ex ante faisant face à des choix de décisions opérationnelles, nécessite la mobilisation des concepts du coût d'opportunité et du coût marginal.

Avant d'illustrer cette approche, soulignons que les informations fournies par le système de comptabilité de gestion en coûts complets adopté par l'OCP ne sont pas suffisantes ou pertinentes pour l'éclairage économique de décisions ayant une portée à moins d'un mois. Cette proposition découle de ce qui va suivre, et de notre diagnostic du système de comptabilité de gestion de l'OCP (3.4.1).

3.3.2.2.2 L'usage de l'approche proposée

L'évaluation des variations de la consommation de matières implique l'utilisation de coûts unitaires facilement compréhensibles. Nous pensons que ceux que nous proposons sont difficilement réfutables. Par exemple, pour les acides, on peut prendre le prix de vente moyen à la tonne, puisqu'une surconsommation d'acide peut s'analyser comme une vente perdue pour l'OCP (en suivant la logique des coûts d'opportunité). Pour le fuel et l'ammoniac, on connaît le coût d'acquisition. Pour la vapeur et l'énergie électrique, c'est plus compliqué. Pour la vapeur, plusieurs systèmes de valorisation sont possibles nous avons retenu le prix de vente ou d'achat auprès des autres entités (joint-ventures). Pour l'énergie électrique nous avons utilisé le coût moyen pondéré de l'énergie produite par la centrale, et celle achetée auprès de l'ONEE (Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable). Le passage de la solution 1 à la solution 2 a généré un gain de 1,7 million de dirhams (environ 160 000 euros) sur l'horizon considéré qui est d'un mois. Il convient de souligner que l'utilisation d'un tel système de valorisation dans la recherche d'un ordonnancement optimal conduit à proposer la solution la plus efficiente, sans explicitation de solutions alternatives également efficaces. La mesure du gain réalisé implique la comparaison avec une autre solution possible. Cela étant, on est assuré de la dominance de la solution optimale trouvée.

Sans remettre en cause la démarche méthodologique proposée, on peut imaginer de partir d'autres données de consommation spécifiques (données « constructeur », par exemple). On peut aussi remettre en cause certains coûts utilisés ici dans notre exemple. Par exemple, le

coût de l'énergie est un coût moyen, alors qu'il serait plus judicieux d'utiliser un coût marginal (que nous ne sommes en mesure d'évaluer actuellement). La recherche d'un coût marginal risque d'être très compliquée car il varie d'un problème d'ordonnancement à un autre, ce qui oblige à chaque fois à une investigation complémentaire alourdissant la démarche.

On peut ajouter enfin que, les lignes 107 ont une capacité plus importante que celle des lignes 07. Par ailleurs, les temps de lancements diffèrent d'une séquence, de qualités d'engrais, à une autre. La prise en compte d'un coût de capacité perdue (suite au changement de formule ou aux affectations des commandes aux lignes), technique utilisée dans une étude antérieure, n'a pas été retenue. Cette capacité excédentaire serait facilement estimable avec une méthode de type imputation rationnelle.

À partir du moment où un ordonnancement optimal respecte toutes les contraintes de livraison, les capacités résiduelles sont sans valeur. Par contre, si elles permettent d'ajouter une commande additionnelle, sur le même horizon d'ordonnancement, et que l'on puisse encore satisfaire toutes les contraintes, le problème n'est plus le même car le surcoût induit par cette commande additionnelle peut se justifier par une vente additionnelle d'engrais autrement perdue, ce qui correspond à un coût d'opportunité. Une partie du problème de la valorisation est liée à la définition du problème d'ordonnancement : si le problème posé conduit à une capacité excédentaire que l'on ne peut mobiliser, la valorisation de cette capacité, sur le court terme, est sans fondement.

3.3.3 Utilisation des coûts du système de comptabilité de gestion de l'OCP

Nous avons montré que le système de comptabilité de gestion de l'OCP est fondé sur l'approche des coûts complets. Les coûts intègrent, en plus des coûts de matières, les frais généraux tels que les loyers, les salaires (hors heures supplémentaires), les assurances, les taxes, etc. Il convient toutefois de noter qu'il s'agit de coûts périodiques qui sont encourus quelle que soit la solution d'ordonnancement choisie. En outre, les coûts du système de comptabilité de gestion de l'OCP comprennent une partie des coûts indirects obtenus par l'allocation des coûts des centres de coûts en fonction des volumes de production. Ces coûts indirects peuvent concerner des coûts de capacité ainsi que des coûts qui varient et qui ne sont pas traçables dans le système de comptabilité de gestion. Cela rend les coûts complets non pertinents pour le calcul des coûts de production requis par les gestionnaires dans leurs processus de la prise de décisions opérationnelles.

Pour synthétiser, une comparaison économique, entre les solutions d'ordonnancement, fondée sur ces coûts est biaisée parce qu'ils incluent des coûts qui ne varient pas avec la solution choisie et parce qu'ils ne tiennent compte que des activités niveau unité. Cela suppose que le volume est le seul inducteur d'activité. En revanche, certaines activités sont induites par d'autres facteurs que le volume (coûts de lancement, arrêt non planifié des lignes de production, etc.) et sont ignorées dans le système traditionnel de comptabilité de gestion.

Dans la comparaison des deux solutions d'ordonnancement présentées précédemment, en passant de la solution 1 à la solution 2 les deux ordres de fabrication 12 et 25 portant sur la même qualité d'engrais (DAP Chambal) et faisant un total de 28 000 t, ont passé d'une ligne 107 à une ligne 07. Si on décide d'utiliser les coûts complets de la comptabilité de gestion, il semblerait que ce changement permette de réaliser un gain de 1,8 million de dirhams (tableau 29). Mais cette différence se décompose en une différence de charges variables directes (matières premières, énergie, etc.), et d'une différence de charges indirectes de capacité imputées à ces deux types de ligne (107, et 07), à hauteur de 900 000 DH. Cette somme ne peut s'analyser comme un gain que l'on peut observer sur le compte de résultat parce que ces charges indirectes ne dépendent pas de la solution adoptée. Elle est générée par des décisions antérieurement prises et encourues, à court terme, quelle que soit la solution choisie.

Tableau 29 : exemple d'utilisation des coûts complets

Coûts complets			Charges indirectes		
lignes 107	Lignes 07	Delta	Lignes 107	Lignes 07	Delta
3,563.91	3,497.14	66.77	772.30	740.16	32.14
99,789,480.00	97,919,920.00	1,869,560.00	21,624,400.00	20,724,480.00	899,920.00

3.3.4 Usage des principes de valorisation économique proposés dans un système d'aide à la décision

Pour mieux comprendre les contributions de l'approche proposée en matière de coûts, nous avons rappelé, dans la partie (4.1.2) du chapitre 3, les bases du DSS telles qu'elles ont été établies par Gorry et Scott Morton (1971) et transformées en une approche structurée par Keen et Scott Morton (1978). Cette approche du DSS pour le problème de programmation des engrais, conçue dans une perspective de CL, est illustrée dans la figure 48.

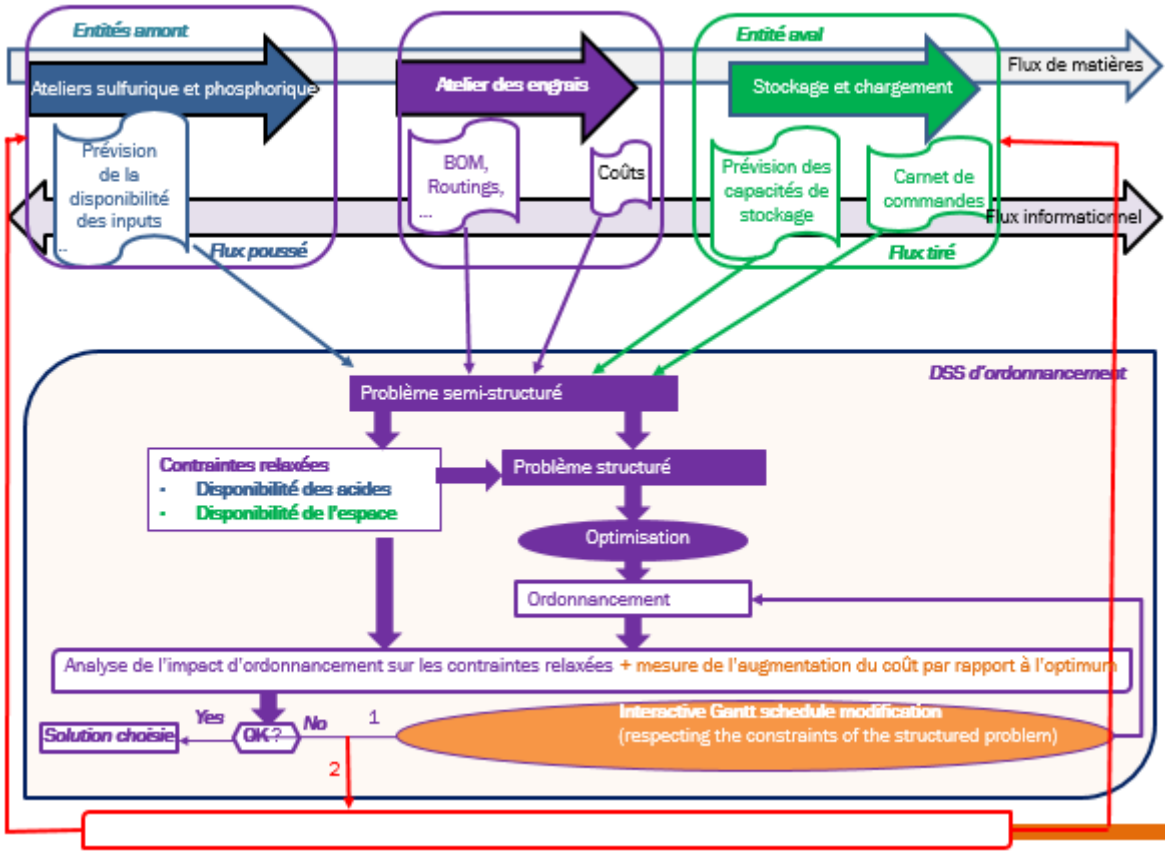

Figure 48 : utilisation de l'approche de valorisation économique dans le DSS d'ordonnancement des lignes de production des engrais

Le problème d'ordonnancement ainsi qu'un système d'aide à la décision de ce problème sont décrits avec détails dans la section 4 du chapitre 3. Le modèle d'optimisation recherche la solution optimale au problème d'ordonnancement sans tenir compte des contraintes de proximité. Cette recherche de la solution optimale est fondée sur la minimisation des coûts variables directs de la production plus les coûts de lancements induits par les changements de formule d'engrais. Une fois la fonction-objectif du modèle est alimentée par les bonnes informations concernant les inducteurs d'activités et les informations économiques, la recherche de la solution optimale par le modèle est fondée sur un calcul implicite de coûts différentiel dont les fondements sont ceux l'approche que nous décrie pour comparer les solutions 1 et 2.

Si la solution optimale trouvée ne respecte pas les contraintes amont ou aval, l'utilisateur modifie la solution en agissant sur le diagramme Gantt (chemin 1 de la figure 48) et les courbes sont automatiquement mises à jour et une éventuelle dégradation du coût total est affichée (coût différentiel par rapport à l'optimum calculé en se basant sur la même approche). Si aucune

solution respectant les contraintes amont ou aval ne peut être trouvée en utilisant cette approche, une négociation (chemin 2 de la figure 48) doit être menée avec les responsables des entités adjacentes de la CL soit pour modifier le carnet de commandes ou l'approvisionnement en acides.

Cette négociation, qui implique des changements à court terme des calendriers de production et de logistique amont ou aval, entraîne des changements de coûts pour les entités concernées. Si le calcul des coûts de décisions à court terme repose sur les principes introduits, on peut imaginer un arbitrage pertinent pour cette CL intégrée impliquant des pertes ou des gains, pour les entités concernées par l'échange de contraintes, dont la consolidation fait sens au niveau du compte de résultat de l'OCP. Cette perspective plus globale peut être considérée comme une partie de la deuxième boucle de rétroaction de la double boucle classique de l'organisation apprenante, introduite par Argyris et Schön (1978) et dont la mise en œuvre effective n'est pas souvent présentée dans la littérature scientifique.

4. CONCLUSION

Ce chapitre a porté sur le volet valorisation économique de décisions. Nous y avons défendu l'idée que les modèles d'aide à la décision doivent utiliser un système d'évaluation économique adapté au système physique étudié et au contexte décisionnel qu'il vise à éclairer. À défaut, les modèles d'aide à la décision ne peuvent prétendre fournir de bonnes solutions, car la solution proposée est une conséquence du système de coûts utilisé.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de deux travaux : le premier concerne une revue de littérature critique concernant l'utilisation de coûts dans les modèles de décision en SCM, le deuxième porte sur une approche de valorisation économique des décisions à court terme, appliquée à l'étude de cas de l'ordonnancement des lignes de production des engrais.

Le travail de la revue de littérature est fondé sur deux questions principales : *i)* jusqu'à quel point les auteurs des articles en SCM étudient l'adéquation entre leurs modèles de décision et les coûts qu'ils utilisent dans ces modèles et *ii)* comment une approche d'évaluation économique inappropriée peut conduire à des décisions non pertinentes.

Pour répondre à ces questions, nous avons effectué une analyse critique de 110 articles proposant des modèles dans le domaine du SCM. Les résultats de la revue répondent à la première question. Ils révèlent que dans la quasi-totalité des articles examinés, les auteurs ne s'investissent pas suffisamment dans l'étude de la pertinence des principes adoptés dans le calcul

du coût différentiel des décisions alternatives étudiées par leurs modèles. Implicitement, ils supposent que les variables d'état, générées par leurs modèles, sont des objets de coût dans le système de comptabilité de gestion et qu'il existe une causalité parfaite (relation linéaire) entre les quantités de variables de décision et les coûts de la fonction-objectif. Cette causalité parfaite est impossible à réaliser dans un système comptable. La deuxième question est traitée dans la discussion des résultats. Nous avons décrit un ensemble de défis liés à l'utilisation de l'évaluation économique dans les modèles de décision.

Les principaux problèmes méthodologiques signalés sont liés : *i)* à la validité de l'utilisation des coûts unitaires par rapport à la variabilité des coûts indirects et du rendement du système productif ; *ii)* à la forte contingence du modèle économique quant aux caractéristiques physiques du système, qui peuvent être modifiées par la solution du modèle ; *iii)* à la particularité du contexte d'inter-costing (découlant des questions de gestion des interrelations impliquant l'utilisation des paramètres de coûts des organisations différentes) ; *iv)* à la particularité des concepts de coûts, nécessaires dans la prise de décision, comme le coût d'opportunité et *vi)* à l'éventuel effet de propagation de l'impact des décisions au-delà du périmètre considéré dans le modèle de décision.

Dans le deuxième travail, nous avons introduit les principes d'une approche d'évaluation économique appropriée pour l'estimation du coût différentiel entre les décisions opérationnelles. Le premier principe consiste à déterminer les conséquences physiques des décisions alternatives examinées. Le deuxième principe consiste à comprendre le comportement de la consommation des ressources en déterminant les inducteurs et les mesures d'activité pertinents. Le troisième principe requiert l'établissement d'un bilan de matière entre les décisions alternatives. Finalement, il s'agit d'estimer le coût différentiel et voir son impact sur le compte de résultat de l'entreprise en se basant sur les concepts de coûts pertinents à savoir le coût d'opportunité et le coût marginal à court terme. En aucun cas, nous ne suggérons d'abandonner le système actuel de comptabilité de gestion. Nous recommandons plutôt de le compléter par l'approche que nous proposons et qui est adaptée au contexte décisionnel opérationnel.

Nous avons présenté une étude de cas réel de la comparaison entre deux solutions viables pour l'ordonnancement des lignes de production parallèles. Nous avons montré que l'évaluation de ces décisions ne peut pas être fondée sur les coûts de la comptabilité de gestion traditionnelle. Nous avons expliqué comment l'approche des coûts que nous proposons pourrait

être utilisée par le système d'aide à la décision d'ordonnancement présenté dans le chapitre 3. Les principes d'évaluation économique proposés entraînent des coûts qui sont pertinents pour notre étude ; ils restent généralement valables et adaptables à d'autres évaluations de décisions opérationnelles dans d'autres entreprises.

Les travaux de ce chapitre visent à intéresser, à la fois, les professionnels de la CL et le monde académique pour qu'ils accordent plus d'attention à la pertinence des modèles économiques qu'ils utilisent dans leurs modèles de décision. Ils mettent l'accent sur la forte interdépendance entre un modèle physique et l'évaluation économique utilisée pour obtenir la solution. Ce chapitre met en évidence la forte interdépendance entre les spécialistes de la comptabilité de gestion, les spécialistes de la modélisation et les managers des CL. Ils doivent collaborer pour déterminer, pour chaque contexte décisionnel, les conséquences réelles des décisions sur le système physique, les concepts de coûts pertinents à mobiliser et le système de coûts approprié à utiliser pour analyser ces comportements de coûts. Cette collaboration peut également aider à surmonter la résistance des professionnels de la comptabilité à intégrer de nouvelles méthodes de calcul des coûts.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette conclusion générale a pour objectif de présenter la synthèse de notre travail, la réponse à la question de recherche et les perspectives envisagées.

1. SYNTHÈSE

Le processus de planification dans une chaîne logistique a pour objectif d'articuler le long terme avec le court terme sous contraintes de décisions stratégiques déjà prises. Les niveaux de décision supérieurs contraignent les niveaux inférieurs pour une convergence des objectifs dans le temps et dans l'espace. La performance globale, recherchée par le SCM, passe par la cohérence décisionnelle horizontale et verticale dans CL. Ces dernières constituent les formes de l'alignement de la CL. Par ailleurs, des modèles de décision peuvent être utilisés à tous les niveaux hiérarchiques de décision. Dans ce cas, la réussite du processus de planification dépend du niveau d'alignement des modèles utilisés. Dans notre projet de recherche nous nous intéressons à la cohérence, par les modèles, d'une chaîne logistique. Un modèle de décision considère une description du système productif à piloter (différente d'un niveau de décision à un autre) et est souvent fondé sur une valorisation économique pour la comparaison entre les décisions alternatives. La cohérence des décisions fournies par un modèle repose sur l'adéquation de la description physique retenue dans la modélisation et de la pertinence de la valorisation économique utilisée. Notre question de recherche se penche sur la cohérence décisionnelle liée à *i)* l'utilisation des modèles de décision aux différents niveaux du processus de planification (stratégique, tactique et opérationnel) et à *ii)* l'utilisation de la valorisation économique dans les modèles de décision.

Notre thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire OCP SA d'optimisation industrielle, rattachée à EMINES *School of Industrial Management* - Université Mohamed VI Polytechnique. La CL de l'OCP est verticalement intégrée en couvrant toutes les étapes de la chaîne de valeur du phosphate depuis la mine jusqu'à l'expédition des produits finis. Notre thèse porte sur un projet Recherche-Intervention mené dans la chaîne logistique du site chimique de Jorf du Groupe OCP. Le comité de la planification tactique de l'OCP prépare ses plannings à l'aide d'un modèle mathématique d'optimisation couvrant toute la CL de l'OCP. Les objectifs définis par ce modèle en termes de quantités à produire, des niveaux des stocks

ou des expéditions des produits finis sont envoyés aux différents sites pour être réalisés. La granularité du modèle est trop agrégée pour prendre en compte les préoccupations des opérationnels, ces derniers trouvent souvent des difficultés à traduire les objectifs qui leur sont assignés. En lançant ce projet de recherche, l'OCP envisage d'améliorer l'efficacité et l'efficience globales de sa CL de Jorf par l'aide à la décision au niveau opérationnel. Dans ce cadre, nous avons fait une exploration de son système physique et de son processus de décision et nous avons travaillé sur deux volets complémentaires :

- Un volet de modélisation physique : dans lequel nous avons proposé deux modèles d'aide à la décision au niveau opérationnel. Un simulateur de la production de Jorf qui a deux usages. Un usage descendant dans lequel le simulateur part de l'état initial du système productif et d'un ensemble de décisions opérationnelles prises par les managers des différentes entités (pour la réalisation des objectifs tactiques), il permet de reproduire le fonctionnement du système productif en réponse à ces décisions. Le modèle anticipe les éventuelles incohérences entre les décisions et détecte la propagation de l'impact d'une décision prise sur un maillon sur les autres maillons de la CL de Jorf. En cas d'incohérences le simulateur en identifie les causes. Il permet ainsi, en faisant appel à l'expertise des managers sur le terrain, de faire des redressements de scénarios alternatifs. Un deuxième usage potentiel du simulateur, non encore testé, consiste à l'utiliser d'une manière ascendante, en activant tous les degrés de liberté possible (ex. échanges d'acides), pour calculer la capacité mensuelle du système productif. Cette dernière pourrait être utilisée comme intrant (capacité du premier mois) dans le modèle d'optimisation tactique dans la recherche du planning trimestriel. Le deuxième outil est un modèle d'optimisation encapsulé dans un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement des lignes de production des engrais. En effet, la partie production des engrais est caractérisée par un flux tiré et un portefeuille de produits très diversifié ; ce qui génère des changements de formules induisant des lancements coûteux de lignes de production. Le DSS vérifie la faisabilité de la solution optimale par rapport aux contraintes de proximité amont et aval. Le modèle considère un horizon temporel allant jusqu'à 3 mois. Dans ce cadre, en cherchant l'ordonnancement optimal, le modèle permet d'étudier la faisabilité des objectifs du planning trimestriel fourni par le modèle tactique d'optimisation.

- Concernant le deuxième volet de la valorisation économique, nous avons développé, après un diagnostic du système de la comptabilité de gestion de l'OCP, les principes d'une approche appropriée pour la valorisation économique des décisions à court terme. Cette approche est fondée sur le calcul du coût différentiel des décisions alternatives. Nous l'avons appliquée pour l'étude des décisions d'ordonnancement des lignes de production des engrais. Nous avons montré la pertinence de l'utilisation de cette approche dans le cas du système interactif d'aide à la décision de l'ordonnancement.

Un projet de Recherche-Intervention nécessite des allers-retours entre la problématique étudiée sur le terrain et la littérature. Dans ce travail nous avons effectué plusieurs revues de littérature distribuées sur les différents chapitres du présent manuscrit. La première concerne la présentation du cadre scientifique du projet (chapitre 1). Nous y avons abordé notamment les défis des modèles de décision vis-à-vis la cohérence des décisions dans une CL. Le développement des modèles physiques a conduit à deux autres revues de littérature (chapitre 3). Une concerne le travail de la simulation, nous y avons justifié notre recours à la simulation à événements discrets et nous y avons montré l'originalité des primitives génériques que nous avons créées pour la modélisation, par simulation, d'une chaîne logistique hybride par la simulation à évènements discrets. Une autre revue a été faite pour montrer l'originalité du modèle d'optimisation de l'ordonnancement des lignes de production des engrais. Pour le volet valorisation économique nous avons tout d'abord présenté un cadre théorique concernant l'utilisation de la valorisation économique dans la prise de décision. Par la suite, nous avons fait une revue de littérature critique d'un ensemble de 110 articles présentant des modèles de décision dans le domaine de la chaîne logistique. L'objectif est de voir jusqu'à quel point les auteurs des modèles mettent-ils l'accent sur la compatibilité entre la modélisation physique qu'ils proposent la valorisation économique retenue dans leurs modèles. Les principales contributions de ce dernier travail de littérature sont les suivantes : *i)* développement d'un cadre théorique portant sur les caractéristiques de l'évaluation économique dans les systèmes de comptabilité de gestion et dans le contexte de la prise de décision ; *ii)* présentation des résultats concernant l'examen des articles en termes d'évaluation économique ; *iii)* mise en évidence d'un ensemble de défis liés à l'utilisation de l'évaluation économique dans les modèles de décision et *iv)* proposition d'un guide méthodologique soulignant les différences entre la comptabilité de gestion traditionnelle de l'entreprise et la valorisation économique à utiliser dans les modèles de décision.

2. RÉPONSE A LA QUESTION DE RECHERCHE

1. Quels sont les défis de cohérence décisionnelle liés à l'utilisation des modèles d'aide à la décision à différents niveaux de la chaîne logistique ?

La description physique retenue dans un modèle diffère d'un niveau de décision à un autre en termes d'objectifs, d'étendue de l'horizon temporel, de périmètre physique couvert par le modèle, de degré de granularité et du degré d'incertitude accepté. En couvrant un périmètre large de la CL, un modèle de planification tactique assure une certaine cohérence horizontale de la CL au niveau tactique. Cependant, son niveau de granularité agrégé ne permet pas de prendre en compte les contraintes, les capacités et les préoccupations quotidiennes des opérationnelles. Les objectifs définis par ce modèle peuvent être incohérents et infaisables. Par exemple, les opérationnels s'intéressent à l'ordonnancement des lignes de production, à la programmation des plages de la maintenance préventives, à la gestion des incidents imprévus, à l'impact des goulots d'étranglement… Ces éléments ne peuvent pas être captés par un modèle tactique.

Même si les modèles sont destinés à des utilisateurs différents, ils ne doivent pas être utilisés d'une manière isolée des autres niveaux de décision. Un modèle tactique déconnecté de l'opérationnel peut définir des objectifs non pertinents, cela conduit à des débats et à des conflits inutiles entre le comité tactique et les opérationnels. La cohérence est fondée sur une vision partagée entre les membres de la CL. Le partage de l'information est un élément fondamental à la cohérence. Il ne doit pas être limité au transfert des objectifs du niveau tactique au niveau opérationnel, mais il doit aussi être ascendant. En effet, les opérationnels sont les mieux placés pour déterminer les capacités de production et sont eux qui ont accès à l'information fiable. Un modèle tactique, ne pouvant pas prendre en compte les contraintes des opérationnels, peut faire appel à des modèles opérationnels pour une estimation fiable des capacités du système productif. Le degré d'alignement entre le tactique et l'opérationnel dépend également du niveau de coordination (cohérence horizontale) entre les entités du niveau opérationnel. Les modèles opérationnels doivent être orientés ou utilisés dans une vision de CL.

2. Quels principes doit fonder le recours à la valorisation économique dans les modèles de décision ?

En plus de la représentation physique, la cohérence et la pertinence des décisions fournies par les modèles reposent sur la compatibilité entre la description faite du système

physique dans la modélisation et la valorisation économique sur laquelle le modèle est fondé pour trouver les solutions. La valorisation économique dans les modèles de décision est différente des systèmes de la comptabilité de gestion de l'entreprise. La valorisation économique dans les modèles doit calculer des coûts futurs au lieu des coûts historiques calculés par les systèmes de comptabilité de gestion. Dans les modèles on s'intéresse à des décisions comme objets de coût, les systèmes de comptabilité de gestion calculent les coûts des produits et services. La valorisation des décisions dans les modèles nécessite le calcul du coût différentiel entre les décisions alternatives, elle fait appel à des concepts de coûts (ex. coût d'opportunité) n'apparaissant pas dans le système de comptabilité de l'entreprise. La valorisation économique sur laquelle doit fonder un modèle est contingente à la modélisation physique retenue. Elle repose sur la valorisation des variables d'état engendrées par la modélisation. Les variables d'état diffèrent d'un modèle à un autre et ne sont pas forcément traçables dans le système de comptabilité de l'entreprise. Par conséquent, les coûts ne peuvent pas être considérés comme des paramètres, définis une fois pour toute, adaptés à tout contexte décisionnel. La valorisation économique pertinente dépend des conséquences physiques des décisions sur le système productif étudié. L'étude des conséquences physiques permet d'identifier les inducteurs d'activité mobilisés, le contenu des coûts à calculer et l'étendue de l'impact des décisions dans le temps et dans l'espace. Le calcul du coût pertinent ne doit prendre compte que les charges générées par la décision étudiée.

3. LIMITES PERSPECTIVES

Les deux modèles de décision opérationnels proposés, ayant un niveau de détail suffisant pour prendre en compte les contraintes du terrain, permettent d'améliorer le processus de prise de décision de Jorf et de favoriser son l'alignement avec le modèle de la planification. Nous avons validé les caractéristiques des modèles auprès du comité de la planification tactique (*Business Steering*) de l'OCP. La première perspective de ce projet consiste à passer à la phase de l'expérimentation des deux modèles de décision sur le terrain.

Comme le montre la figure 37, le modèle d'optimisation de l'ordonnancement peut étudier l'applicabilité de la planification tactique trimestrielle en fonction des contraintes d'ordonnancement de la production des engrais et de son impact sur les stocks d'intrants et d'extrants. Par ailleurs, le simulateur de la production a pour objectif de vérifier la cohérence des décisions opérationnelles prises aux différents maillons de la CL de Jorf. Cependant, rien

ne garantit que les décisions prises au niveau de Jorf soient alignées avec d'autres décisions, prises au même niveau de décision (opérationnel), mais à des endroits différents de la chaîne logistique (ex. la mine, le port). Un alignement parfait des décisions tactiques et opérationnelles reste une question compliquée dans le contexte réel de la chaîne logistique. Une perspective envisagée peut reposer sur le développement de sous-modèles connectés fondés sur des approches de modélisation mathématique ou de simulation (selon l'horizon temporel et le périmètre physique). La négociation des contraintes entre ces différents sous-systèmes devrait ensuite être faite pour étudier l'effet de propagation de l'impact des décisions. Ce travail devrait déboucher sur un travail de collaboration, encours, avec un autre projet de recherche concernant la partie port de Jorf. Il s'agit de coupler le DSS d'ordonnancement des engrais avec un modèle de gestion des hangars de stockage des engrais et un modèle d'allocation des ressources portuaires aux navires (développés dans le cadre d'une autre thèse encours).

Le couplage des modèles physiques développés avec une évaluation économique pertinente est un objectif de ce travail de recherche. Nous avons montré la pertinence de l'approche de valorisation économique proposée dans le cas du système interactif d'aide à la décision de l'ordonnancement des lignes de production des engrais de l'OCP. La valorisation économique des scénarios alternatifs du modèle de simulation est une continuité envisagée de ce projet de recherche. Nous avons expliqué que le simulateur a pour objectif d'étudier la cohérence entre un ensemble de décisions prises par les managers des entités interdépendantes pouvant parfois appartenir à des périmètres juridiques différents (joint-ventures). En cas d'incohérences, il est nécessaire de faire des arbitrages nécessitant des échanges de matières entres les différents ateliers et entre les différentes entités juridiques ce qui engendre le recours à des prix de cession internes. Par ailleurs, si on décide de faire une optimisation globale des flux financiers de l'ensemble des entités de Jorf, l'affectation des commandes aux différentes entités juridiques se fera sur la base d'un critère économique global au lieu des critères juridiques et commerciaux, retenus actuellement. L'optimisation de ce critère économique global nécessitera de se baser sur une valorisation économique pertinente au niveau de chaque entité et de faire recours à des prix de cession internes entre les différentes entités juridiques. Notre de travail devrait alors déboucher sur un autre projet concernant le volet valorisation économique : en exploitant la modélisation physique étendue à tous le périmètre de Jorf (déjà faite), il s'agit d'aborder les deux questions suivantes :

- Dans quel contexte, un groupe de partenaires (filiales et joint-ventures) tendent vers une optimisation globale de la performance ?
- Comment une évaluation économique pertinente peut contribuer à coordonner des organisations dont les objectifs sont divergents ?

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : enchaînement des flux dans une CL (Giard, 2003) 25

Figure 2 : dimensions de l'alignement de la CL 39

Figure 3 : Rôle du contrôle de gestion selon (Anthony, 1988) 41

Figure 4 : Composants d'un DSS selon Keen et Scott-Morton (1978)..... 47

Figure 5 : interactions entre un modèle de décision, le système d'information et le système physique (Mirdamadi, 2009)..... 48

Figure 6 : les étapes de la démarche Recherche-Intervention..... 61

Figure 7: les trois axes de la chaîne logistique de l'OCP (Rapport OCP)..... 63

Figure 8 : cartographie macro de la CL de l'OCP 64

Figure 9 : processus de production d'acide sulfurique (Rapport OCP) 65

Figure 10 : processus de production d'acide phosphorique (Rapport OCP)..... 66

Figure 11 : processus de production des engrais (Rapport OCP) 67

Figure 12 : liaisons entre les ateliers d'une entité juridique (Rapport OCP) 68

Figure 13 : entité MP34..... 69

Figure 14 : Site de Jorf 70

Figure 15 : Processus décisionnel de Jorf 74

Figure 16 : Processus de la Tour de Contrôle 75

Figure 17 : Composition d'une gamme opératoire..... 96

Figure 18 : respect d'antériorité dans l'agrégation de deux activités élémentaires 97

Figure 19: activités élémentaires d'une ligne de production d'acide sulfurique..... 99

Figure 20 : activité agrégée ligne de production d'acide sulfurique 99

Figure 21 : Discrétisation d'un flux continu 104

Figure 22 : Composant générique « Processus Continu »..... 114

Figure 23 : Composant Générique « Stock Capacitaire » 115
Figure 24 : Composant générique « Convertisseur » 116
Figure 25 :composant génétrique « Vanne » 118
Figure 26 : Modélisation d'une ligne de production à flux tirés (utilisant 3 convertisseurs). 120
Figure 27 : capture de l'interface de la saisie des inputs du simulateur 125
Figure 28 : évolution du stock de l'acide sulfurique de l'entité MP34 (output du simulateur) 126
Figure 29 : état des lignes de production ouvertes de l'entité MP34 (output du simulateur) 126
Figure 30 : zoom sur des arrêts de production non programmés sur des lignes d'acide phosphorique 29% de l'entité MP34 127
Figure 31 : état des stocks amont et aval des lignes de production ayant subi des arrêts de production non programmés 128
Figure 32 : Fonctionnement du DSS (Azzamouri *et al.*, 2019a) 136
Figure 33: architecture du DSS 141
Figure 34 : diagramme Gantt de la solution optimale 144
Figure 35 : production cumulée des engrais (toutes les entités) 144
Figure 36 : consommation cumulée de l'acide phosphorique 54% (toutes les entités) 145
Figure 37 : Schéma de l'utilisation intégrée le modèle tactique et les modèles opérationnels 147
Figure 38 : Distribution des articles sur les domaines de problèmes 164
Figure 39 : Interdépendance entre le système physique et les informations sur les coûts 180
Figure 40 : solution 1 d'ordonnancement 186
Figure 41 : solution 2 d'ordonnancement 186
Figure 42 : principes de l'approche d'évaluation économique proposée 188

Figure 43 : Découpage analytique de Jorf 191

Figure 44 : Traitement de la balance (affectation des charges aux stades) 193

Figure 45 : affectation des charges de la balance aux stades familles 194

Figure 46 : calcul des coûts complets des stades principaux 196

Figure 47 : cartographie d'activités relative à la décision "changer la formule d'engrais" ... 200

Figure 48 : utilisation de l'approche de valorisation économique dans le DSS d'ordonnancement des lignes de production des engrais 206

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques des catégories de décisions 32

Tableau 2 : guide d'entretien pour la modélisation physique 80

Tableau 3:guide d'entretien pour l'exploration du système de comptabilité de gestion 86

Tableau 4 : guide d'entretien pour la détermination du coût du changement de formule d'engrais 87

Tableau 5 : Analyse des différences entre les processus continus et discrets 102

Tableau 6 : Nombre de composants génériques utilisés dans la modélisation 122

Tableau 7 : grille d'analyse des articles des problèmes d'ordonnancement 134

Tableau 8 : liste des critères d'optimisation 135

Tableau 9 : Exemple de définition d'un ensemble des ordres de fabrication (avec L = 2 et O = 7) 137

Tableau 10 : Exemple de définition du temps relatif 138

Tableau 11 : carnet de commandes utilisé pour exécuter le DSS 143

Tableau 12: grille d'analyse des articles 162

Tableau 13 : revues de publication des articles 163

Tableau 14 : Présentation des articles de modèles stratégiques 165

Tableau 15 : Présentation des articles de modèles tactiques 167

Tableau 16 : Présentation des articles de modèles opérationnels 170

Tableau 17 : Distribution des articles sur les fonctions-objectifs économiques 172

Tableau 18 : distribution des articles en termes de natures de coûts 174

Tableau 19 : distribution des inducteurs d'activité sur les niveaux de décision 175

Tableau 20 : modèles de gestion d'interrelations 178

Tableau 21 : guide méthodologique 183

Tableau 22 : carnet de commandes 185

Tableau 23 : consommations de la production dans la solution 1 198

Tableau 24 : consommations de la production dans la solution 2 198

Tableau 25 : les séquences de changements de formule d'engrais et les temps de lancements dans les solutions 1 et 2 199

Tableau 26 : consommations des lancements relatifs à la solution 1 200

Tableau 27 : consommations des lancements relatifs à la solution 2 201

Tableau 28 : la différence de consommations entre les solutions 1 et 2 202

Tableau 29 : exemple d'utilisation des coûts complets 205

RÉFÉRENCES

Aalaei, A., Davoudpour, H., 2017. A robust optimization model for cellular manufacturing system into supply chain management. International Journal of Production Economics, vol.183, part C, p. 667–679.

Abar, S., Theodoropoulos, G.K., Lemarinier, P., O'Hare, G.M., 2017. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. Computer Science Review, vol.24, p. 13–33.

Acar, Y., Atadeniz, S.N., 2015. Comparison of integrated and local planning approaches for the supply network of a globally-dispersed enterprise. International Journal of Production Economics, vol.167, p. 204–219.

Ackoff, R.L., 1967. Management misinformation systems. Management science, vol.14, n° 4, p. B–147.

Adamopoulos, G.I., Pappis, C.P., 1998. Scheduling under a common due-data on parallel unrelated machines. European Journal of Operational Research, vol.105, n° 3, p. 494–501.

Afzalirad, M., Rezaeian, J., 2016. Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions. Computers & Industrial Engineering, v.98, p. 40–52.

Aggeri, F., 2016. La recherche-intervention: fondements et pratiques. Dunod.

Agndal, H., Nilsson, U., 2009. Interorganizational cost management in the exchange process. Management Accounting Research, vol.20, n° 2, p. 85–101.

Aldea, A., Bañares-Alcántara, R., Jiménez, L., Moreno, A., Martínez, J., Riaño, D., 2004. The scope of application of multi-agent systems in the process industry: three case studies. Expert Systems with Applications, vol. 26, n° 1, p. 39–47.

Almeder, C., Hartl, R.F., 2013. A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer. International Journal of Production Economics, vol.145, n° 1, p. 88–95.

Amrouche, K., Boudhar, M., Bendraouche, M., Yalaoui, F., 2017. Chain-reentrant shop with an exact time lag: new results. International Journal of Production Research, vol. 55, n° 1, p. 285–295.

Andersson, M., Olsson, G., 1998. A simulation based decision support approach for operational capacity planning in a customer order driven assembly line, in: 1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No. 98CH36274). IEEE, 2. 935–941.

Andreani, E., 1967. Le coût d'opportunité. Revue économique, vol.18, n° 5, p. 840–858.

Anghinolfi, D., Paolucci, M., 2007. Parallel machine total tardiness scheduling with a new hybrid metaheuristic approach. Computers & Operations Research, vol.34, n° 11, p. 3471–3490.

Anthony, R.N., 1988. The management control function. Harvard Business School Press.

Anthony, R.N., 1965. Planning and control systems: A framework for analysis [by]. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard

Argyris, C., 2002. Double-loop learning, teaching, and research. Academy of management learning & education, vol.1, n° 2, p. 206–218.

Azadnia, A.H., Saman, M.Z.M., Wong, K.Y., 2015. Sustainable supplier selection and order lot-sizing: an integrated multi-objective decision-making process. International Journal of Production Research, vol.53, n° 2, p. 383–408.

Azzamouri, A., Bara, N., Elfirdoussi, S., Essaadi, I., Fontane, F., Giard, V., 2019a. DSS

approach for heterogeneous parallel machines scheduling considering proximate supply chain constraints. International Journal of Production Research, vol.58, n° 18, p. 1–19.
Azzamouri, A., Essaadi, I., Elfirdoussi, S., Giard, V., 2019b. Interactive Scheduling Decision Support System a case study for fertilizer production on supply chain, in: ICT for a Better Life and a Better World. Springer, p. 131–146.
Babić, Z., Perić, T., 2014. Multiproduct vendor selection with volume discounts as the fuzzy multi-objective programming problem. International journal of production research, vol.52, n° 14, p. 4315–4331.
Bakke, N.A., Hellberg, R., 1991. Relevance lost? A critical discussion of different cost accounting principles in connection with decision making for both short and long term production scheduling. International Journal of Production Economics, vol.24, n° 1-2, p. 1–18.
Balanchandran, K.R., Li, S., Radhakrishnan, S., 2007. A framework for unused capacity: theory and empirical analysis. Journal of Applied Management Accounting Research, vol.5, n° 1, p. 21.
Baldwin, W.C., Sauser, B., Cloutier, R., 2015. Simulation approaches for system of systems: Events-based versus agent based modeling. Procedia Computer Science, vol.44, n° 1, p. 363–372.
Bandaly, D., Satir, A., Shanker, L., 2016. Impact of lead time variability in supply chain risk management. International Journal of Production Economics 180, 88–100.
Bara, N., Gautier, F., Giard, V., 2020a. Modelling a Hybrid Supply Chain using Discrete Event Simulation. Univ-Dauphine | Lamsade-Dauphine | Univ-Paris1 | CNRS.
Bara, N., Gautier, F., Giard, V., 2020b. Modélisation d'une chaîne logistique hybride par la simulation à évènements discrets. Logistique & Management, vol.28, n° 1, p. 72–87.
Bara, N., Gautier, F., Giard, V., 2020c. An economic evaluation of operational decisions–an application in scheduling evaluation in fertilizer plants. Production Planning & Control, p. 1–16.
Bara, N., Gautier, F., Giard, V., Fontane, F., 2019. Economic evaluation in decision models: a critical review and methodological propositions. Helsinki.
Barratt, M., 2004. Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. Supply Chain Management: an international journal, vol.9, n° 1, p. 30-42.
Barratt, M., 2003. Positioning the role of collaborative planning in grocery supply chains. The International Journal of Logistics Management, vol.14, n° 2, p. 53–66.
Bassett, M.H., Dave, P., Doyle III, F.J., Kudva, G.K., Pekny, J.F., Reklaitis, G.V., Subrahmanyam, S., Miller, D.L., Zentner, M.G., 1996. Perspectives on model based integration of process operations. Computers & chemical engineering, vol.20, n° 6-7, p. 821–844.
Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F., 2014. A sustainable EOQ model: Theoretical formulation and applications. International Journal of Production Economics 149, 145–153.
Bazan, E., Jaber, M.Y., Zanoni, S., Zavanella, L.E., 2014. Vendor Managed Inventory (VMI) with Consignment Stock (CS) agreement for a two-level supply chain with an imperfect production process with/without restoration interruptions. International journal of production economics, vol.157, p. 289–301.
Beaudoin, D., Frayret, J.-M., LeBel, L., 2008. Hierarchical forest management with anticipation: an application to tactical–operational planning integration. Canadian journal of forest research, vol.38, n° 8, p. 2198–2211.
Beck, F.G., Glock, C.H., Kim, T., 2017. Coordination of a production network with a single

buyer and multiple vendors with geometrically increasing batch shipments. International Journal of Production Economics, vol.193, p. 633–646.
Behnamian, J., Zandieh, M., Ghomi, S.F., 2009. Due window scheduling with sequence-dependent setup on parallel machines using three hybrid metaheuristic algorithms. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.44, n° 7-8, p. 795–808.
Ben-Daya, M., Hassini, E., Hariga, M., AlDurgam, M.M., 2013. Consignment and vendor managed inventory in single-vendor multiple buyers supply chains. International Journal of Production Research, vol.51, n° 5, p. 1347–1365.
Bennett, P.G., 1985. On linking approaches to decision-aiding: issues and prospects. Journal of the Operational Research Society, vol.36, n° 8, p. 659–669.
Berrichi, A., Yalaoui, F., 2013. Efficient bi-objective ant colony approach to minimize total tardiness and system unavailability for a parallel machine scheduling problem. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.68, n° 9-12, p. 2295–2310.
Bertrand, J.W.M., Fransoo, J.C., 2002a. Operations management research methodologies using quantitative modeling. International Journal of Operations & Production Management, vol.22, n° 2, p. 241-264.
Bhargava, H.K., Power, D.J., Sun, D., 2007. Progress in Web-based decision support technologies. Decision Support Systems, vol.43, n° 4, p. 1083–1095.
Bhatnagar, R., Chandra, P., Goyal, S.K., 1993. Models for multi-plant coordination. European Journal of Operational Research, vol.67, n° 2, p. 141–160.
Bilgen, B., Ozkarahan, I., 2004. Strategic tactical and operational production-distribution models: a review. International Journal of Technology Management, vol.28, n° 2, p. 151–171.
Bischak, D.P., Robb, D.J., Silver, E.A., Blackburn, J.D., 2014. Analysis and Management of Periodic Review, Order-Up-To Level Inventory Systems with Order Crossover. Production and Operations Management, vol.23, n° 5, p. 762–772.
Bitran, G.R., Tirupati, D., 1993. Hierarchical production planning. Handbooks in operations research and management science, vol.4, p. 523–568.
Boiteux, M., 1951. La tarification au coût marginal et les demandes aléatoires. Cahiers du Séminaire d'économétrie, n° 1, p. 56–69.
Bono, K., Jang, W., Noble, J., 2014. An inventory model with emergency orders under explicit energy cost considerations. International Journal of Production Research, vol.52, n° 1, p. 203–220.
Borshchev, A., Filippov, A., 2004. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools, in: Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Citeseer.
Bouquin, H., 1997. Comptabilité de gestion. 2nd Ed ., Sirey :Paris.
Bouquin, H., 1994. Les fondements du contrôle de gestion. Presses universitaires de France.
Bozorgi, A., Pazour, J., Nazzal, D., 2014. A new inventory model for cold items that considers costs and emissions. International Journal of Production Economics, vol.155, p. 114–125.
Bradshaw, J.M., 1997. An introduction to software agents. Software agents, vol.4, p. 3–46.
Braglia, M., Gabbrielli, R., Zammori, F., 2013. Consignment stock theory with a fixed batch manufacturing process. International Journal of Production Research, vol.51, n° 8, p. 2377–2398.
Brailsford, S., Churilov, L., Dangerfield, B., 2014. Discrete-event simulation and system

dynamics for management decision making. Wiley Online Library.
Brailsford, S.C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., Osorio, A.F., 2018. Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. European Journal of Operational Research, vol.278, n° 3, p. 721-737.
Bruno, G., Genovese, A., Piccolo, C., 2014. The capacitated Lot Sizing model: A powerful tool for logistics decision making. International Journal of Production Economics, vol. 155, p. 380–390.
Bryman, A., 2012. Social research methods. Oxford university press.
Burch, E.E., Henry, W.R., 1974. Opportunity and incremental cost: attempt to define in systems terms: a comment. The Accounting Review, vol.49, n° 1, p. 118–123.
Burlaud, A., Simon, C., 2003. Comptabilité de gestion. Vuibert.
Bylka, S., 2013. Non-cooperative consignment stock strategies for management in supply chain. International Journal of Production Economics, vol.143, n° 2, p. 424–433.
Cao, D., Chen, M., Wan, G., 2005. Parallel machine selection and job scheduling to minimize machine cost and job tardiness. Computers & operations research, vol.32, n° 8, p. 1995–2012.
Cao, E., Wan, C., Lai, M., 2013. Coordination of a supply chain with one manufacturer and multiple competing retailers under simultaneous demand and cost disruptions. International Journal of Production Economics, vol.141, n° 1, p. 425–433.
Cao, E., Zhou, X., 2015. Coordinating a supply chain under demand and cost disruptions. International Journal of Production Research, vol.53, n° 12, p. 3735–3752.
Capar, I., Ulengin, F., Reismanc, A., 2004. A Taxonomy for Supply Chain Management Literature, in: 10th World Conference on Transport Research, World Conference on Transport Research SocietyIstanbul Technical University.
Carrier, S., Fortin, D., 2003. La recherche-intervention pour reconnaître et stimuler une pratique sociale innovante en déficience intellectuelle. Revue francophone de la déficience intellectuelle, vol.14, n° 2, p. 175–181.
Chakraborty, A., Chatterjee, A.K., Mateen, A., 2015. A vendor-managed inventory scheme as a supply chain coordination mechanism. International Journal of Production Research, vol.53, n° 1, p.13–24.
Chan, C.K., Wong, W.H., Langevin, A., Lee, Y.C.E., 2017. An integrated production-inventory model for deteriorating items with consideration of optimal production rate and deterioration during delivery. International Journal of Production Economics, vol.189, p. 1–13.
Chansombat, S., Pongcharoen, P., Hicks, C., 2019. A mixed-integer linear programming model for integrated production and preventive maintenance scheduling in the capital goods industry. International Journal of Production Research, vol.57, n° 1, p. 61–82.
Chen, J.-F., 2010. Scheduling on unrelated parallel machines with sequence-and machine-dependent setup times and due-date constraints. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.44, p. 1204-1212.
Chen, J.-F., 2005. Unrelated parallel machine scheduling with secondary resource constraints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.26, n° 3. p. 285–292.
Chen, J.-F., Wu, T.-H., 2006. Total tardiness minimization on unrelated parallel machine scheduling with auxiliary equipment constraints. Omega, vol.34, n° 1, p. 81–89.
Chen, L.G., Gavirneni, S., 2013. A note on the effectiveness of scheduled balanced ordering in a one-supplier two-retailer system with uniform end-customer demands. International Journal of Production Economics, vol.146, n° 1, p. 240–245.

Chen, T.-H., 2017. Optimizing pricing, replenishment and rework decision for imperfect and deteriorating items in a manufacturer-retailer channel. International Journal of Production Economics, vol.183, p. 539–550.
Choudhary, A., Sarkar, S., Settur, S., Tiwari, M.K., 2015. A carbon market sensitive optimization model for integrated forward–reverse logistics. International Journal of Production Economics, vol.164, p. 433–444.
Christopher, M., 1992. Logistics and Supply Chain Management. Pitman Publishing, London.
Christopher, M., Gattorna, J., 2005. Supply chain cost management and value-based pricing. Industrial marketing management, vol.34, n° 2, p. 115–121.
Clark, F.E., 1921. Criteria of marketing efficiency. The American Economic Review, vol.11, n° 2, p. 214–220.
Clark, J.M., 1923. Studies in the economics of overhead costs. Chicago, Ill., U. P.
Colicchia, C., Creazza, A., Dallari, F., Melacini, M., 2016. Eco-efficient supply chain networks: development of a design framework and application to a real case study. Production planning & control, vol.27, n° 3, p. 157–168.
Comelli, M., 2008. Modélisation, optimisation et simulation pour la planification tactique des chaînes logistiques (PhD Thesis).
Comelli, M., Féniès, P., Tchernev, N., 2008. A combined financial and physical flows evaluation for logistic process and tactical production planning: Application in a company supply chain. International journal of production economics, vol.112, n° 1, p. 77–95.
Cooper, M.C., Ellram, L.M., Gardner, J.T., Hanks, A.M., 1997. Meshing multiple alliances. journal of Business Logistics, vol.18, n° 1, p. 67.
Cooper, R., Kaplan, R.S., 1992. Activity-based systems: Measuring the costs of resource usage. Accounting horizons, vol.6, n° 3, p. 1–13.
Cooper, R., Kaplan, R.S., 1988. How cost accounting distorts product costs. Strategic Finance, vol.69, n° 10, p. 20.
Cooper, R., Slagmulder, R., 1998. Cost management beyond the boundaries of the firm. Management Accounting (USA), vol.79, n° 9, p. 18–20.
Corbey, M., 1994. On the availability of “relevant costs” information in operations management. International Journal of Production Economics, vol.35, n° 1-3, p. 121–129.
Daaboul, J., Castagna, P., Da Cunha, C., Bernard, A., 2014. Value network modelling and simulation for strategic analysis: a discrete event simulation approach. International Journal of Production Research, vol.52, n° 17, p. 5002–5020.
Datar, S., Kekre, S., Mukhopadyay, T., Svaan, E., 1991. Overloaded overheads: Activity-based cost analysis of material handling in cell manufacturing. Journal of Operations Management, vol.10, n° 1, p. 119–137.
David, A., 2000. La recherche intervention, un cadre général pour les sciences de gestion?, in: Conférence de l’AIMS, Paris, France.
de Freitas Rodrigues, R., Dourado, M.C., Szwarcfiter, J.L., 2014. Scheduling problem with multi-purpose parallel machines. Discrete Applied Mathematics 164, 313–319.
de Paula, M.R., Mateus, G.R., Ravetti, M.G., 2010. A non-delayed relax-and-cut algorithm for scheduling problems with parallel machines, due dates and sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research 37, 938–949.
Decoene, V., Bruggeman, W., 2006. Strategic alignment and middle-level managers’ motivation in a balanced scorecard setting. International Journal of Operations & Production Management, vol.26, n° 4, p. 429-448.

Degoun, M., Drissi, A., Féniès, P., Giard, V., Retmi, K., Saadi, J., 2014. 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.

Degoun, M., Fénies, P., Giard, V., Retmi, K., Saadi, J., 2015. Propositions de règles de modélisation pour une simulation discrète d'une chaîne logistique hybride. Congrès international du génie industriel (CIGI2015). Québéc, Canada.

Demeestère, R., Lorino, P., Mottis, N., 2017. Pilotage de l'entreprise et contrôle de gestion-6e éd. Dunod.

Dillon, M., Oliveira, F., Abbasi, B., 2017. A two-stage stochastic programming model for inventory management in the blood supply chain. International Journal of Production Economics, vol.187, p. 27–41.

Dobhan, A., Oberlaender, M., 2013. Hybrid contracting within multi-location networks. International Journal of Production Economics, vol.143, n°2, p. 612–619.

Duan, Q., Liao, T.W., 2013. Optimization of replenishment policies for decentralized and centralized capacitated supply chains under various demands. International Journal of Production Economics, vol. 142, n° 1, p. 194–204.

Duchesne, C., Leurebourg, R., 2012. La recherche-intervention en formation des adultes: une démarche favorisant l'apprentissage transformateur. Recherches qualitatives, vol.31, n° 2, p. 3–24.

Ebadian, M., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Smith, L.T., Stumborg, M., 2014. Development of an integrated tactical and operational planning model for supply of feedstock to a commercial-scale bioethanol plant. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, vol.8, n° 2, p. 171–188.

Eom, S., Kim, E., 2006. A survey of decision support system applications (1995–2001). Journal of the Operational Research Society, vol.57, n° 11, p. 1264–1278.

Er, M.C., 1988. Decision support systems: a summary, problems, and future trends. Decision support systems, vol.4, n° 3, p. 355–363.

Fahimnia, B., Sarkis, J., Choudhary, A., Eshragh, A., 2015. Tactical supply chain planning under a carbon tax policy scheme: A case study. International Journal of Production Economics, vol.164, p. 206–215.

Fang, C., Liao, X., Xie, M., 2016. A hybrid risks-informed approach for the selection of supplier portfolio. International Journal of Production Research, vol.54, n° 7, p. 2019–2034.

Fang, K.-T., Lin, B.M., 2013. Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. Computers & Industrial Engineering, vol.64, n° 1, p. 224–234.

Fanjul-Peyro, L., Perea, F., Ruiz, R., 2017. Models and matheuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources. European Journal of Operational Research, vol.260, n° 2, p. 482–493.

Fawcett, S.E., Smith, S.R., Cooper, M.B., 1997. Strategic intent, measurement capability, and operational success: making the connection. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, vol.27, n° 7, p. 410-421.

Fayard, D., Lee, L.S., Leitch, R.A., Kettinger, W.J., 2014. Interorganizational cost management in supply chains: Practices and payoffs. Management accounting quarterly, vol.15,n° 3, p. 1–9.

Féniès, P., 2006. Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels: application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain (PhD Thesis).

Féniès, P., Gautier, F., Lagrange, S., 2014. A decisional modeling for network franchise and supply chain management, in: Supply Chain Forum: An International Journal. Taylor &

Francis, vol.15, n° 3, p. 52–64.
Féniès, P., Gourgand, M., Tchernev, N., 2004. A framework for supply chain evaluation, in: 5e International Meeting for Research in Logistics, RIRL.
Féniès, P., Lagrange, S., Tchernev, N., 2010. A decisional modelling for supply chain management in franchised networks: application in franchise bakery networks. Production Planning & Control, vol.21, n° 6, p. 595–608.
Fernandes, R., Gouveia, B., Pinho, C., 2013. Integrated inventory valuation in multi-echelon production/distribution systems. International Journal of Production Research, vol.51, n° 9, p. 2578–2592.
Freed, T., Doerr, K.H., Chang, T., 2007. In-house development of scheduling decision support systems: case study for scheduling semiconductor device test operations. International Journal of Production Research, vol.45, n° 21, p. 5075–5093.
Fu, B., Huo, Y., Zhao, H., 2011. Approximation schemes for parallel machine scheduling with availability constraints. Discrete Applied Mathematics, vol.159, n° 15, p. 1555–1565.
Fugate, B., Sahin, F., Mentzer, J.T., 2006. Supply chain management coordination mechanisms. Journal of business logistics, vol.27, n° 2, p. 129–161.
Gabrel, V., 1995. Scheduling jobs within time windows on identical parallel machines: New model and algorithms. European Journal of Operational Research, vol.83, n° 2, p. 320–329.
Gacias, B., Artigues, C., Lopez, P., 2010. Parallel machine scheduling with precedence constraints and setup times. Computers & Operations Research, vol.37, n° 12, p. 2141–2151.
Galasso, F., Mercé, C., Grabot, B., 2009. Decision support framework for supply chain planning with flexible demand. International Journal of Production Research, vol.47, n° 2, p. 455–478.
Ganeshan, R., Jack, E., Magazine, M.J., Stephens, P., 1999. A taxonomic review of supply chain management research, in: Quantitative Models for Supply Chain Management. Springer, p. 839–879.
Gansterer, M., Almeder, C., Hartl, R.F., 2014. Simulation-based optimization methods for setting production planning parameters. International Journal of Production Economics, vol.151, p. 206–213.
Garel, G., 1998. Habilitation à diriger des recherches en sciences de gestion.
Gaur, J., Amini, M., Rao, A.K., 2017. Closed-loop supply chain configuration for new and reconditioned products: An integrated optimization model. Omega, vol.66, part B, p. 212–223.
Gedik, R., Rainwater, C., Nachtmann, H., Pohl, E.A., 2016. Analysis of a parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times and job availability intervals. European Journal of Operational Research, vol.251, n°2, p. 640–650.
Gelders, L.F., Van Wassenhove, L.N., 1981. Production planning: a review. European Journal of Operational Research, vol.7, n° 2, p. 101–110.
Ghasemy Yaghin, R., Fatemi Ghomi, S.M.T., Torabi, S.A., 2014. Enhanced joint pricing and lotsizing problem in a two-echelon supply chain with logit demand function. International Journal of Production Research, vol.52, n° 17, p. 4967–4983.
Ghobadian, A., O'Regan, N., Howard, T., Gallear, D., Kathuria, R., Joshi, M.P., Porth, S.J., 2007. Organizational alignment and performance: past, present and future. Management Decision, vol.45, n° 3, p. 503-517.
Giard, V., 2017. Methodological problems in defining costs used in industrial management decision models. 7th IESM Conference, Saarbrücken, Germany, p. 443-448.

Giard, V., 2003. Gestion de la production et des flux, 3e édition. ed. Economica Paris.
Giard, V., 1990. Une comptabilité de gestion en crise. Gestion Industrielle et Mesure économique : approches et applications nouvelles Economica, Paris, France, p. 135–149.
Giard, V., Azzamouri, A., Essaadi, I., 2015. Définition d'un SIAD d'ordonnancement sur processeurs parallèles hétérogènes, avec prise en compte de fenêtre de fin de production, de plages d'indisponibilités des processeurs et de temps de lancement dépendant du processeur et de la sequence. Cahier du LAMSADE 369, p. 1995–2001.
Giard, V., Azzamouri, A., Essadi, I., 2016. A DSS approach for heterogeneous parallel machines scheduling with due windows, processor-&-sequence-dependent setup and availability constraints. Information system Logistics and Supply Chain, Bordeaux, p. 1–8.
Giard, V., Pellegrin, C., 1992. Fondements de l'évaluation économique dans les modèles économiques de gestion. Revue Française de gestion.
Gong, J., Mitchell, J.E., Krishnamurthy, A., Wallace, W.A., 2014. An interdependent layered network model for a resilient supply chain. Omega, vol.46, p. 104–116.
Gorry, G.A., Scott Morton, M.S., 1971. A framework for management information systems. Sloan Management Review, vol.13, n° 1, p. 49-61.
Govindan, K., Fattahi, M., 2017. Investigating risk and robustness measures for supply chain network design under demand uncertainty: A case study of glass supply chain. International Journal of Production Economics, vol.183, part C, p. 680–699.
Govindan, K., Jha, P.C., Garg, K., 2016. Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing. International Journal of Production Research, vol.54, n° 5, p. 1463–1486.
Guinet, A., 1993. Scheduling sequence-dependent jobs on identical parallel machines to minimize completion time criteria. The International Journal of Production Research, vol.31, n° 7, p. 1579–1594.
Gulati, R., Singh, H., 1998. The architecture of cooperation: Managing coordination costs and appropriation concerns in strategic alliances. Administrative science quarterly, vol.43, n° 4 p. 781–814.
Gunasekaran, A., McNeil, R., Singh, D., 2000. Activity-based management in a small company: a case study. Production Planning & Control, vol.11, n° 4, p. 391–399.
Gurowka, J., Lawson, R.A., 2007. Selecting the right costing tool for your business needs. Journal of Corporate Accounting & Finance, vol.18, n° 3, p. 21–27.
Habibi, M.K., Battaïa, O., Cung, V.-D., Dolgui, A., 2017. Collection-disassembly problem in reverse supply chain. International Journal of Production Economics, vol.183, part B, p. 334–344.
Hammami, R., Frein, Y., 2014. Redesign of global supply chains with integration of transfer pricing: Mathematical modeling and managerial insights. International Journal of Production Economics, vol.158, p. 267–277.
Harrison, P., Shanteau, J., 1993. Do sunk cost effects generalize to cost accounting students. Advances in Management Accounting, vol.2, p. 171–186.
Hart, C., 2018. Doing a literature review: Releasing the research imagination. Sage.
Hashemian, N., Diallo, C., Vizvári, B., 2014. Makespan minimization for parallel machines scheduling with multiple availability constraints. Annals of Operations Research, vol.213, n° 1, p. 173–186.
He, J., Li, Q., Xu, D., 2016. Scheduling two parallel machines with machine-dependent availabilities. Computers & Operations Research, vol.72, p. 31–42.

Heilala, J., Montonen, J., Järvinen, P., Kivikunnas, S., Maantila, M., Sillanpää, J., Jokinen, T., 2010. Developing simulation-based decision support systems for customer-driven manufacturing operation planning, in: Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. IEEE, p. 3363–3375.

Hergert, M., Morris, D., 1989. Accounting data for value chain analysis. Strategic Management Journal, vol.10, n° 2, p. 175–188.

Hidri, L., Gharbi, A., Haouari, M., 2008. Energetic reasoning revisited: application to parallel machine scheduling. Journal of scheduling, vol.11, n° 4, p.239–252.

Hnaien, F., Afsar, H.M., 2017. Robust single-item lot-sizing problems with discrete-scenario lead time. International Journal of Production Economics, vol.185, p. 223–229.

Hrebiniak, L.G., Joyce, W.F., 1984. Implementing strategy. Macmillan Publishing Company, New York, NY.

Huan, S.H., Sheoran, S.K., Wang, G., 2004. A review and analysis of supply chain operations reference (SCOR) model. Supply chain management: An international Journal, vol.9, n° 1, p. 23-29.

Huang, S.H., Sheoran, S.K., Keskar, H., 2005. Computer-assisted supply chain configuration based on supply chain operations reference (SCOR) model. Computers & Industrial Engineering, vol.48, n° 2, p. 377–394.

Huang, S.-M., Su, J.C., 2013. Impact of product proliferation on the reverse supply chain. Omega, vol.41, n°3, p. 626–639.

Hung, Y.-F., Hsiao, J.-Y., 2013. Inventory rationing decision models during replenishment lead time. International Journal of Production Economics, vol.144, n° 1, p. 290–300.

Ivanov, D., 2010. An adaptive framework for aligning (re) planning decisions on supply chain strategy, design, tactics, and operations. International journal of production research, vol.48, n° 13, p. 3999–4017.

Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Werner, F., Ivanova, M., 2016a. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. International Journal of Production Research, vol.54, n° 2, p. 386–402.

Ivanov, D., Hartl, R., Dolgui, A., Pavlov, A., Sokolov, B., 2015. Integration of aggregate distribution and dynamic transportation planning in a supply chain with capacity disruptions and the ripple effect consideration. International Journal of Production Research, vol.53, n° 23, p. 6963–6979.

Ivanov, D., Sokolov, B., 2013. Dynamic co-ordinated scheduling in the supply chain under a process modernisation. International Journal of Production Research, vol.51, n° 9, p. 2680–2697.

Ivanov, D., Sokolov, B., Dolgui, A., 2014. Multi-stage supply chain scheduling with non-preemptive continuous operations and execution control. International Journal of Production Research, vol.52, n° 13, p. 4059–4077.

Jaber, M.Y., Zanoni, S., Zavanella, L.E., 2014. A consignment stock coordination scheme for the production, remanufacturing and waste disposal problem. International Journal of Production Research, vol.52, n° 1, p. 50–65.

Jadidi, O., Zolfaghari, S., Cavalieri, S., 2014. A new normalized goal programming model for multi-objective problems: A case of supplier selection and order allocation. International Journal of Production Economics, vol.148, p. 158–165.

Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K., Young, T., 2010. Simulation in manufacturing and business: A review. European Journal of Operational Research, vol.203, n° 1, p. 1–13.

Jeong, S.J., Kim, K.S., 2008. Parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and

space limits. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.37, n° 7-8, p. 793–802.
Ji, P., Ma, X., Li, G., 2015. Developing green purchasing relationships for the manufacturing industry: An evolutionary game theory perspective. International Journal of Production Economics, vol.166, p. 155–162.
Jiang, L., Pei, J., Liu, X., Pardalos, P.M., Yang, Y., Qian, X., 2017. Uniform parallel batch machines scheduling considering transportation using a hybrid DPSO-GA algorithm. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.89, n° 5-8, p. 1887–1900.
Jin, X., Li, K., Sivakumar, A.I., 2013. Scheduling and optimal delivery time quotation for customers with time sensitive demand. International Journal of Production Economics, vol.145, n° 1, p. 349–358.
Johansen, S.G., 2013. Modified base-stock policies for continuous-review, lost-sales inventory models with Poisson demand and a fixed lead time. International Journal of Production Economics, vol.143, n° 2, p. 379–384.
Johnson, T.H., Kaplan, R.S., 1987. Relevance lost: the rise and fall of management accounting. Harvard Business School Press.
Joo, C.M., Kim, B.S., 2015. Hybrid genetic algorithms with dispatching rules for unrelated parallel machine scheduling with setup time and production availability. Computers & Industrial Engineering, vol.85, p. 102–109.
Kampstra, R.P., Ashayeri, J., Gattorna, J.L., 2006. Realities of supply chain collaboration. The international journal of logistics management, vol. 17, n° 3, p.312-330.
Kang, H.-Y., Lee, A.H., 2013. A stochastic lot-sizing model with multi-supplier and quantity discounts. International Journal of Production Research, vol.51, n° 1, p. 245–263.
Kannan, G., Grigore, M.C., Devika, K., Senthilkumar, A., 2013. An analysis of the general benefits of a centralised VMI system based on the EOQ model. International Journal of Production Research, vol.51, n°1, p. 172–188.
Kaplan, R.S., 1998. Cost & effect: using integrated cost systems to drive profitability and performance. Harvard Business Press, Boston.
Karlsson, C., 2016. Research methods for operations management, 2ed edition, Routledge, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon
Kathuria, R., Porth, S.J., 2003. Strategy implementation: managing the organizational issues. Strategic management: A crossfunctional approach, Prentice Hall, New Jersey, p. 205–236.
Keen PWG and Scott-Morton MS., 1978. Decision Support Systems: An Organisational Perspective. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.
Keskinocak, P., Wu, F., Goodwin, R., Murthy, S., Akkiraju, R., Kumaran, S., Derebail, A., 2002. Scheduling solutions for the paper industry. Operations Research, vol.50, n° 2, p. 249–259.
Kilcarr, S., 2018. Heads up: New supply chain costing methods are being called for, Fleet Owner Exclusive Insight, p. 1-1
Kim, D.-W., Kim, K.-H., Jang, W., Chen, F.F., 2002. Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.18, n° 3-4, p. 223–231.
Kim, D.-W., Na, D.-G., Chen, F.F., 2003. Unrelated parallel machine scheduling with setup times and a total weighted tardiness objective. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.19, n° 1-2, p. 173–181.
Kim, T., Glock, C.H., 2018. Production planning for a two-stage production system with

multiple parallel machines and variable production rates. International Journal of Production Economics, vol.196, p. 284–292.
Kim, T., Glock, C.H., Kwon, Y., 2014. A closed-loop supply chain for deteriorating products under stochastic container return times. Omega, vol.43, p. 30–40.
Kleijnen, J.P., 2005. Supply chain simulation tools and techniques: a survey. International Journal of Simulation and Process Modelling, vol.1, n° 1-2, p. 82–89.
Kouki, C., Jouini, O., 2015. On the effect of lifetime variability on the performance of inventory systems. International Journal of Production Economics, vol.167, p. 23–34.
Kreipl, S., Pinedo, M., 2004. Planning and scheduling in supply chains: an overview of issues in practice. Production and Operations management, vol.13, n° 1, p. 77–92.
Krishna, L.S., Janardhan, G.R., Rao, C.S.P., 2009. Web integrated decision support system for machine scheduling and inventory management. IUP Journal of Operations Management, vol. 43, p.148-154.
Krishnaiyer, K., Chen, F.F., 2017. Web-based visual decision support system (WVDSS) for letter shop. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol.43, p. 148–154.
Kulmala, H.I., Paranko, J., Uusi-Rauva, E., 2002. The role of cost management in network relationships. International Journal of Production Economics, vol.79, n° 1, p. 33–43.
Kumar, M., Rajotia, S., 2006. Integration of process planning and scheduling in a job shop environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.28, n° 1-2, p. 109–116.
Laínez, J.M., Puigjaner, L., 2012. Prospective and perspective review in integrated supply chain modelling for the chemical process industry. Current Opinion in Chemical Engineering, vol.1, n° 4, p. 430–445.
Lambert, D., Stock, J.R., Ellram, L.M., 1998. Fundamentals of logistics management. McGraw-Hill/Irwin, Boston.
Lawrence, P.R., Lorsch, J.W., 1986. Organization and environment: managing differentiation and integration Boston: Harvard Business Review Press.
Lawrence, P.R., Lorsch, J.W., 1967. Differentiation and integration in complex organizations. Administrative science quarterly, vol.12, n° 1, p. 1–47.
Lawson, R. (2017), Working together to Enhance Supply Chain Management with Better Costing Practices, APICS & IMA Report
Lee, C.-Y., 1991. Parallel machines scheduling with nonsimultaneous machine available time. Discrete Applied Mathematics, vol.30, n° 1, p. 53–61.
Lee, H.-T., Yang, D.-L., Yang, S.-J., 2013. Multi-machine scheduling with deterioration effects and maintenance activities for minimizing the total earliness and tardiness costs. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.66, n° 1-4, p. 547–554.
Lee, J.-H., Yu, J.-M., Lee, D.-H., 2013. A tabu search algorithm for unrelated parallel machine scheduling with sequence-and machine-dependent setups: minimizing total tardiness. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.69, n° 9-12, p. 2081–2089.
Lee, J.-Y., Kim, Y.-D., 2015. A branch and bound algorithm to minimize total tardiness of jobs in a two identical-parallel-machine scheduling problem with a machine availability constraint. Journal of the Operational Research Society, vol.66, n° 9, p. 1542–1554.
Lee, Y.H., Pinedo, M., 1997. Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. European Journal of Operational Research, vol.100, n° 3, p. 464–474.
Leiras, A., Ribas, G., Hamacher, S., Elkamel, A., 2013. Tactical and operational planning of multirefinery networks under uncertainty: an iterative integration approach. Industrial

& Engineering Chemistry Research, vol.52, n° 25, p. 8507–8517.
Leng, F.L., Zailani, S., 2012. Effects of information, material and financial flows on supply chain performance: A study of manufacturing companies in Malaysia. International journal of management, vol.29, n° 1, p. 293.
Leung, L.C., Wong, W.H., Van Hui, Y., Wan, Y., 2013. Managing third-party logistics under uncertainty: A decision scheme and managerial implications. International Journal of Production Economics, vol.145, n° 2, p. 630–644.
Li, Q., Milne, R.J., 2014. A production scheduling problem with sequence-dependent changeover costs. International Journal of Production Research, vol.52, n° 13, p. 4093–4102.
Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., Hu, Y., 2017. Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study. International Journal of Production Research, vol.55, n° 5, p. 498–1515.
Liao, C.J., Chen, C.M., Lin, C.H., 2007. Minimizing makespan for two parallel machines with job limit on each availability interval. Journal of the Operational Research Society, vol.58, n° 7, p. 938–947.
Liao, C.-J., Shyur, D.-L., Lin, C.-H., 2005. Makespan minimization for two parallel machines with an availability constraint. European Journal of Operational Research, vol.160, n° 2, p. 445–456.
Liao, W., Chen, M., Yang, X., 2017. Joint optimization of preventive maintenance and production scheduling for parallel machines system. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol.32, n° 1, p. 913–923.
Lim, L.L., Alpan, G., Penz, B., 2014. Reconciling sales and operations management with distant suppliers in the automotive industry: A simulation approach. International Journal of Production Economics 151, 20–36.
Lin, S.-W., Lu, C.-C., Ying, K.-C., 2011. Minimization of total tardiness on unrelated parallel machines with sequence-and machine-dependent setup times under due date constraints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.53, n° 1-4, p. 353–361.
Lin, S.-W., Ying, K.-C., 2014. ABC-based manufacturing scheduling for unrelated parallel machines with machine-dependent and job sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research, vol.51, p. 172–181.
Lingle, J.H., Schiemann, W.A., 1996. From balanced scorecard to strategic gauges: is measurement worth it? Management review, vol.85, n° 3, p. 56.
Liu, W., Ge, M., Yang, D., 2013. An order allocation model in a two-echelon logistics service supply chain based on the rational expectations equilibrium. International Journal of Production Research, vol.51, n° 13, p. 3963–3976.
Logendran, R., McDonell, B., Smucker, B., 2007. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups. Computers & Operations Research, vol.34, n° 11, p. 3420–3438.
Lopes, M.J.P., de Carvalho, J.V., 2007. A branch-and-price algorithm for scheduling parallel machines with sequence dependent setup times. European journal of operational research, vol.176, n° 3, p. 1508–1527.
Lorino, P., 1992 "*La gestion par les activités*", dans « Évaluer pour évoluer » du Séminaire AFGI du 15 octobre 1992.
Luangkesorn, K.L., Klein, G., Bidanda, B., 2016. Analysis of production systems with potential for severe disruptions. International Journal of Production Economics, vol.171, p. 478–486.

Lucey, T., 2003. Management Accounting. London. Letts. Educational.
Ma, H.L., Chan, F.T., Chung, S.H., 2013. Minimising earliness and tardiness by integrating production scheduling with shipping information. International journal of production research, vol.51, n° 8, p. 2253–2267.
Maestrini, V., Luzzini, D., Maccarrone, P., Caniato, F., 2017. Supply chain performance measurement systems: A systematic review and research agenda. International Journal of Production Economics, vol.183, p. 299–315.
Malone, T.W., Crowston, K., 1994. The interdisciplinary study of coordination. ACM Computing Surveys (CSUR), vol.26, n° 1, p. 87–119.
Manupati, V.K., Rajyalakshmi, G., Chan, F.T., Thakkar, J.J., 2017. A hybrid multi-objective evolutionary algorithm approach for handling sequence-and machine-dependent set-up times in unrelated parallel machine scheduling problem. Sādhanā, vol.42, n° 3, p. 391–403.
Maravelias, C.T., Sung, C., 2009. Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities. Computers & Chemical Engineering, vol.33, n° 12, p. 1919–1930.
March, J.G. and Simon, H.A., 1958 Organizations (New York: John Wiley,
Martinez, V., Radnor, Z., Cavalieri, S., Gaiardelli, P., Ierace, S., 2007. Aligning strategic profiles with operational metrics in after-sales service. International Journal of Productivity and Performance Management, vol. 56, n° 5-6, p. 436-455.
Martinez-Olvera, C., 2010. Impact of the alignment between the strategic and operational levels of a manufacturing enterprise. International Journal of Production Research, vol.48, n° 4, p. 1195–1215.
Maturana, S., Ferrer, J.-C., Barañao, F., 2004. Design and implementation of an optimization-based decision support system generator. European Journal of Operational Research, vol.154, n° 1, p. 170–183.
McKay, K.N., Safayeni, F.R., Buzacott, J.A., 1995. A review of hierarchical production planning and its applicability for modern manufacturing. Production Planning & Control, vol.6, n° 5, p. 384–394.
McKinnon, S.M., Burns Jr, W.J., 1992. The information mosaic', Harvard Business School Press, Boston, MA.
Mehra, S., Inman, R.A., Tuite, G., 2006. A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industry. Production Planning & Control, vol.17, n° 1, p. 54–66.
Meng, Q., Li, Z., Liu, H., Chen, J., 2017. Agent-based simulation of competitive performance for supply chains based on combined contracts. International Journal of Production Economics, vol.193, p. 663–676.
Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G., 2001. Defining supply chain management. Journal of Business logistics, vol. 22, n° 2, p. 1–25.
Meyer, M., Robinson, H., Fisher, M., Van der Merwe, A., Streicher, G., Van Rensburg, J.J., Van den Berg, H., Dreyer, E., Joubert, J., Bonthuys, G., 2011. Innovative decision support in a petrochemical production environment. Interfaces, vol.41, n° 1, p. 79–92.
Miller, D., 1996. Configurations revisited. Strategic management journal, vol.17, n° 7, p. 505–512.
Miller, E.J., 1959. Technology, territory, and time: The internal differentiation of complex production systems. Human Relations, vol.12, n° 3, p. 243–272.
Min, H., Zhou, G., 2002. Supply chain modeling: past, present and future. Computers & industrial engineering, vol.43, n° 1-2, p. 231–249.

Mintzberg H., 1982. Structure et dynamique des organisations. Les Editions d'Organisation, Paris.
Mirdamadi, S., 2009. Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution (PhD Thesis).
Moghaddam, K.S., 2015. Supplier selection and order allocation in closed-loop supply chain systems using hybrid Monte Carlo simulation and goal programming. International Journal of Production Research, vol.53, n° 20, p. 6320–6338.
Mogre, R., Wong, C.Y., Lalwani, C.S., 2014. Mitigating supply and production uncertainties with dynamic scheduling using real-time transport information. International Journal of Production Research, vol.52, n° 17, p. 5223–5235.
Moncayo-Martínez, L.A., Zhang, D.Z., 2013. Optimising safety stock placement and lead time in an assembly supply chain using bi-objective MAX–MIN ant system. International Journal of Production Economics, vol.145, n° 1, p. 18–28.
Monemi, R.N., Danach, K., Khalil, W., Gelareh, S., Lima Jr, F.C., Aloise, D.J., 2015. Solution methods for scheduling of heterogeneous parallel machines applied to the workover rig problem. Expert Systems with Applications, vol.42, n° 9, p. 4493–4505.
Moon, J.-Y., Shin, K., Park, J., 2013. Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.68, n° 1-4, p. 523–535.
Moran, P., Ghoshal, S., 1999. Markets, firms, and the process of economic development. Academy of management review, vol. 24, n° 3, p. 390–412.
Morgan, J.S., Howick, S., Belton, V., 2017. A toolkit of designs for mixing discrete event simulation and system dynamics. European Journal of Operational Research, vol.257, n° 3, p. 907–918.
Moss, M.F., Haseman, W.C., 1957. Some Comments on the Applicability of Direct Costing to Decision Making. Accounting Review, vol.32, n° 2, p. 184–193.
Mouritsen, J., Hansen, A., Hansen, C.Ø., 2001. Inter-organizational controls and organizational competencies: episodes around target cost management/functional analysis and open book accounting. Management Accounting Research, vol.12, n° 2, p. 221–244.
Muñoz, E., Capón, E., Laínez, J.M., Moreno-Benito, M., Espuña, A., Puigjaner, L., 2012. Operational, Tactical and strategical integration for enterprise decision-making, in: Computer Aided Chemical Engineering. Elsevier, vol.30, p. 397–401.
Mušič, G., Matko, D., 1999. Combined simulation for process control: extension of a general purpose simulation tool. Computers in Industry, vol.38, n° 2, p. 79–92.
Narasimhan, R., Mahapatra, S., 2004. Decision models in global supply chain management. Industrial Marketing Management, vol.33, n° 1, p. 21–27.
Nedaei, H., Mahlooji, H., 2014. Joint multi-objective master production scheduling and rolling horizon policy analysis in make-to-order supply chains. International Journal of Production Research, vol.52, n° 9, p. 2767–2787.
Neely, A., Mills, J., Platts, K., Gregory, M., Richards, H., 1994. Realizing strategy through measurement. International Journal of Operations & Production Management, vol.14, n° 3, p. 140-152.
Neidigh, R.O., Harrison, T.P., 2013. Optimising lot sizing with nonlinear production rates in a multi-product single-machine environment. International Journal of Production Research, vol.51, n° 12, p. 3561–3573.
Nurjanni, K.P., Carvalho, M.S., Costa, L., 2017. Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. International

Journal of Production Economics, vol.183, part B, p. 421–432.
Obeid, A., Dauzère-Pérès, S., Yugma, C., 2014. Scheduling job families on non-identical parallel machines with time constraints. Annals of Operations Research, vol.213, n° 1, p. 221–234.
Olhager, J., 2012. The role of decoupling points in value chain management, in: Modelling Value. Springer, p. 37–47.
Olteanu, A.P., 2011. A Decision Support System (DSS) for Project Management in the Biodiesel Industry. Informatica Economica, vol.15, n° 4, p. 189-202.
Omar, R., Shaik, M.A., 2018. Short-Term Scheduling of Continuous Plants Based on Conditional Sequencing for Planned Maintenance. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol.57, n° 8, p. 2917–2931.
Özceylan, E., Paksoy, T., 2013. A mixed integer programming model for a closed-loop supply-chain network. International Journal of Production Research, vol.51, n° 3, p. 718–734.
Paul, S.K., Sarker, R., Essam, D., 2014. Managing real-time demand fluctuation under a supplier–retailer coordinated system. International Journal of Production Economics, vol.158, p. 231–243.
Parker, B.J., Al-Utaibi, G.A., 1986. Decision support systems: The reality that seems hard to accept? Omega, vol.14, n° 2, p. 135–143.
Phillips, L.D., 1984. A theory of requisite decision models. Acta psychologica, vol.56, n° 1-3, p. 29–48.
Piewthongngam, K., Pathumnakul, S., Homkhampad, S., 2013. An interactive approach to optimize production–distribution planning for an integrated feed swinecompany. International Journal of Production Economics, vol.142, n° 2, p. 290–301.
Pirard, F., Iassinovski, S., Riane, F., 2011. A simulation based approach for supply network control. International journal of production research, vol.49, n° 24, p. 7205–7226.
Porter, M.E., 1996. What is strategy? Harvard business review, vol.74, n° 6, p. 61–78.
Porter, M.E., 1985. Technology and competitive advantage. The Journal of Business Strategy, vol.5, n° 3, p. 60.
Porter, M.E., Kramer, M.R., 1985. Advantage. Creating and Sustaining Superior Performance, Simons, p. 56-68.
Power, D.J., Sharda, R., 2007. Model-driven decision support systems: Concepts and research directions. Decision Support Systems, vol.43, n° 3, p. 1044–1061.
Quinet, C., 1994. Herbert Simon et la rationalité. Revue française d'économie, vol.9, n° 1, p. 133–181.
Rached, M., Bahroun, Z., Campagne, J.-P., 2016. Decentralised decision-making with information sharing vs. centralised decision-making in supply chains. International Journal of Production Research, vol.54, n° 24, p. 7274–7295.
Rad, R.H., Razmi, J., Sangari, M.S., Ebrahimi, Z.F., 2014. Optimizing an integrated vendor-managed inventory system for a single-vendor two-buyer supply chain with determining weighting factor for vendor′ s ordering cost. International Journal of Production Economics, vol.153, p. 295–308.
Rafique, R., Mun, K.G., Zhao, Y., 2017. Designing energy supply chains: Dynamic models for energy security and economic prosperity. Production and Operations Management, vol.26, n° 6, p. 1120–1141.
Retmi, K., 2018. Une approche pour une évaluation économique des décisions opérationnelles et tactiques: mise en øeuvre sur la Supply chain de l'OCP (PhD Thesis). Paris 10.
Rice, B.B.A., 1978. Productivity and Social Organization (London: Tavistock, 1958). Rice227Productivity and Social Organization1958, London, p. 227–233.

Robson, I., 2004. From process measurement to performance improvement. Business Process Management Journal, vol.10, n° 5, p. 510-521.
Rocha, P.L., Ravetti, M.G., Mateus, G.R., Pardalos, P.M., 2008. Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. Computers & Operations Research,vol.35, n° 4, p. 1250–1264.
Roni, M.S., Eksioglu, S.D., Jin, M., Mamun, S., 2016. A hybrid inventory policy with split delivery under regular and surge demand. International Journal of Production Economics, vol.172, p. 126–136.
Ronken, H.O., Lawrence, P.R., 1952. Administering changes. Harvard University, Division of Research, Graduate School of Business Administration
Rorem, C.R., 1928. Differential costs. Accounting Review, vol.3, n° 4, p.333–341.
Russell, R.A., 2017. Mathematical programming heuristics for the production routing problem. International Journal of Production Economics, vol.193, p. 40–49.
Ryu, K., Moon, I., Oh, S., Jung, M., 2013. A fractal echelon approach for inventory management in supply chain networks. International Journal of Production Economics, vol. 143, n° 2, p. 316–326.
Sáenz-Alanís, C.A., Jobish, V.D., Salazar-Aguilar, M.A., Boyer, V., 2016. A parallel machine batch scheduling problem in a brewing company. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.87, n° 1-4, p. 65–75.
Sağlam, Ü., Banerjee, A., 2018. Integrated multiproduct batch production and truck shipment scheduling under different shipping policies. Omega, vol.74, p. 70–81.
Salehi, H., Taleizadeh, A.A., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2016. An EOQ model with random disruption and partial backordering. International Journal of Production Research, vol.54, n° 9, p. 2600–2609.
Sali, M., Giard, V., 2015. Optimal stock-out risk when demand is driven by several mixed-model assembly lines in the presence of emergency supply. International Journal of Production Research, vol.53, n° 11, p. 3448–3461.
Schaal, K., Hübner, A., 2018. When does cross-space elasticity matter in shelf-space planning? A decision analytics approach. Omega, vol.80, p. 135–152.
Schmidt, G., Wilhelm, W.E., 2000. Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: a review and discussion of modelling issues. International Journal of Production Research, vol.38, n° 7, p. 1501–1523.
Scholz-Reiter, B., Freitag, M., De Beer, C., Jagalski, T., 2005. Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches. CIRP annals, vol.54, n° 1, p. 413–416.
Schulze, M., Seuring, S., Ewering, C., 2012. Applying activity-based costing in a supply chain environment. International Journal of Production Economics, vol.135, n° 2, p. 716–725.
Schutten, J.M., Leussink, R.A.M., 1996. Parallel machine scheduling with release dates, due dates and family setup times. International journal of production economics, vol.46, p. 119–125.
Scott, J., Ho, W., Dey, P.K., Talluri, S., 2015. A decision support system for supplier selection and order allocation in stochastic, multi-stakeholder and multi-criteria environments. International Journal of Production Economics, vol.166, p. 226–237.
Senechal, O., Tahon, C., 1997. A modelling approach for production costing and continuous improvement of manufacturing processes. Production Planning & Control, vol.8, n° 8, p. 731–742.
Shah, N.K., Ierapetritou, M.G., 2012. Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry. Computers & Chemical

Engineering, vol.37, p. 214–226.
Shankar, R., Bhattacharyya, S., Choudhary, A., 2018. A decision model for a strategic closed-loop supply chain to reclaim End-of-Life Vehicles. International Journal of Production Economics, vol.195, p. 273–286.
Shao, J., Krishnan, H., Thomas McCormick, S., 2013. Distributing a product line in a decentralized supply chain. Production and Operations Management, vol.22, n° 1, p. 151–163.
Sharma, R.N., Chand, N., Sharma, V., Yadav, D., 2015. Decision support system for operation, scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.43, p. 1099–1113.
Shillinglaw, G., 1963. The concept of attributable cost. Journal of Accounting Research, vol.1, n° 1, p. 73–85.
Shim, J.P., Warkentin, M., Courtney, J.F., Power, D.J., Sharda, R., Carlsson, C., 2002. Past, present, and future of decision support technology. Decision support systems, vol.33, n° 2, p. 111–126.
Shirazi, B., Mahdavi, I., Solimanpur, M., 2012. Intelligent decision support system for the adaptive control of a flexible manufacturing system with machine and tool flexibility. International journal of production research, vol.50, n° 12, p. 3288–3314.
Shivakumar, R., 2014. How to tell which decisions are strategic. California Management Review, vol.56, n° 3, p. 78–97.
Siebers, P.-O., Macal, C.M., Garnett, J., Buxton, D., Pidd, M., 2010. Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! Journal of Simulation, vol.4, n° 3, p. 204–210.
Simon, H.A., 1957. Models of man; social and rational. New York, Wiley.
Sinha, A.K., Davich, T., Krishnamurthy, A., 2016. Optimisation of production and subcontracting strategies. International Journal of Production Research, vol.54, n° 8, p. 2377–2393.
Smith, M.H., Smith, D., 2007. Implementing strategically aligned performance measurement in small firms. International Journal of Production Economics, vol.106, n° 2, p. 393–408.
Soleimani, H., Seyyed-Esfahani, M., Kannan, G., 2014. Incorporating risk measures in closed-loop supply chain network design. International Journal of Production Research, vol.52, n° 6, p. 1843–1867.
Solis, A.O., 2001. Supply chain integration and coordination. The criterion, p. 1–3.
Sprague Jr, R.H., 1980. A framework for the development of decision support systems. MIS quarterly, vol.4, n° 4, p. 1–26.
St\aalhane, M., Andersson, H., Christiansen, M., Fagerholt, K., 2014. Vendor managed inventory in tramp shipping. Omega, vol.47, p. 60–72.
Stoica, P., Söderström, T., 1982. On the parsimony principle. International Journal of Control, vol.36, n° 3, p. 409–418.
Stratton, W.O., Desroches, D., Lawson, R.A., Hatch, T., 2009. Activity-based costing: Is it still relevant? Management accounting quarterly, vol.10, n° 3, p. 31.
Tahar, D.N., Yalaoui, F., Chu, C., Amodeo, L., 2006. A linear programming approach for identical parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times. International journal of production economics, vol.99, n° 1-2, p. 63–73.
Tahirov, N., Hasanov, P., Jaber, M.Y., 2016. Optimization of closed-loop supply chain of multi-items with returned subassemblies. International Journal of Production Economics, vol.174, p. 1–10.

Tang, L., Jing, K., He, J., 2013. An improved ant colony optimisation algorithm for three-tier supply chain scheduling based on networked manufacturing. International Journal of Production Research, vol.51, n° 13, p. 3945–3962.
Tang, L., Liu, G., 2007. A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in Shanghai Baoshan Iron and Steel Complex. European Journal of Operational Research, vol.182, n° 3, p. 1453–1468.
Tchernev, N., 1997. Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production (PhD Thesis). Clermont-Ferrand 2.
Tellis, W., 1997. Introduction to case study. The qualitative report, vol.3, n° 2, p. 269.
Thompson, J. D., 1967. Organizations in Action: Social Science Bases of Administrative Theory, New York, Mc Graw-Hill.
Tosi, H.L., 2008. James March and Herbert Simon, Organizations. Theories of organization, vol.1, n° 3, p. 93–102.
Turkulainen, V., Roh, J., Whipple, J.M., Swink, M., 2017. Managing internal supply chain integration: integration mechanisms and requirements. Journal of Business Logistics, vol.38, n° 4, p. 290–309.
Turvey, R., 1969. Marginal cost. The Economic Journal, vol.79, n° 314, p. 282–299.
Vallada, E., Ruiz, R., 2011. A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. European Journal of Operational Research, vol.211, n° 3, p. 612–622.
Van der Heijden, M.C., Alvarez, E.M., Schutten, J.M., 2013. Inventory reduction in spare part networks by selective throughput time reduction. International journal of production economics, vol.143, n° 2, p. 509–517.
Van Hop, N., Nagarur, N.N., 2004. The scheduling problem of PCBs for multiple non-identical parallel machines. European Journal of Operational Research, vol.158, n° 3, p. 577–594.
Van Mieghem, J.A., 2003. Commissioned paper: Capacity management, investment, and hedging: Review and recent developments. Manufacturing & Service Operations Management, vol.5, n° 4, p. 269–302.
Venkateswaran, J., Son, Y.-J., 2004. Distributed and hybrid simulations for manufacturing systems and integrated enterprise, in: IIE Annual Conference. Proceedings. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 1.
Vera-Munoz, S.C., 1998. The effects of accounting knowledge and context on the omission of opportunity costs in resource allocation decisions. Accounting Review, vol.73, n° 1, p. 47–72.
Verdaasdonk, P., Wouters, M., 2001. A generic accounting model to support operations management decisions. Production Planning & Control, vol.12, n° 6, p. 605–620.
Verdaasdonk, P., Wouters, M., 1999. Defining an information structure to analyse resource spending changes of operations management decisions. Production Planning & Control, vol.10, n° 2, p.162–174.
von Massow, M., Canbolat, M., 2014. A strategic decision framework for a value added supply chain. International Journal of Production Research, vol.52, n° 7, p. 1940–1955.
Vosooghidizaji, M., Taghipour, A., Canel-Depitre, B., 2020. Supply chain coordination under information asymmetry: a review. International Journal of Production Research, vol.58, n° 6, p. 1805–1834.
Wang, E.-J., Su, T.-S., Tsai, D.-M., Lin, C.-Y., 2013. Fuzzy multiple-goal programming for analysing outsourcing cost-effectiveness in hi-tech manufacturing. International Journal of Production Research, vol.51, n° 13, p. 3920–3944.

Wang, H.-F., Huang, Y.-S., 2013. A two-stage robust programming approach to demand-driven disassembly planning for a closed-loop supply chain system. International Journal of Production Research, vol.51, n° 8, p. 2414–2432.
Wang, K., Ma, W.Q., Luo, H., Qin, H., 2016. Coordinated scheduling of production and transportation in a two-stage assembly flowshop. International Journal of Production Research, vol. 54, n° 22, p. 6891–6911.
Wang, S.-Y., Sheen, G.-J., Yeh, Y., 2015. Pricing and shelf space decisions with non-symmetric market demand. International Journal of Production Economics, vol.169, p. 233–239.
Weintraub, A., Davis, L., 1996. Hierarchical planning in forest resource management: defining the dimensions of the subject area, in: Proceedings of a Workshop on Hierarchical Approaches to Forest Management in Public and Private Organizations. Petwawa National Forestry Institute. Information Report PI-X-124. p. 2–14.
Weng, M.X., Lu, J., Ren, H., 2001. Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. International journal of production economics, vol.70, n° 3, p. 215–226.
White, S.W., 2013. An experimentally confirmed resource planning model of services under production function uncertainties. International Journal of Production Economics, vol.141, n° 2, p. 478–484.
Wierman, M.J., 2010. An introduction to the mathematics of uncertainty. (PhD thesis) Creighton University, p. 149–150.
Wong, C., Skipworth, H., Godsell, J., Achimugu, N., 2012. Towards a theory of supply chain alignment enablers: a systematic literature review. Supply Chain Management: An International Journal, vol.17, n° 4, p. 419–437.
Wouters, M.J., 1991. Economic evaluation of leadtime reduction. International Journal of Production Economics, vol. 22, n° 2, p. 111–120.
Wu, B., Sarker, B.R., 2013a. Optimal manufacturing and delivery schedules in a supply chain system of deteriorating items. International Journal of Production Research 51, 798–812.
Wu, C.-W., Liao, M.-Y., Yang, T.-T., 2013. Efficient methods for comparing two process yields–strategies on supplier selection. International Journal of Production Research, vol.51, n° 3, p. 1587–1602.
Xi, Y., Jang, J., 2012. Scheduling jobs on identical parallel machines with unequal future ready time and sequence dependent setup: An experimental study. International Journal of Production Economics, vol.137, n° 1, p. 1–10.
Xia, Y., 2016. Responding to supplier temporary price discounts in a supply chain through ordering and pricing decisions. International Journal of Production Research 54, 1938–1950.
Xiao, N., Ni, C.D., Guo, S.J., 2017. Modelling and simulation for production logistics system in industrial enterprises based on hybrid network. International Journal of Simulation Modelling 16, 157–166.
Xie, Z., Park, C.S., Zheng, L., 2013. Procurement models under purchase price uncertainty for Chinese oil refineries. International Journal of Production Research, vol.51, n° 10, p. 2952–2968.
Xu, X., Meng, Z., 2014. Coordination between a supplier and a retailer in terms of profit concession for a two-stage supply chain. International Journal of Production Research, vol.52, n°7, p. 2122–2133.
Yan, C., Liao, Y., Banerjee, A., 2013. Multi-product lot scheduling with backordering and shelf-life constraints. Omega, vol.41, n° 3, p. 510–516.

Yoo, J., Lee, I.S., 2016. Parallel machine scheduling with maintenance activities. Computers & Industrial Engineering, vol.101, p. 361–371.

Yuan, K.F., Ma, S.H., He, B., Gao, Y., 2015. Inventory decision-making models for a closed-loop supply chain system with different decision-making structures. International Journal of Production Research, vol.53, n° 1, p. 183–219.

Zanoni, S., Mazzoldi, L., Jaber, M.Y., 2014. Vendor-managed inventory with consignment stock agreement for single vendor–single buyer under the emission-trading scheme. International Journal of Production Research, vol.52, n° 1, p. 20–31.

Zeidi, J.R., MohammadHosseini, S., 2015. Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol.81, n° 9-12, p. 1487–1496.

Zhang, D.Z., 2013. An integrated production and inventory model for a whole manufacturing supply chain involving reverse logistics with finite horizon period. Omega, vol.41, n° 3, p. 598–620.

Zhang, H.-C., Mallur, S., 1994. An integrated model of process planning and production scheduling. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol.7, n° 6, p. 356–364.

Zhang, J., Liu, G., Zhang, Q., Bai, Z., 2015. Coordinating a supply chain for deteriorating items with a revenue sharing and cooperative investment contract. Omega, vol.56, p. 37–49.

Zhang, Juzhi, Gou, Q., Zhang, Juan, Liang, L., 2014. Supply chain pricing decisions with price reduction during the selling season. International Journal of Production Research, vol.52, n° 1, p. 165–187.

Zhao, C., Ji, M., Tang, H., 2011. Parallel-machine scheduling with an availability constraint. Computers & Industrial Engineering, vol.61, n° 3, p. 778–781.

Zhou, Y., Xie, J., 2014. Potentially self-defeating: Group buying in a two-tier supply chain. Omega, vol.49, p. 42–52.

Zhou, Y., Xiong, Y., Li, G., Xiong, Z., Beck, M., 2013. The bright side of manufacturing–remanufacturing conflict in a decentralised closed-loop supply chain. International Journal of Production Research, vol.51, n° 9, p. 2639–2651.

Zhu, S.X., 2013. Dynamic replenishment, production, and pricing decisions, in the face of supply disruption and random price-sensitive demand. International Journal of Production Economics, vol.146, n° 2, p. 612–619.

Zhu, Z., Heady, R.B., 2000. Minimizing the sum of earliness/tardiness in multi-machine scheduling: a mixed integer programming approach. Computers & Industrial Engineering, vol.38, n° 2, p. 297–305.