

Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Application à un constructeur automobile

Médéric Suon

▶ **To cite this version:**

Médéric Suon. Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Application à un constructeur automobile. Gestion et management. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2011. Français. NNT : 2011CLF22107 . tel-00787341

HAL Id: tel-00787341

https://theses.hal.science/tel-00787341

Submitted on 12 Feb 2013

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.

N° d'Ordre : 2107
EDSPIC : 514

UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT-FERRAND II

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

THESE

présenté par

Médéric SUON

Ingénieur INSA Lyon - Génie Industriel
Diplômé du Master de Recherche Lyon 1 - Informatique / Aide à la Décision

pour obtenir le grade de

Docteur d'université

Spécialité : INFORMATIQUE

Optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique

Application à un constructeur automobile

Soutenue publiquement le 10 février 2011 devant le jury :

Madame	Valérie BOTTA	Président
Monsieur	Samir LAMOURI	Rapporteur et examinateur
Monsieur	Aziz MOUKRIM	Rapporteur et examinateur
Monsieur	Olivier GOURGUECHON	Examinateur
Madame	Nathalie GRANGEON	Co-Directeur de thèse
Madame	Sylvie NORRE	Directeur de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Sylvie Norre qui a dirigé cette thèse et a su mêler la rigueur scientifique au pragmatisme industriel. Je tiens aussi à remercier Nathalie Grangeon qui a co-dirigé cette thèse et apporté son expertise informatique ainsi que sa bonne humeur.

Je remercie les rapporteurs de cette thèse, Samir Lamouri et Aziz Moukrim, pour l'examen détaillé de mon manuscrit et pour l'intérêt porté à mon travail. Merci également aux autres membres du jury qui ont acceptés de juger ce travail : Valérie Botta, dont l'expertise de la gestion de la chaîne logistique et des systèmes d'information a eu un rôle majeur dans ma décision de réaliser une thèse et Olivier Gourguechon, qui a su mettre en perspective l'activité industrielle et représenter l'entreprise PSA Peugeot Citroën sur la majeure partie de ce travail.

Mes plus vifs remerciements vont aussi aux collègues de l'équipe APST avec qui j'ai partagé un vent d'innovation dans l'atmosphère industrielle de PSA et aux autres collègues de PSA avec qui j'ai découvert quelques-unes des nombreuses facettes de l'industrie automobile.

J'exprime aussi ma gratitude auprès des collègues du LIMOS avec qui j'ai beaucoup appris et échangé lors de mes brèves périodes de travail au laboratoire. Cette ambiance inimitable est une chose qui a tendance à devenir rare.

Je remercie les chercheurs et industriels avec qui j'ai pu échanger (parfois passionnément) sur le sujet.

Je souhaite saluer mes amis lyonnais, parisiens, belfortains... qui ont suivi de près ou de loin ce travail de plus de trois ans.

Enfin, je remercie mes parents de m'avoir soutenu toute ma scolarité ainsi que ma soeur qui, malgré la distance, m'apporte toujours autant de sérénité.

Table des matières

Introduction **3**

1 L'optimisation de la logistique internationale **7**
1.1 Introduction . . . 7
1.2 La planification de la chaîne logistique . . . 8
1.2.1 De la logistique à la gestion de chaîne logistique globale . . . 8
1.2.2 La planification de la chaîne logistique . . . 12
1.2.3 La conception d'un réseau logistique . . . 15
1.3 La chaîne logistique PSA . . . 18
1.3.1 Présentation générale de l'entreprise et de son système industriel . . . 18
1.3.2 La gestion des commandes . . . 19
1.3.3 La production . . . 21
1.3.4 L'approvisionnement . . . 22
1.3.5 La distribution . . . 26
1.3.6 Le processus PSA de planification hiérarchique . . . 27
1.4 Les différents problèmes de planification stratégique de PSA . . . 30
1.4.1 Décomposition du problème de planification stratégique . . . 31
1.4.2 Les hypothèses de la modélisation à horizon stratégique . . . 32
1.5 Conclusion . . . 33

2 La répartition stratégique **35**
2.1 Introduction . . . 35
2.2 Modèle de connaissance . . . 36
2.2.1 Sous-système physique . . . 36
2.2.2 Sous-système logique . . . 37
2.2.3 Sous système décisionnel . . . 40
2.3 Répartition stratégique sans contraintes de sourcing . . . 47
2.3.1 Formalisation mathématique du modèle de production-distribution . . . 48
2.3.2 Etude de la convexité de la fonction objectif . . . 50
2.3.3 Etat de l'art sur les modèles de production-distribution . . . 51
2.3.4 Borne inférieure . . . 55
2.3.5 Méthodes d'optimisation . . . 57
2.3.6 Expérimentation . . . 64
2.4 Répartition stratégique avec contrainte de sourcing . . . 76
2.4.1 Formalisation mathématique . . . 76
2.4.2 Etude de la convexité de la fonction objectif . . . 78
2.4.3 Etat de l'art du problème avec contraintes de sourcing . . . 79
2.4.4 Borne inférieure . . . 82
2.4.5 Méthodes d'optimisation . . . 84
2.4.6 Expérimentation . . . 87
2.5 Conclusion . . . 98

3 La planification stratégique **101**
3.1 Introduction . . . 101
3.2 Modèle de connaissance . . . 102
3.2.1 Généralités . . . 102
3.2.2 Sous-système physique . . . 102
3.2.3 Sous-système logique . . . 103
3.2.4 Sous système décisionnel . . . 106
3.3 Etat de l'art . . . 116
3.3.1 La planification stratégique du réseau logistique . . . 116
3.3.2 Analyse de la littérature . . . 119
3.3.3 Méthodes d'optimisation . . . 124
3.3.4 Offre logicielle . . . 126
3.4 Formalisation mathématique . . . 131
3.4.1 Ensembles . . . 132
3.4.2 Paramètres . . . 132
3.4.3 Variables . . . 134
3.4.4 Fonction objectif . . . 134
3.4.5 Contraintes . . . 134
3.4.6 Modélisation des investissements . . . 136
3.5 Méthodes de résolution . . . 136
3.5.1 Heuristique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers successive . 136
3.5.2 Métaheuristique . . . 138
3.6 Conclusion . . . 140

Conclusion **141**

Introduction

Au début du XXIème siècle, l'industrie est en forte mutation. La mondialisation, à la fois des marchés et des productions, a démultiplié les relations commerciales internationales. Ainsi, les échanges commerciaux n'ont cessé de se développer notamment au travers d'unions commerciales, d'alliances d'entreprises, de transferts de technologies... La facilité des échanges a entraîné une mise en concurrence à échelle mondiale des capacités de production. La logistique est passée d'une fonction support à une fonction stratégique.

En prenant l'exemple de l'industrie automobile, la mutation est forte à la fois au niveau de la demande et de l'offre : la demande se divise entre les marchés occidentaux et les pays émergents. Les marchés occidentaux sont matures et la structure de la demande change en se décomposant en deux types de véhicules très distincts : les véhicules low-costs pour une clientèle uniquement attirée par l'aspect fonctionnel d'un véhicule (transport de biens et de personnes entre un point A et un point B) et les véhicules de prestige, toujours plus confortables et sécurisants dont les clients sont prêts à payer l'image et l'innovation technique ; par ailleurs, les marchés des pays émergents sont en augmentation rapide, uniquement freinés par les aléas de leur croissance économique. La demande de ces pays est difficile à prévoir car les premiers acheteurs sont les 'nouveaux riches' qui cherchent, en premier lieu, des véhicules statutaires à caractère occidental. Mais, ensuite, la majorité de la demande est formée d'une nouvelle classe moyenne qui est intéressée par échanger son vélo ou son scooter avec une voiture économiquement abordable par soucis de praticité et de sécurité. Dans tous les cas, les clients des marchés émergents sont à la recherche de produits adaptés à leurs différentes cultures.

L'offre de production automobile est, quant à elle, composée des usines d'assemblage automobile ainsi que du tissu fournisseur les approvisionnant. Ces sites industriels sont historiquement présents dans les pays occidentaux où le développement technique a eu lieu. Mais les capacités de production deviennent surdimensionnées face à la maturité de la demande occidentale et la concurrence devient alors de plus en plus rude. Un moyen de rester compétitif a alors été la délocalisation dans des pays proches à bas coûts (Europe de l'Est pour l'Europe, Mexique pour les Etats-Unis, Chine pour le Japon...). Ainsi, certains fournisseurs sont partis dans les pays à bas coûts pour profiter d'une main d'œuvre peu chère. Des usines d'assemblage automobile ont aussi été installées dans ces pays pour réduire les coûts de production mais aussi pour se rapprocher de la demande qui se créait dans ces pays. De plus, de nouvelles structures industrielles ont été créées dans les pays dits BRIC (Brésil, Russie, Inde, Chine) pour profiter de leur croissance rapide. Une implantation locale des capacités de production est souvent imposée politiquement (et par des taux de douane prohibitifs) ainsi qu'un développement d'un tissu fournisseur local. En fonction des contraintes et des coûts logistiques, ces nouvelles capacités de production (à la fois, chez les fournisseurs et chez les constructeurs automobiles) peuvent parfois entrer en concurrence avec les capacités de production occidentales et demander de passer d'un paradigme 'une usine d'assemblage avec un tissu fournisseur local produisant pour un marché local' à 'des usines d'assemblage avec un tissu fournisseur global produisant pour un marché global'.

Face à cette mutation industrielle, l'optimisation globale (au sens littéral - c'est-à-dire mondiale) du réseau logistique devient un impératif de tout constructeur automobile. Il doit être capable de se

projeter dans l'avenir et de questionner la pertinence de la localisation à la fois de ses usines d'assemblage mais aussi de ses fournisseurs. Ce questionnement économique et financier se pose notamment en termes de rentabilité de la somme 'investissement en capacité de production' plus 'coût des approvisionnements des composants et de la distribution des véhicules'. La performance logistique est alors fondamentale dans la compétitivité industrielle et le concept de 'chaîne logistique' bouleverse les organisations et demande d'être capable de coordonner des réseaux d'usines et de fournisseurs situés dans le monde entier et pouvant travailler aussi pour la concurrence. La complexité d'organisation découlant de ce nouvel enjeu est naturellement difficile à gérer mais peut devenir un avantage compétitif. La réflexion sur la conception du réseau logistique mondial peut être avantageusement outillée par des applications d'aide à la décision où la Recherche Opérationnelle et l'Informatique ont un apport majeur : les décideurs, au lieu de passer du temps à rechercher des données et des solutions respectant un grand nombre de contraintes industrielle, peuvent s'appuyer sur des modèles économiques et industriels implémentés dans un logiciel où ils pourront mener leurs analyses de manière plus rapide et, souvent, plus fine pour, in fine, prendre une décision plus juste.

Au travers de la problématique de l'optimisation de la logistique internationale et à l'aide du cas d'étude industriel du constructeur automobile PSA Peugeot Citroën, nous allons formaliser les problèmes de décision rencontrés par l'entreprise et proposer un outil d'aide à la décision. Ce travail, réalisé au travers d'une thèse CIFRE, sera appliqué à la planification stratégique de la chaîne logistique, spécifiquement, dans la structuration de son réseau logistique avec la définition des capacités ('où installer les capacités de production et d'approvisionnement ?') et la planification de la charge sur les capacités installées ('combien de véhicules affecter à une usine ?' et 'combien de composants s'approvisionner auprès d'un fournisseur' ?).

Ce travail offre donc deux objectifs distincts :
- Industriellement, l'objectif est de proposer un outil informatique pour la planification de la chaîne logistique de PSA.
- Scientifiquement, nous montrerons que cette problématique très étudiée offre encore des pistes de recherche et nous apporterons des innovations à la fois dans la modélisation du système industriel et dans la résolution des problèmes d'optimisation liés aux prises de décision.

Nous nous trouvons face à une double complexité :
- une complexité organisationnelle où il faut modéliser de manière pertinente une structure industrielle et organisationelle complexe pour simuler au mieux la réalité,
- une complexité combinatoire où, dans l'ensemble des possibilités de décisions industrielles correspondant au modèle choisi, nous recherchons une solution 'optimisée' (pour ne pas dire 'optimale').

Tout au long de ce mémoire, un compromis entre l'innovation scientifique et le pragmatisme industriel a été recherché :
- une démarche a été initiée par un besoin industriel,
- la problématique industrielle a été modélisée,
- une approche de résolution a été proposée,
- au final, cette démarche a été appliquée à un cas industriel.

Suivant cette démarche, le plan proposé est le suivant :

Chapitre 1 La problématique de l'optimisation de la logistique internationale est détaillée : des définitions au niveau de la sémantique de la logistique, de la chaîne logistique et du Supply chain Management sont d'abord données pour faciliter la compréhension du système industriel et de ses problématiques. Puis, au travers d'une description de l'organisation industrielle de PSA, nous montrerons les spécificités du système industriel étudié notamment pour mieux comprendre les hypothèses de modélisation retenues. Enfin, nous décrirons les problèmes posés de répartition stratégique de la production (qui répond à la question « où et combien produire et acheter pour

répondre à la demande ») ainsi que de planification stratégique du réseau logistique (qui répond à la question « où et quand investir de la capacité de production et affecter les productions »).

Chapitre 2 Le problème de la répartition stratégique est abordé avec une approche innovante sur la prise en compte des décisions d'approvisionnement dans le calcul des prix de cession. Une distinction est réalisée entre un modèle sans contrainte de sourcing et un modèle avec contraintes de sourcing. En effet, l'inclusion des limitations au niveau des fournisseurs augmente la difficulté de résolution du problème de répartition. Ces approches sont, dans les deux cas, positionnées par rapport à la littérature. Enfin, des méthodes de résolution à la fois heuristiques et métaheuristiques sont proposées.

Chapitre 3 Le problème de la planification stratégique est défini en reprenant les éléments étudiés dans le problème de répartition stratégique et en ajoutant les éléments temporels et les décisions d'investissement. Ce problème est alors positionné par rapport à la littérature. Des solutions logicielles de planification stratégique de chaîne logistiques sont aussi étudiées. Après avoir défini la différence de la modélisation proposée par rapport aux solutions commerciales, des méthodes de résolution heuristiques et métaheuristiques sont proposées.

Chapitre 4 L'outil d'aide à la décision prototypé au cours du travail est présenté à la fois dans ses fonctionalités et dans son architecture générale. Puis, le cas d'application industriel est détaillé et résolu grâce aux algorithmes proposés dans les chapitres 2 et 3. Les résultats obtenus sont analysés et les apports de la démarche proposée sont explicités.

Chapitre 1

L'optimisation de la logistique internationale

Au fur et à mesure que l'économie change et que la compétition devient de plus en plus globale, ce n'est plus Entreprise VS Entreprise mais Supply Chain VS Supply Chain. *Harold Sirkin, Boston Consulting Group*

Sommaire

1.1 Introduction 7
1.2 La planification de la chaîne logistique 8
1.2.1 De la logistique à la gestion de chaîne logistique globale 8
1.2.2 La planification de la chaîne logistique 12
1.2.3 La conception d'un réseau logistique 15
1.3 La chaîne logistique PSA 18
1.3.1 Présentation générale de l'entreprise et de son système industriel 18
1.3.2 La gestion des commandes 19
1.3.3 La production 21
1.3.4 L'approvisionnement 22
1.3.5 La distribution 26
1.3.6 Le processus PSA de planification hiérarchique 27
1.4 Les différents problèmes de planification stratégique de PSA 30
1.4.1 Décomposition du problème de planification stratégique 31
1.4.2 Les hypothèses de la modélisation à horizon stratégique 32
1.5 Conclusion 33

1.1 Introduction

L'optimisation de la logistique internationale est un sujet vaste et qui a évolué en même temps que le monde industriel. Nous proposons, dans ce chapitre, d'expliciter les éléments sémantiques de notre problématique ainsi que les spécificités liées au cas industriel. Ainsi, nous définissons d'abord les concepts majeurs de la logistique et de ses extensions (chaîne logistique, gestion de la chaîne logistique...). Ces nombreux concepts seront exposés de manière à donner une vision large des décisions prises au sein de la chaîne logistique notamment pour entrevoir les relations entre les décisions prises tout au long de l'horizon de planification. Ces éléments sont nécessaires pour appréhender le système industriel et logistique de PSA. Ce système industriel, alors présenté, fait sortir les concepts spécifiques au secteur automobile. Ce secteur est en effet précurseur depuis longtemps au niveau de la production (Taylorisme, Fordisme...) mais a apporté aussi beaucoup d'innovations au niveau de la logistique depuis l'avènement du Toyotisme. Dans cette seconde partie, nous décrivons le fonctionnement de la logistique du constructeur automobile PSA Peugeot Citroën. Ces observations au sein de l'entreprise

mettent en exergue les spécificités opérationnelles qui sont à prendre en compte au niveau de l'optimisation stratégique. Dans une troisième partie, la déclinaison au sein de PSA de la problématique de l'optimisation stratégique de la logistique est alors définie. Les problèmes de répartition stratégique de la production et de la planification stratégique du réseau logistique sont exposés. Les hypothèses prises en compte lors de ces prises de décison sont explicitées

Par la suite, nous commençons par décrire les concepts de la planification de la chaîne logistique.

1.2 La planification de la chaîne logistique

Au coeur de la compétitivité de l'entreprise se trouve sa capacité à mettre à disposition du client le bon produit, au bon endroit et au bon moment. C'est une définition classique de la « logistique ». En ajoutant les aspects de prix et de qualité, on imagine aisément la coordination nécessaire aux différents métiers (approvisionnement, production, transport...) et aux différents acteurs (filiales, sous-traitants, transporteurs...) pour qu'un tel produit soit vendu ; et non pas celui d'un concurrent.

1.2.1 De la logistique à la gestion de chaîne logistique globale

Les activités de la logistique ont beaucoup évolué depuis l'invention du commerce et le début des échanges internationaux. Ainsi les moyens de transport se sont développés, les échanges commerciaux ont été facilités et le monde s'est globalisé. Maintenant, ce ne sont plus des artisans locaux qui sont en concurrence avec d'autres artisans mais des filières d'approvisionnement internationales.

Par la suite, nous donnons les définitions des concepts de 'logistique', de 'chaîne logistique', de 'gestion de la chaîne logistique' et de 'gestion de chaînes logistiques globales'.

1.2.1.1 La logistique

Le mot logistique vient du grec antique « logisteuo » qui signifie « administrer » [DF07]. Ce terme a été repris par les Romains sous le terme « logistica ». Dans l'antiquité, ces termes font partie du vocabulaire militaire correspondant aux fonctions d'organisation des campements et d'approvisionnement en vivres des troupes. En français, on voit apparaître le terme au XVIII^{ème} siècle où il désigne la science du raisonnement et du calcul en général. Actuellement, le terme courant est défini comme l' « ensemble de méthodes et de moyens relatifs à l'organisation d'un service, d'une entreprise, etc., et comprenant les manutentions, les transports, les conditionnements et parfois les approvisionnements » [Lar10]. Une définition plus spécialisée de [Chr05] définit la logistique comme « le processus permettant de gérer stratégiquement l'approvisionnement, le transport et le stockage des matières premières, composants et produits finis (en lien avec les flux d'informations) au travers de l'organisation et de ses canaux marketing de manière à ce que la rentabilité actuelle et future soit maximisée via la satisfaction des commandes au moindre coût ». Cette définition a l'intérêt de pointer les éléments suivants :

- il s'agit d'un processus qui coordonne différents métiers ;
- nous observons le lien entre la satisfaction des commandes et le coût logistique ;
- nous avons différents types de flux (flux de matière, flux d'informations et flux financiers) ;
- la logistique est un levier direct sur les coûts et donc sur la rentabilité de l'entreprise.

Nous considérons un réseau logistique comme un réseau constitué de fournisseurs, d'usines, de centres de distribution et de magasins ; ces différents sites pouvant être reliés entre eux par des liaisons de transport (fig. 1.1). Ainsi, les fournisseurs sont les vendeurs de matières premières et de composants qui seront transformés et/ou assemblés dans les usines. Les centres de distribution sont des lieux de stockage des produits finis attendant leur acheminement vers les magasins pour une mise en rayons et la vente. On peut déjà définir la chaîne d'approvisionnement qui rassemble l'ensemble des fournisseurs d'une usine et la chaîne de distribution partant d'une usine et arrivant aux magasins de vente. Le flux de matières (composants, produits finis...) traversent le réseau dans le sens opposé aux flux d'informations (prévision de ventes, commandes...) [DF07].

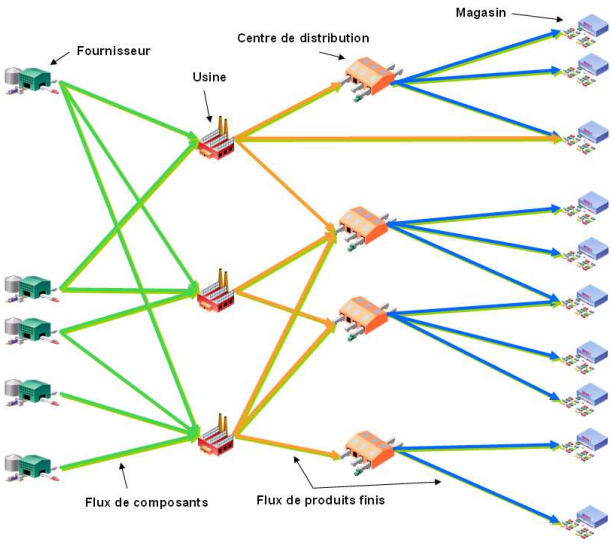


Figure 1.1 – Schéma d'un réseau logistique

Notons aussi l'existence de flux financiers qui vont aller des clients aux fournisseurs. Ces flux ont un impact direct sur le niveau de trésorerie de l'entreprise notamment par les délais de paiement. De plus, dans le cas d'un groupe filialisé, les prix de cession (ou prix de transfert d'un produit entre deux filiales) vont aussi avoir un impact majeur sur la distibution de la valeur dans la chaîne logistique [GVD02].

1.2.1.2 La chaîne logistique

Dans l'économie moderne, la compétition n'est plus entre des entreprises, les unes contre les autres, mais entre des réseaux d'entreprises, les uns contre les autres. C'est le concept de « chaîne logistique ». La figure 1.2 séparent les différents acteurs de la chaîne logistique liée au réseau logistique précédement présenté.

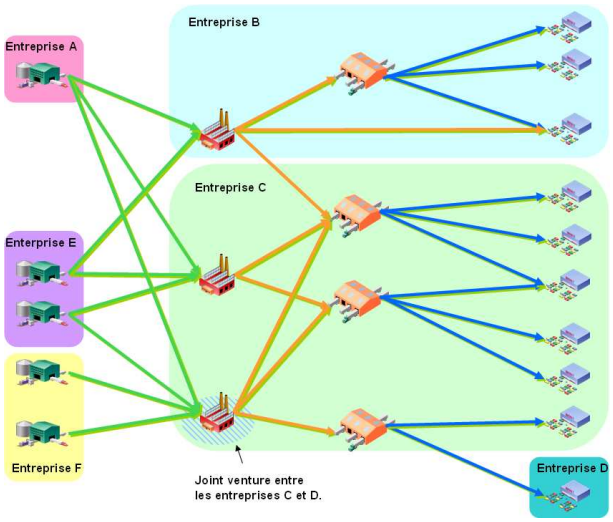


Figure 1.2 – Schéma d'une chaîne logistique

Ainsi, on peut considérer le flux d'un produit comme une séquence temporelle de différentes activités où le produit va voir sa valeur augmenter au fur et à mesure des opérations de transformation et d'assemblage [Mar05].

Cette chaîne de valeur va donc définir un coût rendu au client et son attractivité vis à vis du client (en considérant que le prix est toujours un des critères d'achat). Il en va de même du niveau de service au client. Celui-ci est dépendant de l'ensemble de la chaîne et notamment du maillon le plus faible [Gol97].

1.2.1.2.1 Le partage de l'information Un premier enjeu majeur des chaînes logistiques est donc le partage d'informations notamment en termes de prévision de la demande. Un phénomène classique et désastreux est l'« effet coup de fouet »[For61]. Cet effet dynamique lié à une vision myope des différents acteurs d'une chaîne logistique va entraîner l'amplification des variations de la demande au fur et à mesure de la remontée d'informations le long de la chaîne. Un moyen classique de réduire cet effet est de mettre l'information de la demande du client final à disposition des différents acteurs de la chaîne comme pour les VMI (Vendor Management Inventory - gestion partagée des approvisionnements, GPA en français) ou le CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment - Planification, Prévision et Approvisionnement collaboratif en français).

1.2.1.2.2 Le partage de la valeur Un second enjeu est celui du partage de la valeur entre les différents acteurs d'une même chaîne logistique car les acteurs étant différenciés, la survie de chacun est liée à sa performance économique propre mais aussi liée à la performance de la chaîne complète. La mise en place de partenariats durables est donc un moyen de répondre à la pression économique sur l'ensemble de la chaîne. Ainsi, on peut noter l'organisation japonaise en « Keiretsu » avec la formation de conglomérats pouvant intégrer une grande partie d'une filière d'approvisionnement. Par ailleurs, l'interdépendance des entreprises est de plus en plus grande avec le co-développement de produit, l'externalisation de parties du processus productif ou logistique, les alliances stratégiques en recherche et développement... Au final, le pouvoir étant inégalement réparti au sein de la chaîne logistique, les contrats commerciaux sont la concrétisation des liens entre les différents acteurs et donc du partage de la valeur.

1.2.1.2.3 Les leviers de la performance de la chaîne logistique [CM01] définit les 6 leviers de la performance de la chaîne logistique comme :

- la localisation des sites ;
- le stockage ;
- le transport ;
- le sourcing (le choix des partenaires d'approvisionnement) ;
- le pricing (la politique et la gestion des prix et des promotions) ;
- l'information (la gestion et le partage de l'information).

Ces leviers seront utilisés dans la gestion des chaînes logistiques.

1.2.1.3 La gestion de la chaîne logistique

A partir de la définition précédente du concept de « chaîne logistique », le concept de « gestion de la chaîne logistique »(« Supply Chain Management »- SCM en anglais) a été défini par [Chr05] comme :

« la gestion des relations en amont et en aval [de la chaîne logistique] avec fournisseurs et clients pour livrer au client une valeur supérieure obtenue à un coût minimum pour l'ensemble de la chaîne logistique ».

L'aspect de la collaboration et des dépendances dans une chaîne logistique est précisé par [BCC02]. La recherche du coût total (gestion intégrée) ainsi que l'importance du système d'évaluation des coûts sont pointées par [BCC02]. D'après [DF07], le SCM est le périmètre organisationnel de la logistique (prise en compte des fournisseurs et des clients) et ajoute les fonctions de conception et de pilotage à la simple exécution des opérations logistiques. A noter qu'une même entreprise peut avoir un rôle dans différentes chaînes logistiques.

1.2.1.3.1 Importance du SCM et de sa maîtrise d'ouvrage La gestion de la chaîne logistique est donc l'activité de pilotage qui découle de la structuration de l'industrie en chaînes logistiques. Cette activité va donc chercher à concevoir, planifier et piloter les opérations de sa ou ses chaînes logistiques au mieux. En effet, cette capacité est déterminante dans la réussite ou la banqueroute d'une entreprise [CM01]. En général, pour une chaîne logistique donnée, une entreprise a le rôle de maître d'ouvrage. C'est, généralement celui qui conçoit le produit et/ou qui a la responsabilité de la vente au client final (par exemple, les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique). Cependant, selon la répartition du pouvoir et les interdépendances entre les acteurs, d'autres configurations sont possibles (par exemple, dans la grande distribution). Ce maître d'ouvrage logistique a notamment la responsabilité du positionnement du point de découplage.

1.2.1.3.2 Positionnement du point de découplage Le positionnement du point de découplage va déterminer jusqu'à quel maillon de la chaîne logistique la demande est remontée [BC05]. Cela définit la partie de la chaîne logistique qui va fonctionner en flux tirés (mode « pull » en anglais) et la partie qui va fonctionner en flux poussés (mode « push » en anglais). La partie en aval du point de découplage sera gérée de manière « Lean »avec des stocks réduits au minimum et en accélérant au maximum les flux. La partie en amont sera planifiée à partir de prévisions. Mais, du fait de l'erreur de prévision, la question du positionnement et du dimensionnement (selon le temps de réponse et le risque de rupture) de stocks de sécurité va être posée [GW00].

Ainsi le choix de la stratégie logistique et du positionnement du point de découplage va contribuer à l'obtention d'un avantage compétitif grâce à la gestion de la chaîne logistique.

1.2.1.3.3 Obtention d'un avantage compétitif via le SCM Le maître d'ouvrage logistique va ainsi chercher à obtenir un avantage compétitif grâce à une bonne gestion de sa chaîne logistique. Ainsi, classiquement, [Por98] distingue la différenciation par le prix ou par la valeur. [Chr05] décrit les leviers pour atteindre ces deux avantages dans la chaîne logistique :

- Un avantage sur les coûts : dans une confrontation sur les prix, la chaîne logistique va être un levier majeur pour faire baisser les coûts. Dans une telle stratégie, on va chercher à réaliser du volume pour faire fonctionner au maximum les économies d'échelles (plus on vend un produit, plus son coût marginal d'approvisionnement décroît grâce à l'amortissement de coûts fixes, par exemple) ou les économies d'envergure (chaque nouveau produit lancé est moins cher que le produit précédent grâce à la réutilisation de composants, de compétences... acquises sur un produit existant).
- Un avantage sur la valeur : cette idée transcende le concept de produit en déterminant les avantages apportés par un produit à son acheteur. Ces avantages sont généralement apportés par de la différenciation par rapport à des produits concurents en termes d'image, de prestation, de qualité, de services annexes... Classiquement un levier de la logistique, en dehors du coût discuté précédement, est la possibilité de répondre dans les délais les plus courts à des demandes clients toujours plus complexes (notamment dans le cas d'une forte personnalisation des produits).

En conclusion, le Supply Chain Management va chercher à maximiser la valeur apportée au client et donc les profits de la chaîne logistique au travers de l'intégration et la coordination des divers acteurs. Cela nécessite en général la définition d'un maître d'ouvrage logistique qui va structurer la chaîne logistique de manière à obtenir in fine un avantage compétitif.

1.2.1.4 La gestion de chaînes logistiques internationales

La globalisation et l'explosion des échanges commerciaux internationaux ont donné la possibilité de sourcer ou de produire des biens dans le monde entier. Ces nouvelles possibilités de vente, de sourcing et d'implantation ont donc fait émerger des chaîne logistiques globales (au sens de « mondial »). La figure 1.3 représente cette répartition géographique des différents sites de la chaîne logistique.

Ainsi, les réseaux logistiques globaux sont différenciés par les éléments suivants [Mar] :

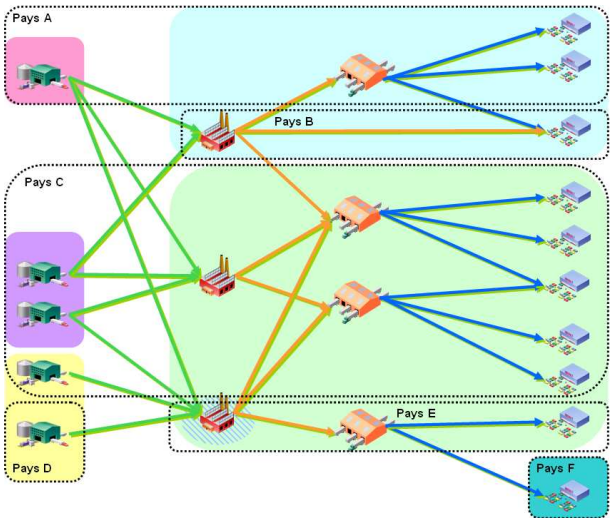


Figure 1.3 – Schéma d'une chaîne logistique internationale

- l'accès à des facteurs avantageux (par exemple, un faible coût de la main d'oeuvre, des ressources rares...) ;
- le rôle des gouvernements notamment dans les barrières douanières ou les avantages à l'implantation ;
- les avantages techniques et financiers, par exemple, dans des transferts de technologies entre différentes régions du monde ou encore l'accès aux meilleurs taux d'emprunt de capitaux ;
- la complexité accrue notamment dans le transport (cf 1.3.4.4) ;
- les frais de douanes et les zones franches qui ne sont pas pris en compte en environnement domestique ;

Par exemple pour l'industrie forestière [MMBDA06], l'influence des prix de transfert, des taux de change, de la flexibilité opérationnelle (capacité à réorganiser les opérations) et de la planification financière (en termes d'accès au capital) est primordiale.

Dans la gestion de chaînes logistiques globales, on peut tirer trois tendances [Chr05] :

- Des usines plus spécialisées qui vont dégager des économies d'échelle en produisant la totalité de la demande mondiale. Cependant la répartition des produits sur ces usines peut évoluer en fonction de l'environnement, toujours en cherchant à maximiser les économies d'échelle.
- Une centralisation des stocks, qui passent d'une dimension nationale à une dimension internationale, permet de réduire leur taille sans modifier le taux de service [Pim01].
- La différentiation retardée et l'adaptation locale (ou localisation) permet de garder l'idée d'un produit global (fabriqué dans une seule usine) qui sera adapté, au plus tard, à chaque marché. Ainsi la différentiation retardée permet de réaliser à proximité du marché local les opérations d'adapation (par exemple, la langue du packaging, certains goûts...) de manière à limiter le stock de produits finis différenciés et à faciliter les prévisions ; ces dernières étant réalisées sur un nombre réduit de produits génériques. La capacité à vendre des produits avec une grande variété à un coût global faible est le principe de « mass customization » (« personnalisation de masse » en francais) qui est un principe majeur dans l'industrie automobile européenne.

1.2.2 La planification de la chaîne logistique

Dans la section précédente, nous avons défini les concepts liés à la chaîne logistique. Pour le gestionnaire, l'enjeu est de concevoir et de piloter cette chaîne logistique pour servir la stratégie de l'entreprise. Ainsi, il va être nécessaire d'organiser de manière anticipée, c'est-à-dire de « planifier », cette chaîne logistique pour être opérationnellement performant.

Par la suite, nous présentons les différents horizons classiquement utilisés. Puis, nous décrivons la planification hiérarchisée qui va s'établir sur ces horizons. Enfin, nous examinons les systèmes de

planification avancée qui vont être des outils déterminants pour la performance de la chaîne logistique.

1.2.2.1 La décomposition en horizons

Classiquement, les décisions sont regroupées en différents horizons de temps selon leur nature et leur délai de mise en oeuvre. On peut ainsi trouver [Ant65] :

- les décisions stratégiques ;
- les décisions tactiques ;
- les décisions opérationnelles ;

Pour [CM01], les décisions stratégiques correspondent aux décisions de conception et les décisions tactiques aux décisions de planification. On peut aussi trouver uniquement une distinction entre la conception (Supply Chain Design - SCD) et les opérations (Supply Chain Execution - SCE) [Har03]. Enfin, avec une vision client de ces activités, [Gen03] définit les décisions stratégiques comme répondant à un marché, les décisions tactiques comme répondant à un client final et les décisions opérationnelles comme répondant au prochain maillon de la chaîne logistique (par exemple, l'usine d'assemblage pour un site fournisseur).

Notons aussi que l'aspect temporel est différent selon les secteurs d'activité car une décision à 1 an dans une industrie peut être considérée comme stratégique dans un secteur d'activité et tactique dans un autre secteur d'activité avec une réactivité plus faible.

Par la suite et dans le cadre de la gestion de la chaîne logistique, nous considérons les définitions suivantes :

- les décisions stratégiques : ces décisions sont structurelles sur le réseau logistique et vont décider des investissements en termes de nouvelles ressources (par exemple, la construction d'une nouvelle usine...) ou de réallocation de ressources (par exemple, la relocalisation d'une activité...). Ces décisions sont réalisées en lien étroit avec la finance car elles impactent durablement la structure financière de l'entreprise et sa rentabilité à long terme ;
- les décisions tactiques : nous considérons que les décisions tactiques vont organiser les ressources définies stratégiquement pour atteindre les objectifs de manière efficace (réalisation des objectifs) et efficiente (au coût minimum). Ces décisions sont généralement prises en tenaille entre les contraintes issues des décisions stratégiques passées (investissement) et la complexité et la variabilité opérationnelle ;
- les décisions opérationnelles : les décisions opérationnelles vont conduire à la réalisation des opérations, c'est-à-dire l'ensemble des activités d'exploitation de la chaîne logistique. Dans ces activités vont se trouver celles qui ajoutent de la valeur au produit. Tout l'enjeu de la planification opérationnelle est le respect du triptique qualité/coût/délai sur le terrain des opérations ;

Dans la démarche MRP2 [VBWJ05], à chaque niveau de planification, les données techniques et le niveau de détails des capacités de production sont clairement définis. On retrouve cette approche en figure 1.4.

1.2.2.2 La planification hiérarchisée

Les différentes décisions dans la chaîne logistique sont souvent liées entre elles. Ainsi [RLC05] présente le « Réseau des décisions logistiques » avec leurs interactions. Les auteurs distinguent les fonctions suivantes :

- la planification stratégique,
- la conception du réseau logistique,
- la production,
- la conception du réseau de communication,
- la gestion des commandes,
- la gestion des achats et des approvisionnements,
- la gestion des stocks,
- la prévision de la demande,

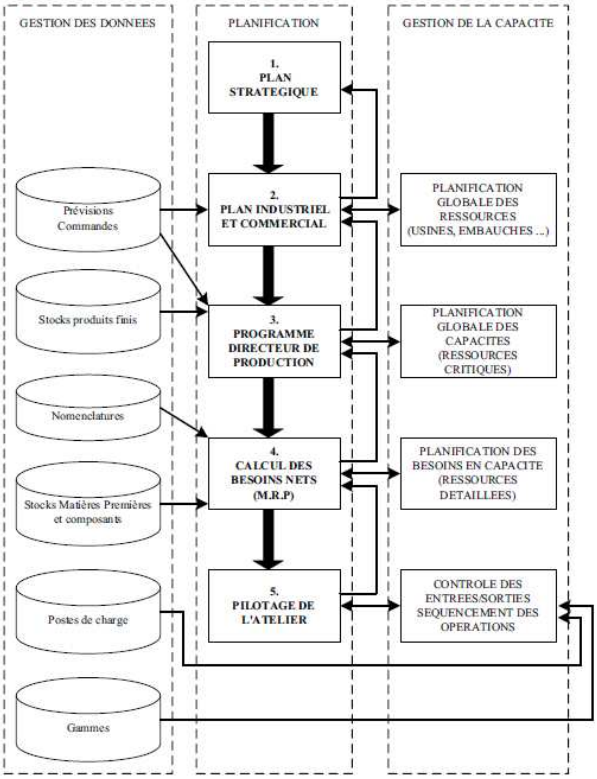


Figure 1.4 – La méthode MRP2 **??**

- la gestion des emballages,
- l'entreposage,
- la manutention.

Cependant d'après le concept de « rationalité limitée »[CW95], les décisions sont prises à l'aide des informations à disposition (celles-ci sont généralement incomplètes, incertaines et imprécises). De plus, le décideur a tendance à garder la première solution satisfaisant ses contraintes au lieu d'optimiser le problème (garder la meilleure des solutions satisfaisant les contraintes). Dans la suite des décisions liées entre elles, il est donc primordial d'avoir une cohérence à la fois fonctionnelle (par exemple, l'impact du transport sur la production et vice-versa) et temporelle de ces décisions (par exemple, l'impact des décisions stratégiques sur la liberté de décision tactique).

Ainsi, [HM75] a proposé une approche hiérarchisée de la planification de la production se basant sur les éléments suivants :

- une décomposition et une structure hiérarchique des décisions,
- différents niveaux d'aggrégation selon les niveaux hiérarchiques,
- une coordination hiérarchique au travers de directives et de rétroaction (« feedback » en anglais),
- la construction de modèles synthétisant les informations et objectifs de chaque décision,
- la résolution de modèles.

A chaque niveau hiérarchique, les décisions prises vont anticiper puis demander un retour (feedback) des niveaux inférieurs [Sch03] avant de fournir une décision finale.

Par ailleurs, [Hen99] définit les termes de cohérence et de robustesse dans le cadre de la planification hiérarchisée. Une décision agrégée (du niveau supérieur) est dite robuste si elle assure l'existence d'une

solution au niveau détaillé. Une décision détaillée (du niveau inférieur) est dite cohérente si elle est compatible avec la décision agrégée.

La planification hiérarchisée est un cadre théorique d'analyse des différentes décisions prises lors de la planification de la chaîne logistique. Ce cadre, qui décompose clairement les différentes décisions et leurs hypothèses propres, a notamment participé à l'émergence des systèmes d'information répondant à l'ensemble des problématiques de la chaîne logistique [SK08].

1.2.3 La conception d'un réseau logistique

La problématique de la thèse concerne l'optimisation de la logistique internationale à horizon stratégique. Il s'agit concrètement de concevoir le réseau logistique dans un environnement international.

Cette conception est réalisée au travers des investissements au niveau des différents noeuds du réseau (i.e. installation d'une capacité de production) et parfois au niveau des liaisons entre les noeuds (i.e. achat d'un moyen de transport). Ces investissements vont durablement influencer les performances économiques de l'entreprise. L'étape de conception du réseau est donc cruciale de la planification des activités industrielles. Par la suite, nous allons décrire en détails les enjeux de la conception d'un réseau logistique, les décisions à prendre et l'importance d'une approche globale en termes d'optimisation.

1.2.3.1 Enjeux et motivations de la conception de réseaux logistiques

La conception du réseau logistique d'une entreprise n'est généralement pas une activité récurrente. Elle est plutôt réalisée au cas par cas selon les événements de la vie de l'entreprise. Ainsi, en cas d'ouverture d'un nouveau marché, l'entreprise va concevoir un nouveau réseau de distribution ou même un réseau de production-distribution (en construisant une usine localement). [SLKSL02] cite les cas suivant dans les évènements initiateurs d'une étude de (re)conception d'un réseau logistique :

- Changement important de la demande,
- Changement du mix de produits,
- Changement des process de production,
- Changement dans la stratégie de sourcing,
- Changement dans le coût d'exploitation des sites existants,
- Fusion et acquisition entraînant la fusion de différents réseaux logistiques.

La conception du réseau logistique est donc rarement réalisée à partir d'une feuille blanche et doit donc intégrer l'existant dans sa réflexion. Pour [CG07], la conception du réseau logistique s'apparente maintenant plus à la configuration d'un système industriel. Cette configuration doit donc déterminer les paramètres de contrôle (par exemple, la localisation des sites et leurs capacités de production) et les ajuster périodiquement en fonction des évolutions de l'entreprise et de son environnement. Ce changement de paradigme va dans le sens d'une plus forte intégration de ces décisions dans la planification avancée.

Enfin, l'activité de conception du réseau logistique doit s'établir dans la stratégie logistique de l'entreprise (objectifs en termes de services et de politiques de gestion) [LR05] et, plus globalement, dans la politique générale de l'entreprise en intégrant des aspects sociaux, d'alliances avec d'autres entreprise, de stratégie commerciale...

1.2.3.2 Définition de la conception d'un réseau logistique

Dans [Har03], nous trouvons la définition de la conception d'un réseau logistique suivante :

« La conception du réseau logistique est le processus qui détermine la structure du réseau logistique - les usines, les centres de distribution, les modes de transport et les lignes, les process de production... qui vont être utilisés pour satisfaire la demande client. Ces études sont de périmètre stratégique, utilisent un horizon temporel de plusieurs mois ou années et généralement considèrent peu ou pas d'incertitude avec les données ».

Classiquement, les questions étudiées sont [Har03] :

Stratégie de production

- Combien d'usines sont nécessaires ?
- Où chaque usine doit être localisée ?
- Quels produits doivent être réalisés sur chaque usine ?
- Quels sont les technologies de production à déployer dans chaque usine et à quel niveau de capacité ?
- Quels marchés sont servis par chaque usine ?

Stratégie d'approvisionnement

- Quels sont les fournisseurs de tous les types de composants ?
- Comment allouer les fournisseurs aux usines ?

Stratégie de distribution

- Doit-on livrer directement les magasins ou stocker par région ?
- Combien de centre de distribution sont nécessaires et où faut-il les placer ?
- Quel centre de distribution doit servir un client ?
- Quel mode de transport doit être utilisé ?

Stratégie d'externalisation

- Quelle partie de la chaîne logistique doit rester en interne ou être externalisée ?
- Quel est l'impact du taux de service sur le coût ?

Conception des nouveaux produits et des nouveaux process

- Quelle infrastructure doit être utilisée lors de l'ajout de nouveaux produits à des lignes de production existantes ?
- A quel niveau de demande des sources d'approvisionnement additionnelles sont nécessaires et où doivent-elles être localisées ?

1.2.3.3 La nécessité d'une approche d'optimisation « globale »

Dans le paragraphe précédent, nous avons vu différentes questions stratégiques au niveau du réseau logistique. Dans le tableau 1.5, nous détaillons ces questions en regardant les décisions prises, les contraintes à respecter et les coûts modifiés par ces décisions. Nous pouvons voir que les coûts modifiés par ces différentes décisions sont parfois interdépendants et qu'il convient donc de raisonner sur le coût total de la chaîne logistique [BCC02] pour éviter de dégrader la performance globale en améliorant localement le système.

A partir de la définition de [KR00], un modèle de planification stratégique (hors investissement) a les éléments suivants :

- Modélisation des flux (quantités transportées entre les différentes localisations),
- Modélisation des capacités (limites de traitement au niveau des localisations),
- Calcul d'un coût global (sommant l'ensemble des coûts liés aux déplacements des flux et aux traitements réalisés au niveau des localisations).

Question	Variables	Contraintes	Coûts
Combien d'usines sont nécessaires ?	Nombre et capacité des usines	Satisfaction de la demande Respect des capacités existantes et des capacités investies Contraintes financières	Coûts fixes des usines Coûts variables de production Coûts variables de distribution Coûts variables d'approvisionnement
Où chaque usine doit être localisée ?	Localisation des usines	Localisation des fournisseurs Localisation de la demande	Coûts variables de distribution Coûts variables de production Coûts variables d'approvisionnement
Quels produits doivent être réalisés sur chaque usine ?	Affectation des produits aux usines	Contraintes de productions Capacités des usines Satisfaction de la demande	Coûts variables de production Coûts fixes de capacité de production Coûts variables d'approvisionnement
Quels sont les technologies de production à déployer dans chaque usine et à quel niveau de capacité ?	Choix de technologie Et en capacités de production	Satisfaction de la demande Localisation des fournisseurs, des usines et des clients Contraintes de flexibilité	Coûts fixes de capacité de production Coûts variables de production Coûts variables d'approvisionnement
Quels marchés sont servis par chaque usine ?	Affectation des marchés aux usines	Satisfaction de la demande (quantité, niveau de service) Capacités de production des usines Contraintes de transport	Coûts variables de production Coûts variables de distribution
Quels sont les fournisseurs de tous les types de composants ?	Choix des fournisseurs	Satisfaction des besoins en composants des usines Capacités des fournisseurs Contraintes de transport	Coûts fixes d'approvisionnement Coûts variables d'approvisionnement
Comment allouer les fournisseurs aux usines ?	Affectation des achats de composants aux fournisseurs	Satisfaction des besoins en composants des usines Capacités des fournisseurs Contraintes de flexibilité	Coûts variables d'approvisionnement
Doit-on livrer directement les magasins ou stocker par région ?	Sélection routes de distribution	Satisfaction de la demande Respect des capacités d'entreposage	Coûts variables de distribution Coûts fixes de distribution
Combien de centres de distribution sont nécessaires et où faut-il les placer ?	Nombre et localisation des centres de distribution	Satisfaction de la demande Localisation des usines et des clients	Coûts variables de distribution Coûts fixes de distribution
Quel mode de transport doit être utilisé ?	Choix du mode de transport	Localisation des usines et des clients Capacités des modes de transport	Coûts fixes de distribution / approvisionnement Coûts variables de distribution/approvisionnement
Quelle partie de la chaîne logistique doit rester en interne ou être externalisée ?		Contraintes financières Satisfaction de la demande	Coûts fixes de production Coûts variables d'approvisionnement, de production et de distribution
Quel est l'impact du taux de service sur le coût ?	Choix de la localisation et des niveaux de stocks	Localisation et niveau de service de la demande Contraintes de transport	Coûts fixes de distribution Coûts variables des distribution

Figure 1.5 – Détails des décisions de la conception de réseau logistique

1.3 La chaîne logistique PSA

La cas d'étude industriel lié à notre problématique est le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën. Le secteur automobile est un secteur industriel de production de masse où la compétition est intense. L'automobile qui a été inventée au XX^{ème} siècle (la célèbre Ford T a été lancée en 1908) reste un laboratoire d'évolutions techniques, organisationnelles et sociales. C'est un secteur actuellement mature sur les marchés occidentaux mais en plein développement dans les pays émergents notamment les BRIC (Brésil, Russie, Inde et Chine). Le secteur automobile est donc fortement affecté par la mondialisation avec des enjeux majeurs de localisation/délocalisation pour des sites de production employant des milliers de salariés. Au delà des constructeurs automobiles, les équipementiers de rang 1 et au delà sont des acteurs majeurs.

Par la suite, nous allons décrire globalement l'entreprise et son système industriel puis nous étudierons rapidement la stratégie Lean du Groupe et son implémentation industrielle. Enfin, nous entrerons en détail dans ses opérations de production, d'approvisionnement et de distribution.

1.3.1 Présentation générale de l'entreprise et de son système industriel

L'entreprise Peugeot Frères a été fondée en 1810 en Franche Comté pour la réalisation d'outils (scies...) lors de la révolution industrielle. Après un voyage aux Etats-Unis, les Peugeots décident en 1890 de se lancer dans l'aventure automobile avec la création de la marque Automobile Peugeot. A l'origine les moteurs étaient achetés à l'allemand Daimler mais ils ont rapidement été développés en interne par Peugeot. L'extension industrielle de PSA a notamment profité du rachat de trois usines européennes (Rython, Poissy et Madrid) à Chrysler en 1970. Après la fusion avec Citroën, le groupe PSA Peugeot Citroën est fondé en 1976. La fusion est totalement réalisée en 1998 avec une unification de l'appareil technique, industriel, administratif et financier. Parallèlement aux deux marques commerciales qui ont des filiales propres dans chaque pays de commercialisation (à l'exception des pays avec des importateurs locaux) et aux filiales de production domiciliées dans les pays où se trouve l'outil de production industriel, le groupe PSA dispose des filiales suivantes :

- GEFCO (acronyme de Groupages Express de Franche-COmté) : intégrateur logistique réalisant la majorité des activités de transport à la fois en approvisionnement, en logistique interne et en distribution.
- Faurecia : Equipementier de rang 1, spécialiste des systèmes d'échappement, sièges, planches de bord, blocs avant, panneaux de portes...
- PSA finance : une banque qui apporte une souplesse financière pour ses investissements et pour les crédits automobiles des clients

Notons que PSA a une coparticipation dans la société Française de mécanique (détenue à 50/50 avec Renault) qui produit des moteurs notamment des moteurs diesels. Ajoutons enfin, que l'activité de Peugeot Motocycles dont la production de « deux roues »complète l'offre de mobilité du Groupe.

1.3.1.1 Le réseau logistique automobile

Par rapport à la définition générale d'un réseau logistique (de la section 1.2.1.1), un réseau logistique automobile se décompose en trois parties :

- le réseau d'approvisionnement,
- les usines terminales (UT),
- le réseau de distribution.

Les usines terminales sont l'endroit où les véhicules sont assemblés (figure 1.6). Elles sont généralement localisées à proximité des marchés de vente car elles sont le point focal de destination de tous les flux d'approvisionnement des composants et d'origine de tous les flux de distribution des véhicules.

Le réseau d'approvisionnement automobile est constitué de tous les fournisseurs des usines terminales. On peut trouver les usines appartenant à PSA et réalisant les organes (par exemple, le moteur, les boites de vitesses, les amortisseurs... figure 1.7), les équipementiers de rang 1 qui vendent des modules complets (par exemple, des sièges, des planches de bords, des faisceaux adaptés...), d'autres



Figure 1.6 – Les usines terminales

fournisseurs de taille plus réduite et, parfois, d'autres usines dans le cas où un véhicule est réalisé sur différentes usines terminales. Mais, au delà de ce premier rang, on trouve des fournisseurs de rang 2 (c'est-à-dire les fournisseurs des fournisseurs) et plus... La filière d'approvisionnement est donc extrêmement étendue et globale et les fournisseurs du secteur automobile travaillent généralement pour plusieurs constructeurs.



Figure 1.7 – Les usines de mécanique et bruts

Une fois les véhicules produits, ils sont envoyés aux concessions où les clients pourront venir en prendre possession. Cette logistique de distribution intègre, hormis pour les flux directs des usines, un centre de distribution où les véhicules vont transiter avant d'être expédiés aux concessions. Par ailleurs, une distribution mondiale va demander d'utiliser du fret maritime et donc des passages au port.

Par la suite, nous détaillerons le processus de gestion des commandes. Puis, un zoom sera réalisé consécutivement sur la production, l'approvisionnement et la distribution.

1.3.2 La gestion des commandes

Dans la figure 1.8, nous présentons le cycle de réponse au client, de la prise de commande en concession à la livraison du véhicule. Le délai moyen est environ de 25 jours. Les étapes sont les suivantes :

1. La commande client est prise au niveau de la concession ou d'un autre représentant du réseau de vente ;

2. Les commandes sont centralisées au niveau de la filiale commerciale (par exemple, Peugeot France) puis rassemblées au niveau de la direction commerciale (7 jours).
3. Les commandes sont transformées en ordres de fabrication qui sont répartis sur les usines en fonction des capacités de production (4 jours).
4. Les commandes affectées aux sites sont séquencées sous la forme d'un « flux papier » qui va permettre aux fournisseurs de préparer leurs approvisionnements (4 jours).
5. Le flux papier devient le « flux physique » lors de la fabrication concrète du véhicule (3 jours).
6. Une fois produit le véhicule est transporté en concession (5 jours).
7. En concession, le véhicule est préparé puis livré à son client (3 jours).

Notons que la partie 'production' se décompose en 4 jours de flux papiers et 3 jours de flux physique et dure donc au total 7 jours. Cette organisation va être la base de la majorité de l'exécution.

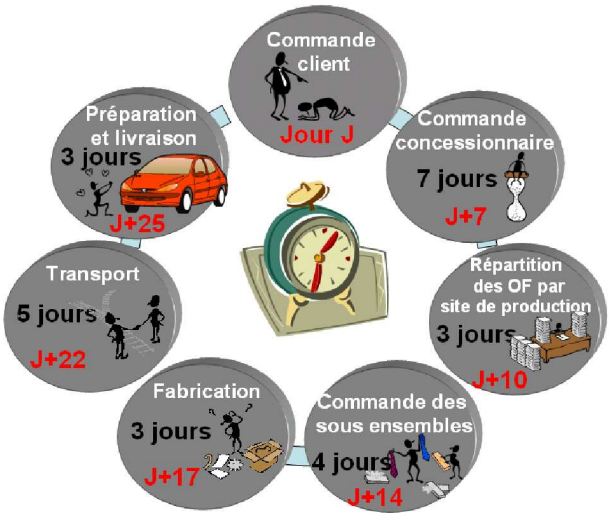


Figure 1.8 – Le cycle de la commande à la livraison

1.3.2.1 Organisation globale du système industriel

Le système classique de réponse à la demande est présenté en figure 1.9. Il repose à la fois sur la planification du système industriel basée sur des prévisions commerciales et le cycle de réponse à la commande constitué de la préparation et de l'exécution. Les prévisions vont permettre la création du programme de production autour duquel tout le système industriel (usines terminales et fournisseurs) va s'organiser. Puis, à partir des commandes commerciales, une consolidation est réalisée au niveau des filiales commerciales puis les commandes deviennent des ordres de fabrication (OF). Ces OF vont être stockés dans une banque d'OF (parfois appelée « tonneau ») en attente d'affectation. Les OF en banque seront ensuite affectés aux sites puis ordonnancés selon les contraintes de la production.

1.3.2.2 L'affectation des OF aux sites de production

A partir des OF en banque, une répartition à la fois temporelle (quel jour ?) et spatiale (dans quelle usine/ligne d'assemblage ?) doit être réalisée. Cette affectation journalière est réalisée en respectant les contraintes industrielles et en minimisant le temps passé dans cette banque. Si un seul site est possible, l'enjeu est uniquement de lisser la charge liée aux différentes options sur différentes journées. Dans le cas où différents sites de production sont possibles, une optimisation économique est aussi à réaliser pour affecter les OF sur les sites en minimisant notamment le coût de distribution. De plus, dans le cas où il existe, sur un même site, différentes lignes d'assemblage, une affectation à la ligne où les options sont disponibles est réalisée. Une fois affectés à un site, les OF sont ordonnancés.

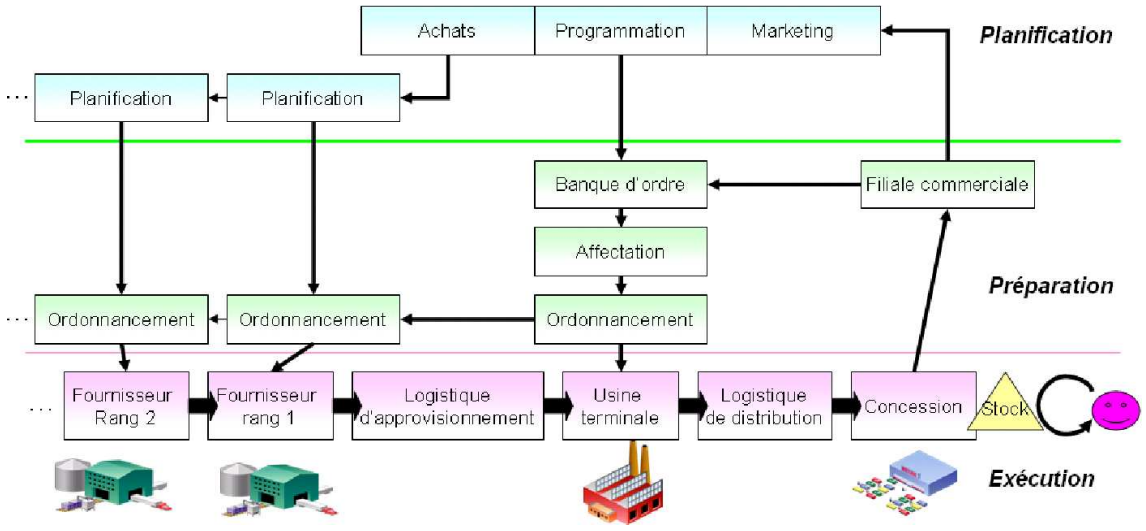


Figure 1.9 – Cartographie du processus classique de réponse à la commande (adaptée de [HPC04])

1.3.2.3 L'ordonnancement des OF

Sur chaque Usine Terminale (UT), un ordonnancement unique par jour est réalisé. C'est le référentiel de la production dans l'usine mais aussi à l'extérieur au niveau de l'approvisionnement et de la distribution. Elle séquence les OF des véhicules à produire. Ces OF décrivent en détail toutes les options à installer dans le véhicule. La liste unique ordonnancée (LUO) est réalisée en se basant sur les contraintes de l'atelier d'assemblage (cf 1.3.3.4) afin d'obtenir une productivité optimale sur toute l'UT. Comme les trois ateliers constituant une UT n'ont nécessairement pas les même contraintes, des stocks inter-atelier sont utilisés pour réordonnancer partiellement les véhicules [JFGB04] et ainsi composer au mieux avec les contraintes des différents ateliers. Un enjeu majeur de la production est donc le respect opérationnel de cette LUO de manière à organiser au mieux les activités connexes (approvisionnement, distribution...).

1.3.3 La production

La production des véhicules est réalisée au sein des usines terminales.

1.3.3.1 L'usine terminale

Les usines terminales sont les sites d'assemblage des véhicules. Ce sont les unités de production symboles de la production automobile avec des milliers d'employés (plus de 12 000 salariés en 2009 à Sochaux, usine historique de PSA et plus gros site industriel français). Une myriade de fournisseurs vont aussi faire converger leurs pièces vers ces usines pour qu'elles soient assemblées. En sortie des usines terminales, les véhicules neufs sont prêts à être expédiés sur leurs différents marchés. Les usines terminales sont constituées de trois ateliers : l'atelier de ferrage, l'atelier de peinture et l'atelier de montage. Parfois, un atelier d'emboutissage réalisant des sous-ensembles est intégré au site.

1.3.3.2 L'atelier de ferrage

L'atelier de ferrage a pour rôle d'assembler la caisse du véhicule à partir des différents composants métalliques (majoritairement de la tôle). Cet atelier est extrêmement robotisé, notamment pour la réalisation des soudures. La qualité de cette réalisation est importante car elle va assurer la solidité du véhicule. Il existe une faible variété de caisses correspondant au nombre de silhouettes de véhicules (c'est-à-dire la forme générale de la voiture, par exemple, 3 ou 5 portes, break, coupé-cabriolet...) réalisées dans l'usine.

1.3.3.3 L'atelier de peinture

L'atelier de peinture est le lieu où sont appliqués les différents traitements de surfaces sur les caisses et où ces dernières sont peintes. Ces ateliers sont généralement automatisés au niveau du passage par les différentes cuves (traitement anticorrosion...) mais l'application de la peinture est encore assez fréquemment réalisée à la main. Au delà de la qualité des opérations réalisées et de la gestion des polluants liés à la peinture (solvants...), les opérations de peintures demandent logiquement de peindre le maximum de véhicules successifs de la même couleur pour limiter les changements d'outil (nettoyage...).

1.3.3.4 L'atelier de montage

L'atelier de montage automobile va accueillir les caisses peintes pour les compléter des différentes pièces d'assemblage (ouvrants, roues...) ainsi que les différentes options demandées par les clients. Cette flexibilité au niveau de l'assemblage fait appel à une importante main d'oeuvre pour réaliser le montage. Il existe alors une complexité combinatoire liée au grand nombre d'opérations, de postes de travail et d'opérateurs à organiser. Il est notable que l'atelier est cadencé par la vitesse de défilement des véhicules. En bout d'atelier de montage, de nombreux contrôles qualité sont réalisés.

Les opérations de production et d'assemblage au sein des usines terminales sont essentielles pour la réalisation des véhicules. Cependant ces opérations sont dépendantes de la disponibilité en temps et en heure des composants.

1.3.4 L'approvisionnement

L'approvisionnement consiste à prendre possession et transporter des composants des sites fournisseurs aux usines terminales. Les possibilités de « Global Sourcing » demandent d'étudier les opportunités de s'approvisionner partout sur la planète. Ce choix est réalisé en calculant un coût rendu d'approvisionnement [BCC02]. Ce coût doit intégrer l'ensemble des éléments de la logistique d'approvisionnement comme le coût d'achat, le coût de transport, le coût de douanes, le coût de stockage le long du flux...

Par la suite, nous introduisons les leviers permettant d'optimiser les approvisionnements que sont les achats, le transport d'approvisionnement et les spécificités des flux intercontinentaux.

1.3.4.1 Les achats

La fonction achat a vu son rôle grandement évoluer ces dernières années. Ainsi, dans l'industrie automobile, comme une grande part de la valeur d'un véhicule (2/3 en 2000 et près de 3/4 vers 2015, selon AMR Research) provient des fournisseurs, cette fonction est essentielle. D'un point de vue financier, les réductions de coût au niveau des achats ont un impact direct sur le résultat d'exploitation de l'entreprise.

Ainsi l'objectif des achats est souvent de systématiquement réduire les coûts d'achat. Cela est réalisé à l'aide de techniques comme la décomposition des coûts qui va mettre en lumière où se trouve la marge du fournisseur et où des économies peuvent être réalisées. La balance entre l'automatisation d'un processus de production et l'utilisation de main d'œuvre plus flexible est souvent étudiée. Le volume de production est un paramètre très important. De plus, le choix du partage de la valeur est aussi une question fondamentale. Contractuellement, les incoterms (accronyme de INternational COntract TERMs) vont définir la réparition des coûts et des responsabilités entre vendeur et acheteur le long du flux d'approvisionnement (voir la figure 1.10).

1.3.4.2 Les systèmes d'ordre

Une fois le fournisseur choisi, la gestion du flux d'information qui va déclencher les approvisionnements est primordiale. La visibilité de plusieurs jours du planning de production à réaliser va permettre aux fournisseurs d'envoyer les pièces le plus tard possible (philosophie du Juste à temps). Le choix

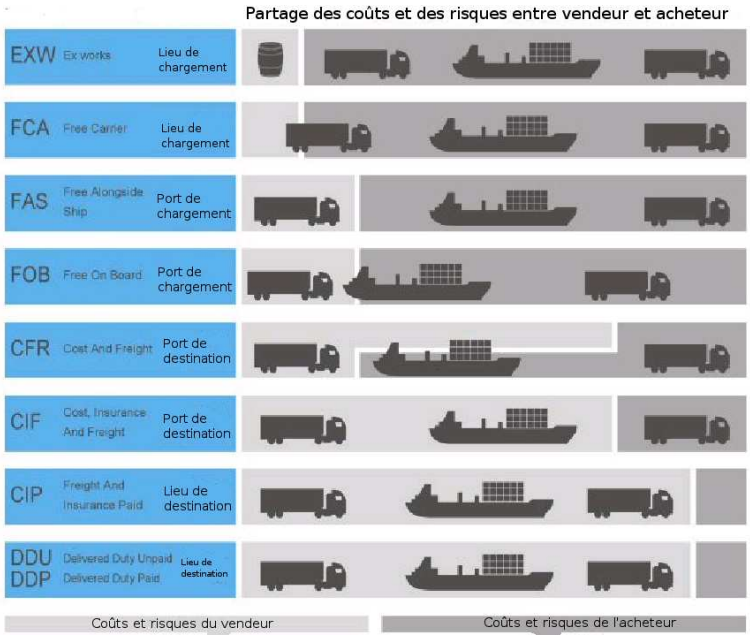


Figure 1.10 – Les différents incoterms (www.jfhillebrandbulk.com)

du système d'ordre va donc dépendre des contraintes géographiques de la pièce approvisionnée mais aussi des contraintes industrielles en usine et chez le fournisseur. Ainsi la barre verticale sur la figure 1.11 correspond au délai maximum que l'on peut obtenir des ordres de fabrication fermes (issu de la partie « papier »de la LUO). Classiquement, les systèmes d'ordre utilisés sont le RECOR, les systèmes d'ordre coordonnés (SPARTE, SPARTE adressé horodaté et synchrone).Nous détaillons par la suite ces sytèmes d'ordres.

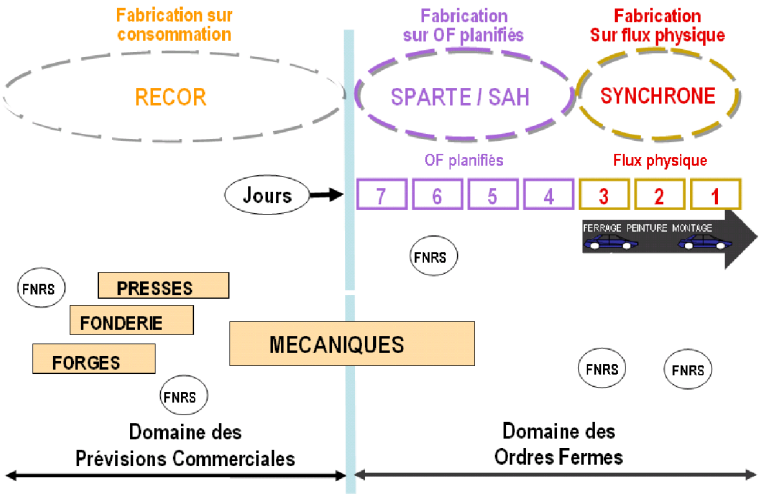


Figure 1.11 – Les différents systèmes d'ordres

- Le RECOR : Le système RECOR (REapprovisionnement sur la COnsommation Réelle) est la traduction française du KANBAN japonais. L'idée est de travailler en flux tirés avec un réapprovisionnement uniquement déclenché par la demande réelle. Ainsi le RECOR va fixer, à partir de la demande moyenne, de la variation de la demande moyenne et du temps de réapprovisionnement, un niveau de stock maximum et un niveau de déclenchement du réapprovisionnement. Cette méthode a l'intérêt de borner le stock entre client et fournisseur en gardant une certaine sécurité vis à vis de la variabilité de la demande.
- Le SPARTE : Le système d'ordre SPARTE (Système de Programmation des Approvisionnements

Rationnalisé par une Technique Economique) est un système coordonné : il va chercher à faire approvisionner la pièce au moment exact où l'opérateur d'assemblage en a besoin. Ainsi à partir de la liste unique ordonnancée, une date de consommation est défini et l'approvisionnement doit être réalisé le plus tard possible avant cette date. Cela est possible grâce à la mise en place et au respect de la liste unique ordonnancée (1.3.2.3)qui va permettre de planifier quelques jours avant au plus tôt les approvisionnements à la journée.

- Le SPARTE Adressé orodaté (SAH) : Le système d'ordre SPARTE a été amélioré en ajoutant l'adressage et l'horodatage des approvisionnements. Ainsi l'adresse va détailler le lieu de consommation de la pièce approvisionnée et l'horodatage va définir la date de consommation prévue de la pièce approvisionnée dans un créneau horaire de 2 heures. Un système de cross-dock découpé en tranche horaire et un supermarché va ensuite permettre de découpler le rythme d'arrivée des camions (1 à 2 par jours en général) et l'approvisionnement périodique de la ligne d'assemblage par un petit train. A noter que les pièces volumineuses sont classées dans un supermarché différent des pièces à petit volume.
- Le synchrone : Pour les pièces à poids logistique très lourd, le système synchrone a été mis en place. Ces pièces sont des pièces avec une forte diversité (les pares-chocs avec les multiples couleurs possibles), très chères (moteurs, planches de bord) ou très volumineuses (sièges, réservoirs). Ainsi, leur flux va être accéléré encore plus car l'appel ne sera réalisé que quelques heures avant la consommation (l'information est généralement envoyée lors de l'entrée de la caisse peinte dans l'atelier de montage). Au poste de travail, les pièces vont être livrées quelques minutes avant l'assemlage dans l'ordre prévu par l'ordonnancement.

1.3.4.3 Le transport continental

Au niveau continental, le mode de transport est quasi exclusivement du transport routier par camion. Par la suite, nous allons voir les différentes organisations de transport possibles et leurs impacts économiques. Puis nous verrons les moyens employés pour réduire ce coût de transport.

1.3.4.3.1 Les différentes organisations du transport routier Quand un industriel fait appel à un transporteur, il a généralement le choix entre : le camion dédié, le transport par lot et la messagerie. Le critère de choix du type d'organisation du transport va être le volume (ou le poids) à transporter car l'enjeu au niveau du transport va être de maximiser le chargement des camions.

Voyons maintenant ces différentes organisations :

- Le camion dédié : Il est possible de louer à l'année un camion complet ou même de gérer sa propre flotte de camions. C'est l'organisation la plus rentable si le volume à transporter est important. Ainsi, si les lots de transport sont des camions complets, le coût de transport est alors minimal (pour du transport routier). Classiquement entre les usines de moteurs de PSA et les usines terminales, des camions dédiés sont utilisés.
- Le transport par lot : Le transport par lot va réserver soit un camion complet (lot complet) ou une surface d'un camion (lot partiel) auprès d'un transporteur et sur un tronçon donné. Le lot complet est à rapprocher du camion dédié. Dans le cas du lot partiel, comme le camion est partagé avec d'autres clients, le prix du camion est aussi divisé. On pourra noter que, dans ce type d'organisation, des tournées de ramassage et de livraison sont possibles.
- La messagerie : Dans le cas de petits volumes transportés, le principe de groupage va être utilisé pour maximiser le chargement des camions : le transport va être réalisé en deux tronçons avec un passage sur une plateforme logistique intermédiaire. Ainsi dans un premier temps, un camion de 'ramasse' va récolter les marchandises à transporter et les grouper sur la plateforme logistique. Puis un camion de 'traction' va transporter un chargement conséquent entre la plateforme logistique et l'usine terminale. Cette organisation est complexe et repose sur le savoir-faire et la structure logistique du transporteur.

Il est important de noter qu'un camion réalise en général des aller-retours et que le coût du retour est à bien prendre en compte dans l'estimation de coût. De plus, les emballages durables seront à

ramener directement ou indirectement au fournisseur. Ces problématiques de logistique inverse sont à intégrer, au moins implicitement, dans les calculs.

1.3.4.3.2 L'optimisation du transport d'approvisionnement Avec la hausse du coût des énergies, l'optimisation du transport d'approvisionnement est devenu un enjeu majeur de compétitivité économique. Deux leviers sont maintenant présentés : l'usage de prix départ et la généralisation des « milk run » (« tournées du laitier » en français).

Le prix départ Historiquement, les achats étaient négociés avec des incoterms pouvant varier du EXW au DDP (cf figure 1.10). Ainsi, dans les cas d'approvisionnement FRANCO (DDP, DDU), la prestation transport est réalisée par le fournisseur. Il est clair que pour massifier les flux, il faut utiliser un maximum de moyens de transport communs. Ainsi la négociation en EXW des achats va augmenter le volume à transporter au niveau du prestataire logistique et donc augmenter les possibilités d'optimisation du transport.

Les tournées du laitier Parallèlement au prix départ, la stabilité du programme de production et de la liste unique ordonnancée permet de prévoir précisément les volumes à transporter et ainsi de remplacer des transports de messagerie par des transports par lot réalisant des boucles régulières de ramassage (appelée aussi « tournée de laitier »). Cette optimisation est réalisée mensuellement en fonction des volumes de production du mois à venir.

1.3.4.4 Le transport intercontinental

Lorsque le transport devient intercontinental, l'usage du fret maritime est nécessaire. Ce mode de transport est très différents en termes de contraintes du transport routier. Dans ce qui suit, nous allons détailler l'organisation classique du transport intercontinental.

1.3.4.4.1 Les flux internationaux Le transport en fret maritime utilise quasi-uniquement des caisses métaliques à taille standard : les trans-conteneurs (TC). Malgré ce sur-emballage, le fret maritime est un environnement très hostile qui va demander de préparer les pièces spécifiquement à ce type de transport. Ainsi le passage par une plateforme de préparation ou ACE (Atelier de Conditionnemnet et d'Emballage) est nécessaire à la fois pour emballer les pièces et les ranger dans les conteneurs.

Un flux international standard de pièces peut se décomposer en différents tronçons.

- l'enlèvement : entre le fournisseur et la plateforme de préparation des conteneurs.
- la mise à FOB (Free On Board - comme l'incoterm) : entre l'ACE et le port de départ,
- le fret : entre le port de départ et le port d'arrivée,
- le POST : entre le port d'arrivé et l'ACE d'arrivée,
- la distribution : entre l'ACE de déconditionnement et l'usine terminale,

Notons que parfois, les fournisseurs peuvent préparer directement des TC et que les usines terminales peuvent avoir sur place les activités de déconditionnement.

1.3.4.4.2 L'optimisation du transport international Au delà de la productivité au niveau des ACE et des ports, le transport internationnal a aussi des leviers d'optimisation pour faire baisser son coût. Nous pouvons citer : l'amélioration du transport d'approche et de distribution, le coût du fret, l'optimisation douanière.

Dans le coût total du transport international, les phases d'approche et de distribution sont non négligeables. Elles pourront donner lieu à de l'optimisation de transport routier comme vu précédement pour le transport continental.

Le coût du fret est basé sur des tarifs des affréteurs maritimes. Ces tarifs sont très variables car ils suivent à la fois le cours du pétrole et la loi de l'offre et de la demande. Cela implique que les tarifs ne sont pas les mêmes selon le sens du transport (un transport de l'Europe vers la Chine est bien moins cher qu'un transport de la Chine vers l'Europe) et qu'ils peuvent varier rapidement. Par ailleurs, l'existence d'une liaison maritime entre deux ports mineurs n'est pas assurée et le transport

maritime a tendance à se concentrer entre les grands ports mondiaux (dans l'ordre de volume de transit : Shanghai, Singapour, Shenzen, Hong-Kong, Rotterdam...) avec des tarifs de transports très compétitifs.

Le transport international intègre aussi la notion de douanes et de taxes douanières. Il est notable que certaines procédures douanières permettent de différer ou de faire rembourser des frais de douanes. Ainsi des entrepôts sous douanes sont possibles. Les marchandises sont stockées non dédouanées et les frais de douanes ne seront à payer qu'en sortie de stock. Dans le cas de marchandises importées pour assemblage, si la marchandise assemblée est réexportée alors il est possible de récupérer des droits de douane.

1.3.5 La distribution

La distribution intègre le transport de la sortie de l'usine (appelée « bout d'usine ») jusqu'à la concession où le véhicule sera vendu. Ce transport est important car, du fait de la taille des usines terminales, il existe au final peu de sites de production. Or les marchés étant mondiaux, il n'est pas rare qu'un véhicule voyage plusieurs milliers de kilomètres pour retrouver son acheteur. Par la suite, nous allons décrire l'organisation du bout d'usine, les différents modes de transport utilisés et les leviers de l'optimisation de la distribution.

1.3.5.1 Le bout d'usine

Le bout d'usine est d'abord un lieu important organisationnellement car il y a transfert de propriété du véhicule entre la filiale industrielle et la filiale commerciale. De plus, à proximité de chaque usine se trouve un stock commercial pouvant abriter des véhicules attendant un client. Enfin, le bout d'usine est organisé pour réaliser le triage des véhicules et les orienter vers les bonnes zones d'expédition.

1.3.5.2 Les modes de transport des véhicules

Les véhicules sont transportables à la fois par la route, par le fer ou par la mer.

1.3.5.2.1 La route Le transport routier utilise des camions prévus à cet effet. Ce moyen de transport est flexible mais relativement onéreux. Quand cela est possible sur un même tronçon de transport, des optimisations en termes de chargement sont réalisées en choisissant de transporter des combinaisons de véhicules complémentaires.

1.3.5.2.2 Le fer Le transport ferroviaire est relativement peu onéreux mais demande l'accès à l'infrastructure ferroviaire ce qui impose certaines contraintes en termes de délai (disponiblité des rames de fret, transport de nuit...). C'est le moyen privilégié pour rejoindre les ports et les grands centres de distribution.

1.3.5.2.3 La mer Le transport maritime est obligatoire pour les liaisons intercontinentales. Les véhicules sont soit garés directement dans les bateaux de type RO - RO (Roll On - Roll Out, en français, rouler pour entrer et pour sortir), soit installés dans des transconteneurs spécifiques. Les liaisons maritimes étant peu fréquentes et lentes, ce type de transport impose un délai non négligeable.

1.3.5.3 L'optimisation de la distribution

La distribution a des coûts non négligeables pouvant dépasser la marge commerciale réalisée lors de la vente d'un véhicule. Ainsi son optimisation est nécessaire et sera réalisée grâce au levier du Design For Logistics (DFL), de l'optimisation du réseau de transport multimodal.

- Le Design For Logistics vise à intégrer au plus tôt les contraintes de transport dans la conception des véhicules. Ainsi on vérifiera qu'un véhicule respecte bien les volumes transportables par le fer ou par les camions.

– L'optimisation du réseau multimodal va chercher à optimiser la circulation des différents flux de distribution entre les usines terminales et les concessions. Ainsi le transport ferroviaire est peu onéreux mais il est long. Au contraire, le transport par camion est flexible mais onéreux sur de grandes distances. De plus, le transport maritime dispose d'un calendrier n'autorisant aucun retard (par exemple, dans le cas d'une liaison mensuelle). La prise en compte des différents temps de transport selon le mode choisi et des capacités de stockage au niveau des centres de distribution est alors aussi nécessaire.

1.3.6 Le processus PSA de planification hiérarchique

Dans la section précédente, nous avons décrit brièvement la chaîne logistique des véhicules de PSA. Il est clair qu'une telle organisation industrielle est complexe et qu'une certaine anticipation est nécessaire car, par exemple, des capacités de production peuvent demander plusieurs années entre la prise de décision d'installation et le fonctionnement opérationnel. Ainsi les opérations sont préparées à l'avance avec l'objectif d'avoir un système industriel efficace (répondant au besoin commercial) et efficient (utilisant le minimum de ressources) lors de leur exécution.

Le concept de planification hiérarchisée (cf 1.2.2.2) offre une théorie bien formalisée qui nous guidera pour la description de la phase de préparation des premières décisions d'investissement de capacité de production à l'ultime ordonnancement des ordres fermes de fabrication. En considérant chaque décision de planification comme à un étage de la pyramide de la préparation, il existe des interdépendances entre deux niveaux consécutifs donnés. Par la suite, nous allons décrire le concept de planification avancée et son application à l'industrie automobile, puis nous détaillerons les plans majeurs de l'industrie automobile que sont la planification stratégique, la planification du montage et le programme directeur de production.

1.3.6.1 La planification avancée et son application dans l'automobile

Le système industriel du secteur automobile est très complexe et a un temps de réaction long notamment en termes de variation des capacités de production au sein des UT. La planification de la chaîne logistique automobile a donc beaucoup à gagner avec le déploiement des APS ('Advanced Planning System', en français 'Système de planification avancée'). Cette planification va être réalisée sur toute la phase de préparation et inclut le cycle de réponse à la commande (cf. 1.9). Un des enjeux des APS est de bien distinguer la phase préparatoire basée sur les prévisions et la phase d'exécution basée sur les commandes fermes où les concepts de simplicité du Lean prévalent. Ainsi la planification avancée doit apporter la structure « optimale » pour la réalisation au plus juste (traduction de Lean en français). Cette structure doit donc être toujours plus flexible, plus réactive et toujours viser à réduire le stock de véhicules neufs comme préconisé dans [HPC04].

1.3.6.2 Application à l'automobile de la planification avancée

Précédemment, dans une étude sur l'industrie automobile allemande [Mey04], les plans suivants ont été distingués :

– le plan budgétaire,
– le programme de production,
– le plan d'allocation de la production aux sites.

Cette approche a été complétée dans [KM06] avec une décomposition de la planification automobile en 3 plans :

– la planification stratégique
– la planification moyen-terme (budget et programme de production)
– la planification des ordres fermes

Par la suite, nous décrivons les prévisions qui vont servir de base à la planification avancée ainsi que les différentes étapes de cette planification prévisionnelle.

1.3.6.3 Les différentes prévisions de vente

La phase de préparation que nous étudions (en dehors de l'affectation des commandes aux UT et l'ordonnancement des OF) est réalisée de manière prévisionnelle. Les décisions sont donc basées sur des prévisions commerciales issues du marketing et des filiales commerciales. Ces prévisions ont des horizons, des niveaux de détail et des fréquences de mise à jour différents. Nous allons détailler le plan produit stratégique, les prévisions annuelles, les prévisions mensuelles et les prévisions hebdomadaires.

1.3.6.3.1 Le plan produit stratégique Le plan produit stratégique synthétise les projets véhicules issus du marketing et acceptés par la direction générale. Ce sont des projets en termes de positionnement commercial car ni le style, ni les spécifications techniques ne sont encore définis. En général, on rencontre soit de nouvelles versions d'un véhicule existant en fin de vie, soit de nouveaux véhicules avec un positionnement marketing très précis. Ces plans produits donnent des volumes de vente annuels sur l'ensemble de la vie prévisionnelle du véhicule. On aura donc des prévisions à quasiment 10 ans. Ce plan produit peut évoluer très rapidement en fonction des tendances économiques, de la consommation et de la concurence.

1.3.6.3.2 Les prévisions stratégiques A moyen terme (5 ans), des prévisions sont communiquées à la fois aux usines et aux fournisseurs en termes de volume de production par quadrimestre. Ces prévisions sont tirées du plan produit stratégique et affinées sur l'horizon. Toutefois, la communication à l'extérieur de l'entreprise de ces prévisions concerne majoritairement les 2 premières années (sauf exception). Ces prévisions sont réalisées sur des projets véhicules clairement définis et codifiés où on peut distinguer des silhouettes particulières (par exemple, 3 portes ou 5 portes).

1.3.6.3.3 Les prévisions mensuelles Sur un horizon de 4 ou 5 mois, des prévisions mensuelles sont réalisées avec un niveau de détails plus fin. A noter que l'on travaille en réalité sur des « périodes » qui correspondent à 4 semaines complètes (du lundi au dimanche). Le premier mois (ou plus exactement la première période) est un « contrat » entre les filiales commerciales et la production. Les filiales commerciales s'engagent sur la commande de véhicules génériques ce qui permet à la production de valider son organisation industrielle (par exemple, les effectifs industriels, les volumes approvisionnés, les heures supplémentaires).

1.3.6.3.4 Les prévisions hebdomadaires En fonction des commandes de la semaine précédente et des commandes dans la banque d'OF (cf 1.3.2.1), les prévisions de la semaine à venir sont détaillées plus précisément pour réaliser des adaptations à court terme et mieux avertir les fournisseurs des approvisionnements à venir.

Ces différentes prévisions sont synthétisées en figure 1.12.

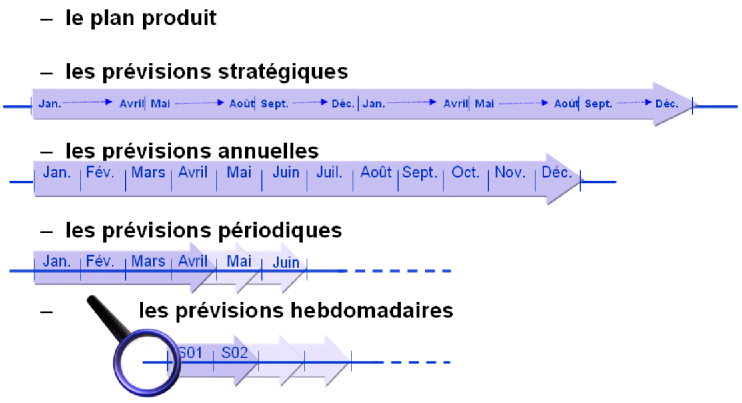


Figure 1.12 – Les différentes prévisions

Au delà du besoin de fiabilité des chiffres, une cohérence entre les différents plans est nécessaire pour avoir de la même manière une cohérence des décisions de la préparation du système industriel.

1.3.6.4 Les différents plans

Nous détaillons maintenant les différents plans qui vont structurer et organiser la chaîne logistique PSA et qui sont représentés dans la figure 1.13. Nous détaillons la planification stratégique du montage, la planification (tactique) du montage, le budget et le programme de production. Notons que l'affectation et l'ordonnancement ont déjà été présentés en 1.3.2.1.

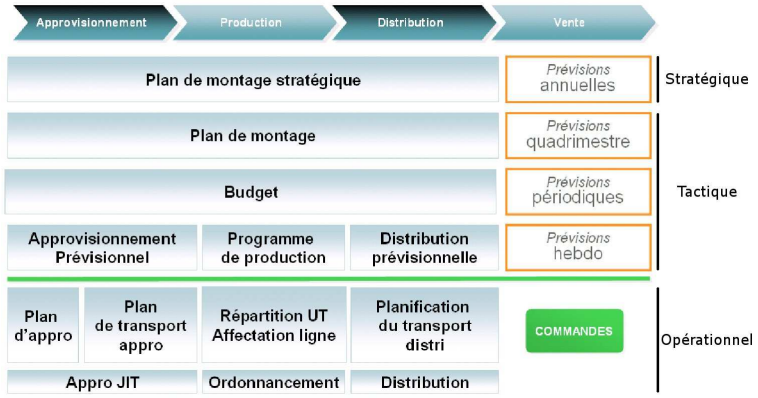


Figure 1.13 – La planification avancée PSA

1.3.6.4.1 La planification stratégique de la chaîne logistique La planification stratégique correspond à l'ensemble des décisions d'investissement prises sur la chaîne logistique. Ces décisions vont structurer de manière durable le système industriel et sont généralement prises à long terme (plusieurs années à l'avance). Ces décisions sont validées directement par la Direction Générale et sont du type suivant

- Quelles sont les usines terminales à exploiter, faut-il en ouvrir de nouvelles ou au contraire réduire la taille des sites existants ?
- Quelles capacités de production sont à mettre en place au sein des unités de production ?
- Comment faire évoluer ces capacités dans le temps ? Quelles sont les technologies à installer ou à modifier pour les installations ?
- Faut-il externaliser certaines fonctions de la chaîne logistique ?
- Comment organiser le réseau de fournisseurs à l'aide des investissements en termes d'outillage mais aussi avec des partenariats ?
- Comment organiser les échanges de sous-ensembles entre les différentes régions géographiques du Groupe ? Faut-il spécialiser ces régions ?
- Est-il intéressant d'exporter des véhicules entre les différents continents d'implantation du groupe ?

L'ensemble de ces décisions a une dimension éminament politique et multidisciplinaire. Parallèlement, les aspects financiers sont une contrainte majeure des décisions réalisées à la fois en termes de financement mais aussi de retour sur investissement (ou, plus exactement, de retour sur capitaux investis).

1.3.6.4.2 La planification du montage La planification du montage répartit les prévisions commerciales sur les sites de production (plus exactement, sur les ateliers de montage) dans le détail du véhicule à la silhouette. Elle est contrainte par les décisions d'investissements industriels réalisées à horizon stratégique. La liberté du plan de montage réside dans l'organisation des ressources humaines (par exemple, le nombre d'équipe par jour), plus flexible que les investissements industriels. De plus, le plan de montage est la référence en termes d'accostage à la fois des projets véhicules (lancement d'un nouveau véhicule ou gestion de sa fin de vie) et des projets industriels (mise en place ou modification

des installations industrielles) avec la vie série, c'est-à-dire les véhicules en cours en production. Enfin, les mises à jours des prévisions commerciales sont aussi étudiées pour vérifier qu'on a toujours équilibre entre la capacité de production et la demande commerciale (prévisionnelle). Ainsi la définition stratégique de véhicule d'équilibre (véhicule produit sur plusieurs usines terminales) permet d'équilibrer la charge affectée à chaque site de production. Au niveau du plan de montage, les questions suivantes sont posées :

- Les sites sont-ils raisonnablement chargés ? Doit-on transférer du volume entre différents sites ou faire appel à des heures supplémentaires ?
- Quels sont les besoins en termes de recrutement pour les changements de capacités de production ? Ces besoins sont-ils ponctuels ou sont-ils durables ?
- Quel est l'impact du calendrier légal (congés, jours fériés...) sur l'activité de production ?
- Quelle capacité et quand la réserver pour assurer la mise au point du process pour le lancement de nouveaux véhicules ?

1.3.6.4.3 Le plan budgétaire D'une année sur l'autre, un bugdet couvrant l'ensemble de l'entreprise est défini pour estimer les charges et les produits à prévoir et assurer la bonne marche financière. C'est aussi l'occasion de prioriser les actions à mener l'année à venir. Du point de vue industriel, ce plan va être réalisé à partir des prévisions de ventes ; ces dernières sont détaillées complètement comme des ordres de fabrication. Un calcul des besoins (via la nomenclature) est réalisé et un calcul comptable à niveau de détails opérationnel est réalisé. En termes logistiques, le budget est une synthèse des décisions prises avec une valorisation économique et un moyen de prioriser les actions d'amélioration à mener.

1.3.6.4.4 Le programme directeur de production Le programme de production va définir par mois, sur le quadrimestre à venir, les quantités et les définitions prévisionnelles des véhicules à assembler dans les différentes usines terminales. Ce programme doit respecter les contraintes globales des usines et des fournisseurs. D'une part, les usines terminales sont limitées à la fois par le potentiel technologique des installations industrielles (robots, cadences...) et les ressources humaines œuvrant au sein des ateliers. D'autre part, les fournisseurs ont un potentiel de production limité par les outillages installés (moules d'injection plastique...). L'objectif du programme de production est aussi d'organiser la production mais aussi la logistique d'approvisionnement (plan de transport, logistique interne) et la logistique de distribution (différents modes de transport...). Cependant ce programme reste prévisionnel ; seules les commandes vont entraîner des approvisionnements de composants auprès des fournisseurs et des productions. Il est notable qu'il existe un contrat entre la division du commerce (cf. 1.3.6.3.3) et celle de la production sur le mois à venir. Cet engagement du commerce donne une certaine stabilité au niveau de la production, au moins sur les grandes caractéristiques des définitions des véhicules.

Les plans présentés dans cette section sont les piliers de la planification hiérarchisée du système industriel. La cohérence des décisions dans cette séquence de plan est donc primordiale pour une exécution optimale des opérations de la chaîne logistique.

1.4 Les différents problèmes de planification stratégique de PSA

Dans la structure de la planification avancée présentée précédement, la planification stratégique doit définir les investissements en termes de capacités de production et de capacités d'approvisionnement. Ces investissements ne sont réalisés que s'ils sont rentables, c'est-à-dire si leur coût d'investissement est compensé par des économies d'exploitation ou par une augmentation de revenus. Cette exploitation opérationnelle est organisée stratégiquement avec le plan de montage qui répartie les volumes de production sur les différents sites. Les décisions d'investissements sont donc intimement liées à la planification du montage (cf. 1.3.6.4.2) sur la durée de vie des investissements. On est donc bien dans

un cas de planification hiérarchisée où l'anticipation de la répartition du montage doit s'assurer de la rentabilité des investissements.

1.4.1 Décomposition du problème de planification stratégique

Le problème de planification stratégique est un problème complexe.Ainsi les diverses possibilités d'investissement à la fois en production et en approvisionnement crée une certaine combinatoire. De plus, la prise en compte de l'ensemble des coûts pour réaliser une optimisation « globale » demande une analyse économique fine, par exemple, en intégrant les économies d'échelle en production et le calcul des prix de cession.

Ainsi une répartition monopériode doit déjà être résolue convenablement avant de pouvoir planifier le montage et les investissements stratégiques sur un horizon temporel. Le problème de planification stratégique est donc décomposé en trois problèmes distincts :

1. Le problème de répartition stratégique sans contrainte de sourcing,
2. Le problème de répartition stratégique avec contrainte de sourcing,
3. Le problème de planification stratégique avec investissements.

1.4.1.1 La répartition stratégique sans contrainte de sourcing

Le problème de répartition stratégique va consister, pour une période donnée, à partir des prévisions de ventes issues du marketing, à définir les quantités prévisionnelles de production et d'achat. Ces décisions sont liées aux flux d'approvisionnement et aux flux de distribution qui vont circuler des fournisseurs aux usines et des usines aux centres de distribution. Ces flux sont valorisés et l'ensemble des coûts d'approvisionnement, de production et de distribution vont former un total économique à optimiser. Ainsi la répartition est réalisée en minimisant le coût total d'exploitation de cette chaîne logistique sur la période.

Dans la répartition stratégique sans contrainte de sourcing, nous ajoutons les hypothèses suivantes :
- Le modèle est mono-période.
- On ne prend pas en compte les investissements.
- Les approvisionnements n'ont pas de contrainte de sourcing.

1.4.1.2 La répartition stratégique avec contraintes de sourcing

La répartition stratégique avec contraintes de sourcing définit aussi les quantités de production, de distribution et d'approvisionnement. Cependant ces dernières sont limitées par des contraintes de capacité d'approvisionnement.

Dans la répartition stratégique avec contrainte de sourcing, nous ajoutons les hypothèses suivantes :
- Le modèle est mono-période.
- On ne prend pas en compte les investissements.

Notons aussi que le problème de répartition stratégique (avec ou sans contrainte de sourcing) est industriellement un problème multipériodes. Ainsi les différentes périodes peuvent être liées entre elles par les investissement (perdurant sur plusieurs périodes) et les stocks (le stock final d'une période est le stock initial de la période suivante). Nous faisons le choix d'étudier le problème de **répartition stratégique** avec des investissements fixés et sans stockage (hypothèse générale). Ce dernier pourra être dupliqué pour obtenir un résultat sur plusieurs périodes.

1.4.1.3 La planification stratégique avec investissement

Le problème de planification stratégique va considérer plusieurs périodes avec des possibilités d'investissements en capacités de production et d'approvisionnement. A chaque période et en fonction des investissements réalisés, une répartition est calculée. L'objectif est de proposer un système industriel issu des investissements de manière à répondre à la demande commerciale et minimisant un coût total sommant l'investissement et l'exploitation.

1.4.2 Les hypothèses de la modélisation à horizon stratégique

La modélisation à horizon stratégique est naturellement moins détaillée que les données que l'on utilise opérationnellement. En effet, à horizon stratégique, la complexité du système industriel et le manque d'information ne permet pas d'étudier finement celui-ci. De plus, les prévisions de ventes sont elles-même agrégées à l'année. Enfin, l'objectif est, en général, plus de définir des tendances industrielles et d'ordonner des scénarios industriels que de réellement réaliser des chiffrages précis.

A partir de la description détaillée de la chaîne logistique PSA présentée en début de chapitre, des hypothèses de modélisation sont prises pour garder uniquement les éléments essentiels à la prise de décision stratégique.

Les données de références sont des données agrégées :

- Les véhicules étudiés correspondent aux projets véhicules c'est-à-dire à des véhicles uniquement définis en termes de marque, de segment de vente (citadine, berline, routière...) et de silhouette (forme générale de la voiture).
- Les composants (pièces) assemblés pour réaliser un véhicule sont regroupés en familles cohérentes ;
- Les capacités industrielles sont agrégées de manière à considérer un nombre limité de sites de production et à faciliter l'estimation et l'impact des contraintes capacitaires.
- Les lieux géogaphiques ne sont pas détaillés : on considère en fonction des besoins une ville, une région ou, même, un pays.
- La maille temporelle étudiée est l'année.

Concernant le système industriel, certaines hypothèses ont été prises lors de la modélisation :

- Les données sont considérées comme toutes disponibles.
- Des flux types sont définis à la fois en approvisionnement et en distribution. Opérationnellement, les flux ont généralement plusieurs points de ruptures : pour un flux d'approvisionnement, il peut passer par un atelier de conditionnement et d'emballage, un port, un magasin avancé fournisseur, une plate-forme logistique... De même, la distribution des familles de véhicules peut demander de passer dans des ports, dans des centres de distribution... Ces points de ruptures ne sont pas modélisés explicitement mais les coûts de passage sont intégrés dans les coûts de transport. De plus, des mix de modes de transport (camion/bateau en approvisionnement et camion/train/bateau en distribution) sont définis a priori et permettent d'estimer les coûts.
- Comme la maille temporelle est l'année, le calcul du stock saisonnier n'a pas d'intérêt.
- Les systèmes d'ordres ne sont pas considérés explicitement hormis les flux synchrones. Le coût et les impacts en production (niveau de stock) des différents systèmes d'ordres mis en place sont estimés a priori.
- L'approvisionnement d'une pièce au sein d'une usine terminale est majoritairement mono-sourcé (pour limiter les investissements en outillage). Cependant si les sources d'approvisionnement ont des limites capacitaires, l'utilisation de plusieurs sources est possible.
- Les décisions d'investissement en source d'approvisionnement sont réalisées comme s'il existait toujours un fournisseur local (ou une usine locale d'un fournisseur connu). En réalité, l'ensemble de ces investissements n'est pas forcément réalisable car ce sont les fournisseurs qui détiennent les sites et donc décident au final de cette possibilité d'implantation.
- Les flux d'approvisionnement sont modélisés à partir de la dernière usine réalisant de la valeur ajoutée. Ils sont donc limités au 'rang 1'. Cela inclut les usines PSA de pièces de mécanique et de bruts. L'approvisionnement auprès de fournisseurs externes et l'assemblage de ces pièces ne sont pas considérés.
- Les flux de distribution sont considérés comme atteignant un unique centre de distribution correpondant au marché de vente. La partie de la distribution dite 'capillaire', des centres de distribution aux concessions, n'est pas modélisée car elle est indépendante du choix du site de production (pas d'optimisation conjointe possible).
- Des hypothèses sont possibles à partir de la mise en place du Lean : le système logistique est considéré comme fonctionnant au nominal, c'est-à-dire sans aléas. De plus, le système est

considéré comme stationnaire c'est-à-dire que l'on ne prend pas en compte les phases transitoires comme les montées en cadence et les fins de vies de véhicules.
- D'importantes hypothèses sont prises au niveau des stock : le travail en flux tirés est l'hypothèse générale et on ne considère pas de stock saisonnier ou spéculatif : aucun stock commercial n'est considéré sur une année. Cependant les sécurisations, déterminées dans les modes de fonctionnement, et les encours de transport sont intégrés.

Concernant l'évaluation économique, les hypothèses suivantes sont prises :
- Tous les prix sont en euros. Les conversions monétaires sont implicites dans les prix donnés.
- Tous les coûts sont variables hormis les frais fixes des ressources de production (qui sont ventilés sur les volumes produits par les frais généraux) et l'amortissement annuel des investissements.
- Pour les coûts de transport, les moyens de transport sont considérés constament disponibles (et indépendants des quantités affectées aux flux). Ainsi les prix de transport sont estimés a priori et un coefficient intègre le coût de retour à vide des camions. Enfin, les économies d'échelles sur le transport en messagerie ne sont pas considérées.
- Les prix d'emballage intègrent ce que coûte le conditionnement au point de rupture de flux (main d'œuvre) et le coût matière du transport : emballage perdu ou durable. Cet emballage chez le fournisseur est inclus dans le prix d'achat. Un second emballage sera compté en cas de transport maritime.
- Les prix de cessions sont considérés comme directement dépendants des coûts de revient de fabrication.
- Les coûts de douanes sont sur-estimés : les droits de douanes sont calculés à partir d'une valeur en douane. Cette valeur en douane est opérationnellement la valeur des marchandises arrivées à la frontière. Dans nos hypothèses, nous ne distinguons pas le transport avant l'entrée dans le pays de destination et le transport dans le pays de destination. La valeur en douane est sur-estimée car elle intègre le coût du transport dans le pays de destination.
- Les effets des impôts et des taxes différents entre les pays ne sont pas pris en compte.
- L'optimisation douanière (perfectionnement passif et actif) et la gestion des différents régimes douaniers ne sont pas prises en compte.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les concepts de référence de la gestion de chaînes logistiques. Nous avons vu l'évolution de l'activité logistique et l'importance nouvelle qui la caractérise depuis le début de la mondialisation. Cette activité est maintenant fortement dépendante des systèmes d'information qui offrent de la visibilité aux informations et accélère la diffusion des décisions. De plus, nous avons décrit le système industriel du constructeur automobile PSA. La complexité de l'organisation a été exposée ; notamment, dans la coordination de ses processus d'approvisionnement, de production et de distribution. Cette coordination est assurée au travers d'une planification hiérarchique où la planification stratégique du réseau logistique est un élément déterminant. La connaissance du système industriel nous a permis de définir les problèmes de la répartition stratégique de la production et de la planification stratégique du réseau logistique de PSA. Les hypothèses inhérentes à cet horizon ont été exposées.

A l'issue de cette étude bibliographique et industrielle, il est clair que le problème de conception de la chaîne logistique est complexe. Son résultat aura un impact majeur sur la pérennité de l'entreprise. Ainsi l'appui d'un système d'aide à la décision apporterait à la fois à la rapidité et à la qualité de cette prise de décision. Dans le cas spécifique du secteur automobile, l'ampleur des investissements impose de prendre des décisions nécessitant beaucoup de capitaux sur un horizon étendu ce qui renforce l'intérêt d'un outil d'aide à la décision. Dans le chapitre suivant, nous travaillons sur l'optimisation de la répartition stratégique qui est un sous-problème du problème de conception de chaîne logistique

Chapitre 2

La répartition stratégique

Le grand clivage en optimisation n'est pas entre la linéarité et la non linéarité mais entre la convexité et la non convexité. *R. T. Rockafellar*

Sommaire

2.1 Introduction 35
2.2 Modèle de connaissance 36
2.2.1 Sous-système physique 36
2.2.2 Sous-système logique 37
2.2.3 Sous système décisionnel 40
2.3 Répartition stratégique sans contraintes de sourcing 47
2.3.1 Formalisation mathématique du modèle de production-distribution 48
2.3.2 Etude de la convexité de la fonction objectif 50
2.3.3 Etat de l'art sur les modèles de production-distribution 51
2.3.4 Borne inférieure 55
2.3.5 Méthodes d'optimisation 57
2.3.6 Expérimentation 64
2.4 Répartition stratégique avec contrainte de sourcing 76
2.4.1 Formalisation mathématique 76
2.4.2 Etude de la convexité de la fonction objectif 78
2.4.3 Etat de l'art du problème avec contraintes de sourcing 79
2.4.4 Borne inférieure 82
2.4.5 Méthodes d'optimisation 84
2.4.6 Expérimentation 87
2.5 Conclusion 98

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le problème de répartition stratégique qui est un sous-problème du problème de conception de réseau logistique [GF07]. Cette répartition à une période donnée est contrainte par les décisions stratégiques prises comme, par exemple, l'ouverture d'un nouveau site ou l'augmentation de la capacité de production d'un site existant. La répartition stratégique du réseau logistique va devoir estimer, à chaque période de l'horizon de planification, la circulation des marchandises des fournisseurs aux clients selon les investissements capacitaires réalisés. Ainsi, en lien avec les décisions stratégiques d'investissement, l'objectif est d'organiser au mieux et de manière anticipée les diverses activités d'approvisionnement, de production et de distribution pour minimiser, dans la suite de la planification hiérarchique, le coût total d'exploitation ou maximiser le bénéfice tiré de la vente de produits aux clients sur un horizon de plusieurs années.

Dans ce qui suit, nous allons définir notre modèle de connaissance pour la répartition stratégique. Ce modèle est directement tiré de la description du système industriel et des hypothèses de modélisation liées à l'horizon stratégique réalisées en Chapitre 1. A partir de ce modèle de connaissance, nous proposons dans un premier temps de résoudre le problème de répartition stratégique sans contrainte de sourcing. Pour ce faire, nous proposons une formalisation mathématique du problème. Cette formalisation sera suivie d'un état de l'art des modèles et des méthodes de résolution trouvés dans la littérature. Ensuite, différentes méthodes de résolution sont proposées et appliquées au problème. Dans un second temps, nous présenterons le problème avec contraintes de sourcing au travers d'une formulation mathématique. Ensuite, un état de l'art des modèles et des méthodes de résolution de la littérature seront exposés. Enfin, des méthodes de résolution seront proposées et appliquées au problème.

2.2 Modèle de connaissance

« Le modèle de connaissance est une formalisation dans un langage naturel ou graphique de la structure et du fonctionnement du système. Ce modèle doit contenir, entre autres, les informations pertinentes pour décrire les problèmes posés. Il doit mettre en évidence de manière claire l'ensemble des problèmes induits par les systèmes étudiés. L'obtention du modèle de connaissance d'un système complexe est un processus qui doit être conduit avec beaucoup de rigueur. Il faut, d'une part, conduire une analyse structurelle et fonctionnelle du système et, d'autre part, spécifier les activités et donc les flux qui traversent ce système, et les règles de fonctionnement qui gèrent ces flux. Pour conduire cette analyse, une décomposition en trois sous-systèmes complémentaires et communicants est préconisée »[GK01].

2.2.1 Sous-système physique

« Le sous-système physique comprend les entités physiques qui composent le système étudié. Il permet de décrire la topologie des unités de production, de stockage, les caractéristiques techniques des moyens de production ainsi que les liens physiques et logiques entre ces moyens »[GK01].

Nous étudions une chaîne logistique constituée de zones reliées entre elles par des routes.

On distingue trois types de zones :

- Les **zones d'approvisionnement** qui sont les zones considérées pour acheter des familles de pièces. Elles sont désignées par leur *nom*.
- Les **zones de production** qui sont les zones considérées pour réaliser la production des familles de véhicules. Chaque zone de production est désignée par son *nom*. Un *nombre de jours ouvrés* annuel (en jours, strictement supérieur à 0) est défini par zone de production.
- Les **zones de commercialisation** qui sont les zones considérées pour la vente des familles de véhicules. Elles sont définies par leur *nom*.

Entre une zone d'approvisionnement et une zone de production, une **route d'approvisionnement** peut exister : cela traduit une possibilité de transport de la zone d'approvisionnement vers la zone de production. Ainsi cette route dispose d'un *prix de transport* par unité transportée (en m^3) et d'un *délai d'approvisionnement* (en h). De plus, une route d'approvisionnement impose différents stocks de sécurité :

- Un stock de sécurisation du transport déterminé à partir d'un *niveau de stock de sécurisation* (en h) permet de pallier aux aléas de transport à proximité de la zone de production,
- Un stock de fonctionnement avec un *niveau de stock de fonctionnement* (en h) est défini pour pallier aux aléas du transport international.

De plus, un *coefficient de transport d'urgence* est défini pour valoriser le coût des transports d'urgence (i.e. taxi, hélicoptère) parfois nécessaires pour éviter les ruptures d'approvisionnement.

De même, entre une zone de production et une zone de commercialisation une **route de distribution** peut être définie. La route de distribution est caractérisée par un *prix de transport* (en €) au véhicule et un *délai de distribution* (en h).

Des **technologies de production** sont disponibles pour réaliser les activités nécessaires à la production des véhicules. Ces technologies sont caractérisées par leur *nom*.

Une technologie installée sur une zone de production constitue une **ressource de production**. Les ressources ont des *frais fixes* (en €) et des *frais variables* (en €/véhicule ou €/vhl) pour leur utilisation. Elles sont, de plus, caractérisées par une *cadence minimale* (en vhl/h) et une *cadence maximale* (en vhl/h) de fonctionnement et un *temps d'ouverture* quotidien (en h). Les cadences correspondent aux vitesses maximales de production et vont définir la capacité annuelle (minimum et maximum) de production.

2.2.2 Sous-système logique

'Le sous-système logique est composé des gammes et nomenclatures des pièces que peut fabriquer le système étudié ainsi que des règles opératoires. La gamme opératoire est constituée des opérations concernant les pièces en terme de moyen de production et de temps de traitement' [GK01].

Les **familles de pièces** sont des agrégats de pièces caractérisés par un *nom* et un *incoterm* qui déterminera comment se déroulera son transfert de propriété avec le fournisseur (il définira si le coût d'acquisition intègre ou non le transport et ses sécurisations et la douane). Ainsi, nous considérons deux cas (logique booléenne) : le cas d'un achats Ex-Works (cas général) et le cas d'un achat DDP (livraison synchrone où le prix d'achat est égal au prix rendu). De plus, un *volume d'emballage* (en m^3) est défini à partir de l'emballage nécessité par la famille de pièces lors de son transport.

Les **familles de véhicules** sont des agrégats de véhicules caractérisés par un *nom* et un *coefficient de gabarit* (sans unité) pour évaluer un encombrement par rapport à un véhicule de référence.

Pour une famille de véhicules, on peut déterminer des **liens de nomenclature** avec des familles de pièces. Ces liens déterminent des *coefficients de nomenclature* pour définir la quantité (en pc) d'une famille de pièces nécessaire à la réalisation d'un véhicule d'une famille de véhicules.

Une famille de pièces disponible auprès d'une zone d'approvisionnement va constituer une **source d'approvisionnement** à un certain *prix d'acquisition* (en €/pc). Des *approvisionnements minimum* (en pc) et *maximum* (en pc) sont imposés par les contrats types passés avec les fournisseurs.

Le transport d'une famille de pièces sur une route d'approvisionnement peut demander de traverser une **douane d'approvisionnement** et imposer l'application d'un *taux de douane*.

Lors du transport d'une famille de pièces sur une route d'approvisionnement, on utilise un **emballage** pour protéger les marchandises. Cet emballage est caractérisé par un *prix d'emballage* (en €/pc).

Le transport de familles de pièces achetées pour une famille de véhicules et empruntant une route d'approvisionnement est un **flux d'approvisionnement**. Il est caractérisé par une *quantité de flux d'approvisionnement* (en pc) transportée sur la route d'approvisionnement. Comme une famille de pièces peut être montée sur plusieurs familles de véhicules, il est important de dissocier la famille de véhicule à l'origine du besoin d'approvisionnement. Différents coûts sont aussi calculés au niveau des flux d'approvisionnement, tels que :

1. un *coût d'acquisition* (en €) correspondant au transfert de propriété des pièces,
2. un *coût de transport* (en €) correspondant au coût de déplacement des pièces de la zone d'approvisionnement à la zone de production,
3. un *coût d'emballage* (en €) correspondant à l'utilisation de transconteneur pour le transport maritime (protection des pièces, mise en transconteneur...),
4. un *coût de transport d'urgence* (en €) lié aux livraisons en urgence (taxi, hélicoptère) pouvant survenir lors d'un aléa de transport, un incident 'qualité' ou une surconsommation,
5. un *coût de douane* (en €) lors du changement d'union douanière,
6. des *frais de stock de fonctionnement* (en €) correspondant au stock pour pallier aux aléas du transport intercontinental,
7. des *frais d'encours* (en €) correspondant à l'immobilisation dû au temps de transport,

8. des *frais de stock de sécurisation* (en €) pour pallier aux aléas du transport de proximité,

Ces différents coûts permettront de définir le *coût rendu* (en €).

La **production** des familles de véhicules est réalisée sur une zone de production. Cette production est caractérisée par une *quantité de production* (en vhl) et par différents indicateurs économiques comme les *frais généraux* (en €/vhl), la *masse achat* (en €/vhl), le *complément logistique* (en €/vhl) et la *valeur ajoutée* (en €/vhl) de cette production. Ces coûts permettront de définir un *prix de revient de fabrication* (en €/vhl). Après affectation d'un *coefficient de cession* (par exemple, la marge commerciale), on obtiendra le *prix de cession* (en €/vhl) pour une famille de véhicules et pour une zone de production.

Chaque production d'une famille de véhicules nécessite un certain nombre d'**activités de production**, chacune d'une certaine technologie. Ces activités sont caractérisées par un *coefficient de charge* de travail (sans unité) par rapport à la charge imposée par un véhicule de référence.

Le transport d'une famille de véhicules sur une route de distribution peut entraîner le passage en **douane de distribution** et l'application d'un *taux de douane*.

Le transport d'une famille de véhicules sur une route de distribution définit un **flux de distribution**. Un flux de distribution est caractérisé par une *quantité de flux de distribution* (en vhl). Chaque flux a un *prix de flux de distribution* (en €/vhl) et un *coefficient de flux de distribution*. Différents coûts sont évalués sur un flux de distribution comme le *coût de cession* (en €), le *coût de transport* (en €), le *coût de douane* (en €) et les *frais d'encours* (en €). Cela permettra de définir *un coût rendu de distribution* (en €).

Des *prévisions de vente* (en vhl) sont connues pour des **distributions** c'est-à-dire pour une zone de commercialisation donnée et une famille de véhicules donnée.

Les classes étudiées et leurs relations sont synthétisées en figure 2.1.

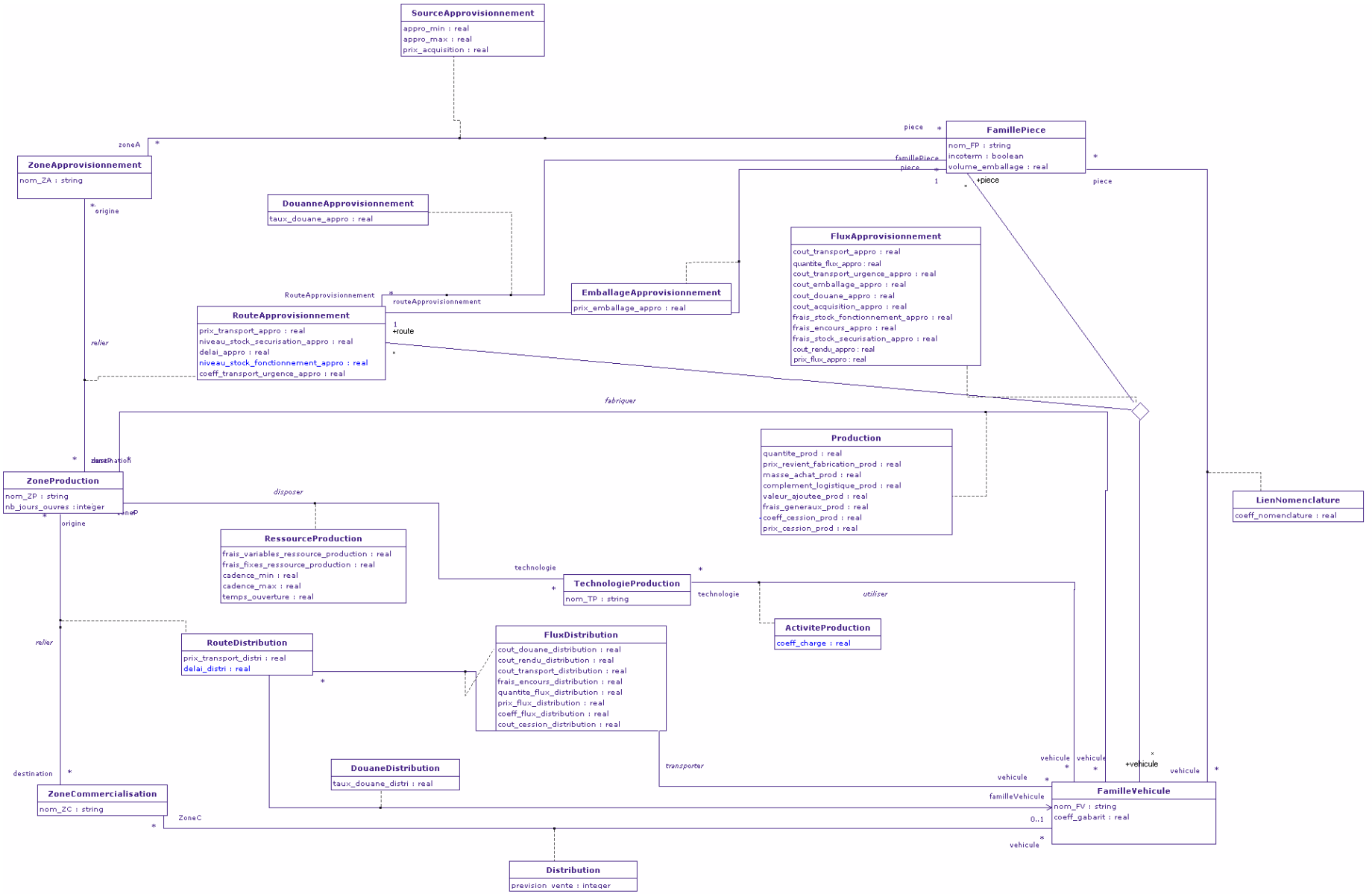


Figure 2.1 – Diagramme de classes du modèle de connaissance

2.2.3 Sous système décisionnel

'Le sous-système décisionnel permet de spécifier l'ensemble des règles de fonctionnement du système. Il est formé d'un ensemble de règles de gestion qui agissent sur les sous-systèmes logique et physique' [GK01].

Nous utiliserons les notations suivantes pour le reste du document :

Description des ensembles	Ensemble	Indice
Ensemble des zones de commercialisation	ZC	v
Ensemble des zones de production	ZP	u
Ensemble des zones d'approvisionnement	ZA	s
Ensemble des familles de véhicules	FV	i
Ensemble des technologies de production	TP	t
Ensemble des routes de distribution	RD	k
Ensemble des routes d'approvisionnement	RA	j
Ensemble des familles de pièces	FP	p

Les éléments qui se rapportent à la chaîne logistique ne sont pas décrits dans le diagramme UML précédent. Ces éléments sont les suivants :

- $Taux_possession_stock$: taux de possession de stock qui valorise les frais financiers des différents stocks.
- $Cout_total_exploitation$: ensemble des coûts rendus des flux de distribution, ce qui intègre l'ensemble des coûts de production et d'approvisionnement, sur toute la chaîne logistique étudiée.

Remarque Afin de simplifier les notations, nous avons choisi la convention suivante : un attribut sera représenté par le nom de l'attribut indicé par le ou les objet(s) s'y rapportant. Par exemple, $quantite_prod_{i,u}$ désigne l'attribut $quantite_prod$ de l'instance de la classe Production, classe d'association entre la zone de production u et la famille de véhicules i. De même, $origine(j)$ désigne la zone d'approvisionnement ayant le rôle 'origine' pour l'instance j de la classe route d'approvisionnement.

L'ensemble des décisions sont synthétisées dans un plan de montage stratégique. Ce plan de montage indique les productions, c'est-à-dire les quantités de familles de véhicules produites sur les zones de production. A partir de ce plan de montage, l'ensemble de la chaîne logistique est synchronisée grâce au lien entre la production de familles de véhicules, les flux de familles de pièces approvisionnées des zones d'approvisionnement aux zones de production et les flux de familles de véhicules distribuées des zones de production aux zones de commercialisation.

La réalisation d'un plan de montage donne des valeurs aux attributs suivants :

- $quantite_prod_{i,u}$: quantité (en vhl) de la famille de véhicules i produite sur la zone de production u.
- $quantite_flux_appro_{i,j,p}$: quantité (en pc) de la famille de pièces p transportée sur la route d'approvisionnement j pour assembler des véhicules de la famille de véhicules i.
- $quantite_flux_distri_{i,k}$: quantité (en vhl) de la famille de véhicules i transportée sur la route de distribution k.

Les contraintes suivantes sont nécessaires à la bonne gestion de la chaîne logistique :

Existence des flux d'approvisionnement La $quantite_flux_appro_{i,j,p}$ est égale à 0 si la zone d'approvisionnement à l'origine de j ne peut pas approvisionner la famille de pièces p ou si la zone de production à destination de la route j ne dispose pas de toutes les technologies nécessaires à la production de la famille de véhicules i.

Existence des flux de distribution La $quantite_flux_distri_{i,k}$ est égale à 0 si la zone de production à l'origine de la route k ne dispose pas de toutes les technologies nécessaires à la production de la famille de véhicules i ou si la zone de commercialisation à destination de la route k ne demande pas de distribution de la famille de véhicules i.

Satisfaction de la demande commerciale Les flux de distribution doivent répondre exactement aux prévisions de ventes des quantités de familles de véhicules i au niveau des zones de commercialisation v.

$$\sum_{k \in RD/destination(k)=v} quantite_flux_distri_{i,k} = prevision_vente_{i,v}, \forall i \in FV, v \in ZC \tag{2.1}$$

Conservation des flux au niveau des zones de production Pour respecter le lien de nomenclature entre les familles de véhicules i et les familles de pièces p, on utilise les coefficients de nomenclature au niveau des zones de production, il existe une contrainte d'équilibre entre les flux d'approvisionnement et les flux de distribution :

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in RD/origine(k)=u} quantite_flux_distri_{i,k}.coeff_nomenclature_{i,p} \\ &= quantite_prod_{i,u}.coeff_nomenclature_{i,p} \\ &= \sum_{j \in RA/destination(j)=u} quantite_flux_appro_{i,j,p}, \forall i \in FV, p \in FP, u \in ZP \end{aligned} \tag{2.2}$$

Respect des capacités industrielles La production sur les zones de production est limitée par les capacités industrielles des ressources de production pour une zone de production et une technologie. Pour une technologie donnée et sur une zone de production, la charge totale de travail est la somme, pour toutes les familles de véhicules produites sur la zone de production, de la quantité produite, corrigée par le coefficient de charge de la technologie de production t pour la famille de véhicules i. Cette charge totale doit respecter la capacité minimale et la capacité maximale de la ressource de production de la zone de production ayant la technologie considérée calculées à partir des cadences de production, des temps d'ouverture des ressources de production et du nombre de jours ouvrés sur les zones de production.

$$\begin{aligned} &cadence_min_{t,u}.temps_ouverture_{t,u}.nombre_jours_ouvres_u \leqslant \\ &\sum_{i \in FV} quantite_prod_{i,u}.coeff_charge_{i,t}, \ \forall t \in TP, u \in ZP \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in FV} quantite_prod_{i,u}.coeff_charge_{i,t} \leqslant \\ &cadence_max_{t,u}.temps_ouverture_{t,u}.nombre_jours_ouvres_u, \\ &\forall t \in TP, u \in ZP \end{aligned} \tag{2.4}$$

Ces contraintes peuvent être simplifiées avec l'introduction de données factorisées de capacités minimum et maximum de production :

$$\begin{aligned} &capacite_min_{t,u} = cadence_min_{t,u}.temps_ouverture_{t,u}.nombre_jours_ouvres_u \\ &\forall t \in TP, u \in ZP \\ &capacite_max_{t,u} = cadence_max_{t,u}.temps_ouverture_{t,u}.nombre_jours_ouvres_u \\ &\forall t \in TP, u \in ZP \end{aligned} \tag{2.5}$$

Respect des capacités d'approvisionnement L'approvisionnement sur les zones d'approvisionnement est limité par les capacités des fournisseurs. Pour une pièce donnée et sur une zone d'approvisionnement donnée, la quantité approvisionnée est bornée par une capacité d'approvisionnement minimum (correspondant aux minima contractuels) et par une capacité d'approvisionnement maximum (correspondant aux limites technologiques de production).

$$appro_min_{p,s} \leqslant \sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{i,j,p}, \forall p \in FP, s \in ZA \tag{2.6}$$

$$appro_max_{p,s} \geqslant \sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{i,j,p}, \forall p \in FP, s \in ZA \tag{2.7}$$

2.2.3.1 Evaluation économique de la Chaîne Logistique

L'évaluation de la chaîne logistique demande de calculer tous les coûts liés à l'approvisionnement, à la production et à la distribution.Le flux matériel circulant des fournisseurs aux clients voit sa valeur augmenter au fur et à mesure des opérations réalisées. Les coûts sont maintenant détaillés en trois sections correspondant aux coûts d'approvisionnement, de production et de distribution.

2.2.3.1.1 Evaluation des coûts d'approvisionnement Pour un flux d'approvisionnement, les coûts suivants sont évalués :

- Coût d'acquisition
- Coût de transport d'urgence
- Coût de transport d'approvisionnement
- Coût d'emballage
- Coût de douane d'approvisionnement
- Frais de sécurisation
- Frais de stock de fonctionnement
- Frais d'encours d'approvisionnement
- Coût rendu d'approvisionnement

Coût d'acquisition Le coût d'acquisition correspond au prix pour devenir propriétaire des familles de pièces p sur le flux d'approvisionnement utilisant la route d'approvisionnement j à destination de l'assemblage de la famille de véhicules i. Le coût d'acquisition d'un flux est le produit du prix d'acquisition (en €/pc) de chaque famille de pièces p à la zone d'approvisionnement à l'origine de la route d'approvisionnement j par la quantité (en m^3) de famille de pièces constituant le flux.

$$\begin{aligned} cout_acquisition_appro_{i,j,p} &= prix_acquisition_{p,origine(j)}.quantite_flux_appro_{i,j,p}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.8}$$

Coût de transport d'urgence Un coefficient de transport d'urgence est calculé à partir d'un retour d'expérience et caractérise les routes en fonction du pays d'origine et de destination. Ce coefficient est à appliquer au coût d'acquisition du flux d'approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_transport_urgence_appro_{i,j,p} = \\ &coeff_transport_urgence_j.cout_acquisition_{i,j,p}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.9}$$

Le coût de transport d'urgence est un surcoût de transport uniquement. Il n'est ni compté dans le coût de douane, ni valorisé dans les stocks.

Coût de transport d'approvisionnement Le coût de transport d'un flux d'approvisionnement est le produit du prix unitaire de transport du flux (€/m^3) par la quantité de famille de pièces (pc) circulant sur le flux multiplié par le volume de son emballage (m^3/pc).

$$\begin{aligned} &cout_transport_appro_{i,j,p} = \\ &volume_emballage_p.prix_transport_appro_j.quantite_flux_appro_{i,j,p}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.10}$$

Coût d'emballage Le coût d'emballage d'un flux d'approvisionnement est le produit du prix d'emballage unitaire d'une famille de pièces (€/pc) sur une route d'approvisionnement multiplié par la quantité transportée (pc) sur le flux d'approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_emballage_appro_{i,j,p} = prix_emballage_appro_{j,p}.quantite_flux_appro_{i,j,p}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.11}$$

Coût de douane d'approvisionnement Le coût de douane d'un flux d'approvisionnement est calculé à partir de la valeur en douane de la famille de pièces formant le flux sur laquelle est appliqué le taux de douane. Cette valeur en douane est définie comme la somme du coût d'acquisition, du coût de transport du flux d'approvisionnement et du coût d'emballage approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_douane_appro_{i,j,p} = \\ &taux_douane_appro_{j,p}.(cout_acquisition_{i,j,p} + \\ &cout_transport_appro_{i,j,p} + cout_emballage_appro_{i,j,p}), \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.12}$$

Frais de stock de sécurisation approvisionnement Les frais de sécurisation correspondent aux frais financiers du stock de sécurisation vis-à-vis des aléas de transport sur une route d'approvisionnement donnée (avec un niveau de stock de sécurisation donné) des flux d'approvisionnement. Ces frais correspondent à la valeur du stock de pièces (valorisée au prix d'achat) multipliée par un taux de possession de stock.

$$\begin{aligned} &frais_stock_securisation_appro_{i,j,p} = \\ &\frac{niveau_stock_securisation_appro_j.quantite_flux_appro_{i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.13}$$

Frais de stock de fonctionnement Les frais de stock de fonctionnement d'un flux d'approvisionnement sont les frais financiers liés aux niveaux de stock de fonctionnement nécessaires pour la sécurisation des transports trans-continentaux entre des zones d'approvisionnement et des zones de production très éloignées.

$$\begin{aligned} &frais_stock_fonctionnement_appro_{i,j,p} = \\ &\frac{niveau_stock_fonctionnement_appro_j.quantite_flux_appro_{i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}, \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{2.14}$$

Frais d'encours d'approvisionnement Les frais des encours de transport entre les zones d'approvisionnement et les zones de production sont les frais financiers liés aux valeurs des familles de pièces constamment immobilisées dans l'encours de transport du flux d'approvisionnement. Cela est calculé à partir du délai de transport d'approvisionnement et du nombre de jours ouvrés de la zone de production.

$$\begin{array}{l} frais_encours_appro_{i,j,p} = \\ \frac{delai_appro_j.quantite_flux_appro_{i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}, \\ \forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{array} \tag{2.15}$$

Coût rendu d'approvisionnement Le coût rendu d'approvisionnement correspond au coût des pièces d'une famille de pièces arrivées à destination d'un flux d'approvisionnement.

$$\begin{array}{l} cout_rendu_appro_{i,j,p} = cout_acquisition_{i,j,p} + cout_transport_urgence_appro_{i,j,p} \\ +cout_transport_appro_{i,j,p} + cout_emballage_appro_{i,j,p} + cout_douane_appro_{i,j,p} \\ +frais_stock_securisation_appro_{i,j,p} + frais_stock_fonctionnement_appro_{i,j,p} \\ +frais_encours_appro_{i,j,p}, \\ \forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{array} \tag{2.16}$$

Cette expression peut être simplifiée en définissant un prix de flux d'approvisionnement :

$$\begin{array}{l} prix_flux_appro_{j,p} = prix_transport_appro_j.volume_emballage_p.(1 + taux_douane_appro_{j,p}) \\ +prix_emballage_appro_{j,p} \\ +prix_acquisition_{p,origine_j}.(1 + taux_douane_appro_{j,p} + coeff_transport_urgence_j \\ +taux_possession_stock.\frac{niveau_stock_securisation_appro_j + niveau_stock_fonctionnement_appro_j + delai_appro_j}{nombre_jours_ouvres_{destination(j)}}), \\ \forall j \in RA, p \in FP \end{array} \tag{2.17}$$

Nous avons alors :

$$\begin{array}{l} cout_rendu_appro_{i,j,p} = prix_flux_appro_{j,p}.quantite_flux_appro_{i,j,p} \\ \forall i \in FV, j \in RA, p \in FP \end{array} \tag{2.18}$$

2.2.3.1.2 Evaluation des coûts de production La production d'une famille de véhicules sur une zone de production définit différents coûts :

- Masse achat
- Complément logistique
- Valeur ajoutée
- Part des frais fixes
- Prix de revient de fabrication

Masse achat La masse achat est la valeur moyenne d'achat des familles de pièces composant un véhicule d'une famille de véhicules. Elle correspond à la moyenne des coûts d'acquisition réalisés pour une famille de véhicules et une zone de production. Cela intègre aussi les coûts de douane.

$$\begin{array}{l} masse_achat_{i,u} = \\ \begin{cases} \frac{\sum_{j \in RA/destination(j)=u} \left(\sum_{p \in FP/coeff_nomenclature_{i,p}>0} (cout_acquisistion_{i,j,p} + cout_douane_appro_{i,j,p}) \right)}{quantite_prod_{i,u}} \\ \text{si } quantite_prod_{i,u} > 0 \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases} \\ \forall i \in FV, u \in ZP \end{array} \tag{2.19}$$

Complément logistique Le complément logistique est la valorisation par véhicule des différents coûts de la logistique d'approvisionnement des familles de pièces entrant dans l'assemblage d'une famille de véhicules. Ces coûts logistiques prennent en compte, pour tous les flux de familles de pièces pour une famille de véhicules d'une zone de production, le coût de transport, le coût de transport d'urgence, le coût d'emballage, les frais de stock de fonctionnement, les frais de stock de sécurisation, les frais d'encours divisés par la quantité de cette famille de véhicules sur cette zone de production.

$$\begin{array}{l} complement_logistique_{i,u} = \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{quantite_prod_{i,u}}. \\ \sum\limits_{j \in RA/destination(j)=u} (\sum\limits_{p \in FP/coeff_nomenclature_{i,p}>0} (cout_transport_appro_{i,j,p} \\ +cout_transport_urgence_appro_{i,j,p} + cout_emballage_appro_{i,j,p} \\ +frais_stock_fonctionnement_appro_{i,j,p} + frais_stock_securisation_appro_{i,j,p} \\ +frais_encours_appro_{i,j,p})) \\ \text{si } quantite_prod_{i,u} > 0 \\ 0 \text{ sinon.} \end{array} \right. \\ \forall i \in FV, u \in ZP \end{array} \tag{2.20}$$

Part frais fixes de production La part des frais fixes de production d'un véhicule produit sur une zone de production correspond aux frais fixes des ressources de production installées sur les zones de production dont les technologies interviennent dans la production de la famille de véhicules et répartis sur les quantités produites de toutes les familles de véhicules

$$\begin{array}{l} part_frais_fixes_{i,u} = \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum\limits_{t \in TP/coeff_charge_{i,t}>0} \frac{frais_fixes_{t,u}}{\sum\limits_{i' \in FV/coeff_charge_{i',t}>0} quantite_prod_{i',u}} \\ \text{si } \sum\limits_{i' \in FV/coeff_charge_{i',t}>0} quantite_prod_{i',u} > 0 \\ 0 \text{ sinon.} \end{array} \right. \\ \forall i \in FV, u \in ZP \end{array} \tag{2.21}$$

Valeur ajoutée La valeur ajoutée d'un véhicule correspond à la somme, pour toutes les technologies nécessaires à la famille de véhicules, des frais variables de production corrigés par le coefficient de charge.

$$\begin{array}{l} valeur_ajoutee_{i,u} = \sum\limits_{t \in TP/coeff_charge_{i,t}>0} coeff_charge_{i,t}.frais_variables_{t,u}, \\ \forall i \in FV, u \in ZP \end{array} \tag{2.22}$$

Prix de revient de fabrication Le prix de revient de fabrication correspond à la somme des coûts de production pour une unité d'une famille de véhicules sur une zone de production.

$$\begin{array}{l} prix_revient_fabrication_{i,u} = \\ masse_achat_{i,u} + complement_logistique_{i,u} + part_frais_fixes_{i,u} + valeur_ajoutee_{i,u}, \\ \forall i \in FV, u \in ZP \end{array} \tag{2.23}$$

Prix de cession Le prix de cession est la valeur d'un véhicule en sortie de zone de production. Il est calculé à partir du prix de revient de fabrication, éventuellement corrigé par un coefficient de cession.

$$prix_cession_{i,u} = prix_revient_fabrication_{i,u}.coeff_cession_{i,u}, \quad \forall i \in FV, u \in ZP \tag{2.24}$$

2.2.3.1.3 Evaluation des coûts de distribution Pour un flux de distribution, les coûts suivants sont évalués :

- Coût de cession
- Coût de transport de distribution
- Coût de douane de distribution
- Frais d'encours de distribution
- Coût rendu de distribution

Les coûts pour chaque flux de distribution sont détaillés ci-après :

Coût de cession Le coût de cession pour un flux de distribution est la valorisation de la valeur de la famille de véhicules transportée. Le coût de cession du flux est calculé en multipliant le prix de cession de la famille de véhicules sur la zone de production d'origine du flux par la quantité (en vhl) de la famille de véhicules constituant le flux de distribution.

$$cout_cession_{i,k} = prix_cession_{i,origine(k)}.quantite_flux_distri_{i,k}, \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.25}$$

Coût de transport de distribution Le coût de transport d'un flux de distribution est le prix unitaire de transport sur la route de distribution corrigé par le coefficient de gabarit et multiplié par la quantité de véhicules formant le flux.

$$cout_transport_distri_{i,k} = prix_transport_distri_k.coeff_gabarit_i.quantite_flux_distri_{i,k}, \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.26}$$

Coût de douane de distribution Le coût de douane d'un flux de distribution est calculé à partir de la valeur en douane de la famille de véhicules formant le flux de distribution sur laquelle est appliqué le taux de douane de distribution. Cette valeur en douane est définie comme la somme du coût cession et du coût de transport distribution.

$$cout_douane_distri_{i,k} = taux_douane_distri_{i,k}.(cout_cession_{i,k} + cout_transport_distri_{i,k}), \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.27}$$

Frais d'encours de distribution Ce sont les frais financiers liés à l'encours d'un flux de distribution. Cela est calculé à partir du délai de distribution, du nombre jours ouvrés de la zone de production expéditrice, du prix de cession des véhicules et du taux de possession de stock.

$$frais_encours_distri_{i,k} = \frac{delai_distri_k.quantite_flux_distri_{i,k}.prix_cession_{i,origine(k)}.taux_possession_stock}{nombre_jours_ouvres_{origine(k)}}, \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.28}$$

Coût rendu de distribution Le coût rendu d'un flux de distribution est la somme des coûts de distribution.

$$cout_rendu_distri_{i,k} = cout_cession_{i,k} + cout_transport_distri_{i,k} + cout_douane_distri_{i,k} + frais_encours_distri_{i,k} \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.29}$$

Cette expression peut être simplifiée en calculant un coefficient de flux de distribution (pour la partie dépendante du prix de cession) et un prix de flux de distribution (pour la partie indépendante du prix de cession) :

$$prix_flux_distri_{i,k} = prix_transport_distri_k.coeff_gabarit_i.(1 + taux_douane_distri_{i,k}) \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.30}$$

$$coeff_flux_distri_{i,k} = 1 + taux_douane_distri_{i,k} + \frac{delai_distri_k.taux_possession_stock}{nombre_jours_ouvres_{origine(k)}} \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.31}$$

Ce qui donne :

$$cout_rendu_distri_{i,k} = quantite_flux_distri_{i,k}.(coeff_flux_distri_{i,k}.prix_cession_{i,origine(k)} + prix_flux_distri_{i,k}) \quad \forall i \in FV, k \in RD \tag{2.32}$$

2.2.3.1.4 Coût de la chaîne logistique Au niveau de la chaîne logistique, le coût total d'exploitation totalise l'ensemble des coûts de distribution de la chaîne logistique :

$$cout_total_exploitation = \sum_{i \in FV} \sum_{k \in RD} cout_rendu_distri_{i,k} \tag{2.33}$$

Nous proposons un diagramme d'arbre des coûts (figure 2.2) qui synthétise l'obtention du coût total de la chaîne logistique étudiée.

Par la suite, nous présentons des modèles dans une démarche en deux temps : nous étudions d'abord un modèle d'action adressant le problème de répartition stratégique uniquement au niveau de la production et de la distribution, puis nous l'étendrons dans un modèle d'action intégrant l'approvisionnement, la production et la distribution.

2.3 Répartition stratégique sans contraintes de sourcing

En prenant l'hypothèse qu'il n'y a pas de contraintes de capacité au niveau du sourcing, nous proposons de réaliser la répartition stratégique dans la chaîne logistique adressant uniquement la partie 'production' et la partie 'distribution'. Ainsi, si on considère les capacités d'approvisionnement illimitées, on peut connaître a priori les coûts d'approvisionnement pour chaque production d'une famille de véhicules sur une zone de production en calculant, pour chaque famille de pièces entrant dans sa nomenclature, l'approvisionnement le moins cher.

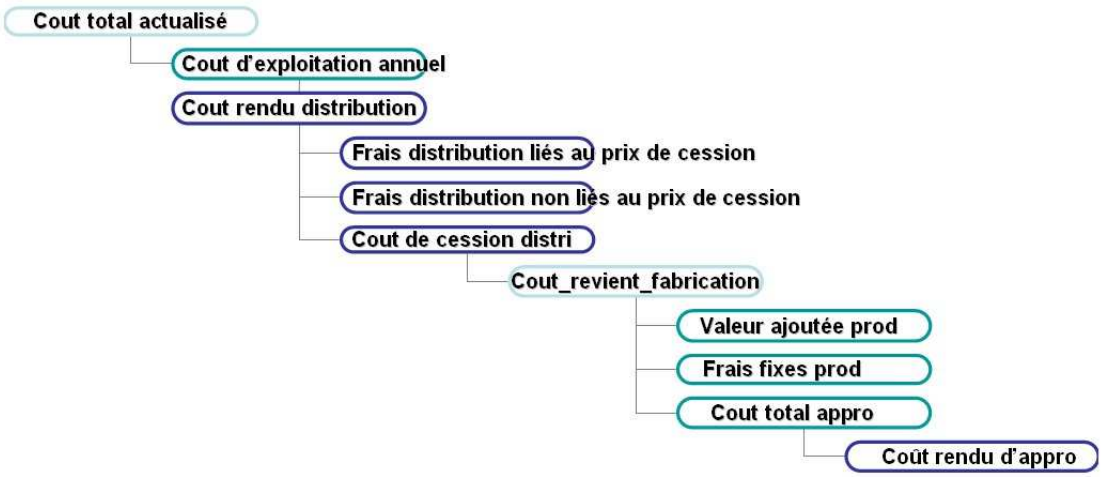


Figure 2.2 – Synthèse des coûts de la répartition stratégique

$$total_appro_min_{i,u} = \sum_{p \in FP/coeff_nomenclature_{i,p}>0} \frac{min}{j \in RA/destination(j)=u} (prix_flux_appro_{j,p}) \quad \forall i \in FV, u \in ZP \tag{2.34}$$

Par la suite, nous proposons une formalisation mathématique du problème. Puis, nous présentons une revue de littérature de ce problème. Enfin nous proposons des méthodes de résolution qui seront mises en œuvre.

2.3.1 Formalisation mathématique du modèle de production-distribution

Par la suite, nous décrivons les données, les variables, les contraintes et la fonction objectif du problème de production-distribution.

2.3.1.1 Données

Les données correspondant à la production sont les suivantes :

FV	Nombre de familles de véhicules,
ZP	Nombre de zones de production,
TP	Nombre de technologies de production,
e_{it}	$e_{it} = 1$ si le véhicule de type i $(i = 1, FV)$ a besoin de la technologie de production t $(t = 1, TP)$, 0 sinon,
$ff_{t,u}$	Frais fixes de la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$fv_{t,u}$	Frais variable pour la production d'un véhicule standard utilisant la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$cap_{t,u}^{min}$	Nombre minimum de véhicules standards à produire avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$cap_{t,u}^{max}$	Nombre maximum de véhicules standards pouvant être produits avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$tam_{i,u}$	Coût total de l'approvisionnement pour la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ produite sur la zone de production u $(u = 1, ZP)$
$xc_{i,t}$	Coefficient entre le nombre de véhicules de la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ produit avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ et un véhicule standard,
$xcs_{i,u}$	Coefficient de cession de la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ produite sur u $(u = 1, ZP)$.

Les données correspondant aux activités de distribution sont les suivantes :

ZC	nombre de zones de commercialisation,
RD	nombre de routes de distribution,
$c_{k,u}$	$c_{k,u} = 1$ si la route de distribution k $(k = 1, RD)$ a pour origine u $(u = 1, ZP)$, 0 sinon,
$d_{k,v}$	$d_{k,v} = 1$ si la route de distribution k $(k = 1, RD)$ a pour destination v $(v = 1, ZC)$,0 sinon,
$pv_{i,v}$	prévision de ventes pour la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ sur la zone de commercialisation v $(v = 1, ZC)$,
$pfd_{i,k}$	Prix unitaire de distribution (indépendant du prix de cession) pour la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ transportée sur la route de distribution k $(k = 1, RD)$,
$xfd_{i,k}$	Coefficient de distribution pour la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ transportée sur la route de distribution k $(k = 1, RD)$,

2.3.1.2 Variables

Il s'agit de déterminer $Y_{i,k}$ $(i = 1, FV; k = 1, RD)$, la quantité de familles de véhicules i transportée sur la route de distribution k.

2.3.1.3 Contraintes

Les contraintes suivantes doivent être satisfaites :

1. Les prévisions de vente doivent être satisfaites exactement pour toutes les familles de véhicules sur toutes les zones de commercialisation :

$$\sum_{k=1}^{RD} d_{k,v}.Y_{i,k} = pv_{i,v}, \forall i = 1, FV, \forall v = 1, ZC \tag{2.35}$$

2. Les minimum et maximum de capacités de production pour toutes les technologies de production sur toutes les zones de production doivent être respectées :

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.(\sum_{i=1}^{FV} Y_{i,k}.xc_{i,t}) \geqslant cap_{t,u}^{min}, \forall t = 1, TP, \forall u = 1, ZP \tag{2.36}$$

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.(\sum_{i=1}^{FV} Y_{i,k}.xc_{i,t}) \leqslant cap_{t,u}^{max}, \forall t = 1, TP, \forall u = 1, ZP \tag{2.37}$$

3. Non-négativité des variables :

$$Y_{i,k} \geqslant 0, \forall i = 1, FV, \forall k = 1, RD \tag{2.38}$$

2.3.1.4 Fonction objectif

L'objectif est de minimiser le coût d'exploitation sur la chaîne logistique.

$$Minimiser f(Y) = \sum_{i=1}^{FV}\sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}.(pfd_{i,k} + xfd_{i,k}.\sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}.pc_{i,u}) \tag{2.39}$$

avec le prix de cession $pc_{i,u}$ tel que :

$$pc_{i,u} = xcs_{iu}.\Bigg(tam_{iu} + \sum_{t=1}^{TP} e_{i,t}.\Bigg(\frac{ff_{t,u}}{\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.\sum_{k'=1}^{RD} c_{k'u}.Y_{i'k'} + \delta_0\left(\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i',k'}\right)} + xc_{i,t}.fv_{t,u}\Bigg)\Bigg) \tag{2.40}$$

2.3.2 Etude de la convexité de la fonction objectif

Pour rappel, une fonction $f : E \mapsto \Re \cup \infty$ est dite convexe lorsque, pour tous x_1 et x_2 de E et λ dans [0,1] on a : $f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2)$

A partir de la définition mathématique d'une fonction convexe, nous donnons un contre-exemple prouvant la non-convexité du problème de répartition de production avec des douanes et des économies d'échelles de la fonction objectif 2.39.

Considérons un réseau constitué de deux zones de production ZP1 et ZP2 et de deux zones de commercialisation ZC1 et ZC2. Nous considérons des frais fixes égaux à 100 sur les deux zones de production et des taux de douane de 50% sur les routes (ZP1, ZC2) et (ZP2,ZC1). Nous négligeons tous les autres paramètres de coûts tels que les frais variables de production ou les prix de transport. En outre, nous ne considérons qu'un seul type de véhicules dont la demande est respectivement de 34 véhicules sur la ZC1 et de 20 véhicules sur la ZC2.

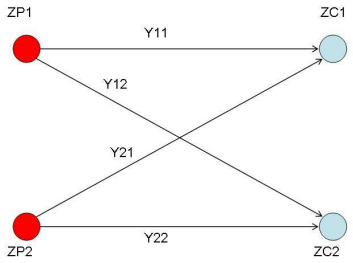


Figure 2.3 – Schéma du réseau simplifié

Nous instancions la fonction objectif avec les paramètres suivants :
$card(ZP) = 2$

$card(ZC) = 2$
$card(FV) = 1$
$card(RD) = 4$
$card(TP) = 1$
$pfd_{i,k} = 0\ \forall i \in FV, k \in RD$
$xcs_{i,u} = 1\ \forall i \in FV, u \in ZP$
$tam_{i,u} = 0\ \forall i \in FV, u \in ZP$
$ff_{t,u} = 100\ \forall t \in TP, u \in ZP$
$fv_{t,u} = 0\ \forall t \in TP, u \in ZP$
Les coefficient de distribution sont égaux à 1.5 pour les routes (ZP1, ZC2) et (ZP2,ZC1) :

	origine(k)	destination(k)	$xfd_(1,k)$
k=1	ZP1	ZC1	1
k=2	ZP1	ZC2	1,5
k=3	ZP2	ZC1	1,5
k=4	ZP2	ZC2	1

Nous construisons des solutions (cf.figure 2.3) $\mathbf{Y} = (Y_{1,1}, y_{1,2}, Y_{2,1}, Y_{2,2})^t$.
Le coût total est :
$f(\mathbf{Y}) = \frac{100}{(Y_{1,1}+Y_{1,2})} * (Y_{1,1} + Y_{1,2} * 1,5) + \frac{100}{(Y_{2,1}+Y_{2,2})} * (Y_{2,1} * 1,5 + Y_{2,2})$
Soient les trois solutions $Y1$, $Y2$ et $Y3 = 1/2 * (Y1 + Y2)$:
$\mathbf{Y1} : (4, 0, 30, 20)$
$f(\mathbf{Y1}) = \frac{100}{(4+0)} * (4 + 0) + \frac{100}{(30+20)} * (30 * 1,5 + 20) = 100 + 100/50 * 65 = 230$
$\mathbf{Y2} : (34, 16, 0, 4)$
$f(\mathbf{Y2}) = \frac{100}{(34+16)} * (34 + 16 * 1,5) + \frac{100}{(0+4)} * (0 + 4) = 100/50 * 58 + 100 = 216$
$\mathbf{Y3} = 1/2 * (Y1 + Y2) = (19, 8, 15, 12)$
$f(\mathbf{Y3}) = 1\frac{100}{(19+8)} * (19+8*1,5) + \frac{100}{(15+12)} * (15*1,5+12) = \frac{100}{27} * 31 + \frac{100}{27} * (34,5) = 133+127 = 250$
Par ailleurs, on a $1/2 * (f(\mathbf{Y1}) + f(\mathbf{Y2})) = 223$
On a donc $f((\mathbf{Y1} + \mathbf{Y2})/2) > ((f(\mathbf{Y1}) + f(\mathbf{Y2}))/2$ donc, d'après la définition de la convexité, la fonction est non convexe.

2.3.3 Etat de l'art sur les modèles de production-distribution

Les problèmes de production-distribution sont étudiés depuis très longtemps. Cependant, ils sont souvent modélisés d'une manière simplifiée qui ne reflète pas forcément la complexité industrielle. Néanmoins, ces modèles ont certaines propriétés mathématiques et sont résolus par des méthodes d'optimisation pouvant nous aider à résoudre notre problème. En premier lieu, dans le cas de production-distribution, une analogie forte est à réaliser avec le problème de transport.

2.3.3.1 Le problème de transport

Le problème de répartition d'une demande commerciale sur différents sites de production est un problème classique de la littérature de la Recherche Opérationnelle (RO). Dans sa version la plus simple où un seul produit est géré, où la production est exactement égale à la demande, où toutes les routes de distribution existent et où la fonction objectif est linéaire, ce problème est le *problème de transport* ('transportation problem' en anglais). Par le passé, ce problème a été étudié par Monge, Kantorovitch, Hitchock [Sch02]...

Notons que, si la demande égale la production, le problème est dit 'équilibré'. Dans le cas où le problème est 'déséquilibré', il est possible d'ajouter, respectivement, en cas d'offre inférieure (supérieure) à la demande, une source (un puits) supplémentaire avec une capacité (une demande) égale au montant du déséquilibre.

Ce problème a été très étudié car il est non seulement utilisé en logistique mais aussi dans de nombreux autres domaines où sa formulation offre des procédures efficaces de résolution.

De plus, sa représentation sous la forme d'un tableau a offert la possibilité de réaliser des procédures de résolution intuitives et facilement applicables manuellement (méthode Houthaker, de Vogel, de Russel [JB80], méthode de Balas-Hammer...).

Ajoutons que le problème de transport se généralise en un problème de flots sur un réseau ('network flow problem' , NFP, en anglais) et la méthode du Simplexe sur un réseau ('Network Simplex' en anglais) est applicable.

2.3.3.2 Extensions du problème de transport

Le problème de transport a été étendu pour intégrer des aspects logistiques plus réalistes et pour essayer d'appliquer ses propriétés intéressantes et ses méthodes de résolutions efficaces sur un domaine plus large. [Sha05] propose une revue de littérature du problème de transport et de ses extensions (multi-produits, non-linéaire, multiobjectif...) Nous allons passer en revue les problèmes de transport à coût concave, le problème d'approvisionnement à coût concave et le problèmes de flots sur un réseau à coût concave.

2.3.3.2.1 Problème de transport à coût concave Une extension intéressante du problème de transport avec des économies d'échelle (coûts de transport concaves en fonction de la quantité transportée) est appelé problème de transport à coût concave ('concave cost transportation problem', CCTP, en anglais). Cet aspect est très proche de notre prise en compte des frais fixes de production qui sont ammortis sur le volume de production.

De plus, on démontre que dans le cas du problème de transport à coût concave, la solution est toujours un point extrême du polytope formé par les contraintes linéaires [LMR94]. [Ter07] étudie plus généralement (coûts concaves ou convexes) le problème de transport non-linéaire.

Le problème de transport à coûts concaves se généralise aussi en un problème de flots sur un réseau à coût concave ('concave cost network flow', CCNFP, en anglais). La littérature du CCNFP est donc directement applicable : le lecteur pourra se référer à la revue de la litérature de [GP90]. Notons que les problèmes de flots avec des coûts concaves sont NP-difficiles (dans une modélisation discrète).

Un autre problème étant une sous-classe du CCNFP est le problème de flot sur un réseau à coût concave mais linéaires par partie ('piece wise linear concave cost network flow problem', PWCCNFP, en anglais) [FL06].

Notons qu'une autre variante du CCNFP est le problème de tranport à charge fixe *'fixed charge transportation problem', FCTP, en anglais* qui est à rapprocher du problème de localisation de site ('facility location problem' en anglais) ; autre problème classique de la RO. Dans ce cas, la fonction de coût imposant un investissement en cas d'utilisation d'un site de production est concave et discontinue.

2.3.3.2.2 Problème d'approvisionnement à coûts concaves [CP03] ont travaillé sur une extension du problème de transport avec une capacité de production comprise entre deux bornes (une borne inférieure et une borne supérieure). Ce problème est nommé 'problème d'approvisionnement à coûts concaves' ('concave cost supply problem', CCSP, en anglais). Il est intéressant car il implique une limite inférieure de production (dans le cas du TP). Cela est rarement le cas dans la littérature et cela correspond à notre problème.

2.3.3.2.3 Problème de flots à coût concave avec plusieurs commodités CCMCNFP Le problème de flots avec plusieurs commodités ('Multicommodity Network Flow Problem', MCNFP, en anglais) est l'extension à plusieurs produits du problème de flots sur un réseau. Les différents produits doivent alors partager les capacités limitées des arcs de transport [GCF98]. La structure du problème à plusieurs produits permet de facilement mettre en œuvre des méthodes de décomposition (par exemple, décomposition de Benders...).

Le problème de flots avec plusieurs commodités a lui même été étendu avec des coûts concaves ('Concave Multicommodity Network Flow Problem', CCMCNFP, en anglais) et des coûts concaves

linéaires par partie par [MM04]. Ces derniers démontrent que l'approche Lagrangienne est peu efficace et proposent une heuristique basée sur une technique d'arrondi.

Une différence est notable entre les MCNFP et notre problème : les capacités sont sur les arcs et non au niveau des sites de production.

Il est important de dissocier cette **répartition stratégique** (sans investissement) du plan industriel et commercial (PIC) [VBWJ05]. Le PIC va déterminer, sur une maille plus fine, généralement le mois ou la semaine, et un horizon plus court, le semestre ou le trimestre, les quantités produites et transportées mais aussi les quantités stockées ; ce qui n'est généralement pas pris en compte sur une maille annuelle. Le PIC est un plan tactique et donc postérieur au dimensionnement de la structure logistique et des flux réalisés au niveau stratégique.

2.3.3.2.4 Conclusion sur notre modèle Nous avons présentés les problèmes de la littérature pouvant se rapprocher de notre problème de répartition. Nous voyons que le problème tel que défini à la section 2.2 se différentie du Concave Cost Transportation Problem (CCTP) en traitant plusieurs produits et en ajoutant des contraintes sur les capacités de production. Cependant le problème de répartition stratégique est de la même classe de problèmes non linéaires non convexes à contraintes linéaires. Nous proposons la figure 2.4 qui présente une vue d'ensemble des différents problèmes et de leur classification. Il est important de noter qu'un problème de minimisation sur un polyèdre peut être résolu en temps polynomial si la fonction objectif est convexe [GLS93] (par exemple, avec la méthode du point intérieur). Cependant, en cas de non-convexité, aucun algorithme vraiment efficace n'est disponible.

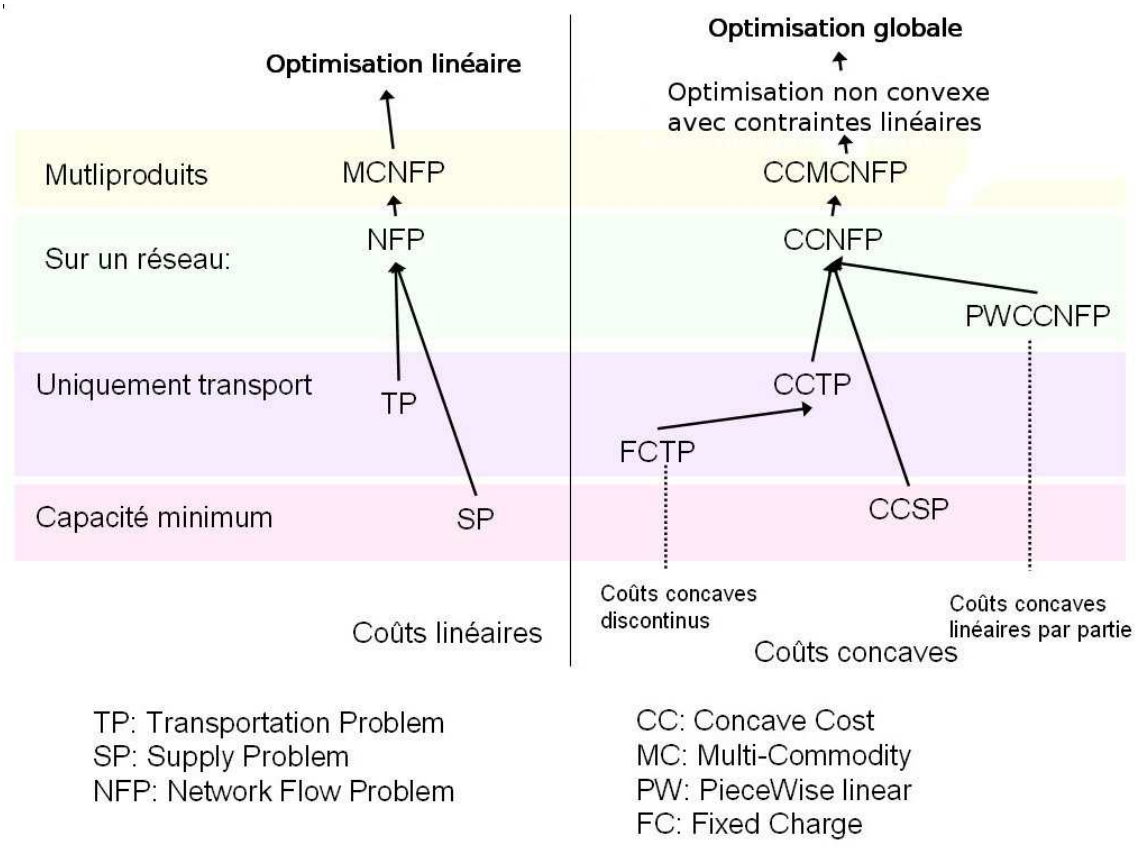


Figure 2.4 – Proposition de classification des problèmes liés au problème de transport

2.3.3.3 Méthodes de résolution

Le problème d'optimisation avec une fonction objectif non convexe étant difficile, de nombreuses méthodes de résolution ont été testées dans la littérature. Nous présentons les méthodes exactes, les heuristiques (notamment basées sur la programmation linéaire) et les métaheuristiques issues à la fois de la littérature du problème de transport et de ses extensions (cf section 2.3.3.1). De plus, nous présentons des méthodes applicables plus généralement au type de problèmes non linéaires non convexes sous contraintes linéaires.

2.3.3.3.1 Méthodes exactes Dans le cas d'un polytope comme domaine des solutions (formé par les contraintes linéaires) et d'une fonction objectif concave, la solution est un point extrême. Murty a proposé une procédure de classement des points extrêmes ('Extreme point ranking' en anglais) [Mur68]. [McK75] a amélioré cette méthode pour le FCTP pour éviter certains problèmes de dégénérescence.

[Cro99] propose un méthode pour les problèmes de flots à coût linéaires par partie (PWCCNFP). La thèse inclut des applications au Supply Chain Management.

[RNP09] propose une méthode exacte pour le PWCCNFP et, au final, résoudre le FCNFP. Cette méthode se base sur une formulation bilinéaire et la procédure 'Adaptive Dynamic Cost Updating' de [NP08] (initialement créée pour le FCTP).

[CN96] propose un code spécifique, basé sur le partitionnement du problème primal, pour le 'non-linear (convex) multicommodity network flows'.

[AGIS03] propose une méthode pour résoudre les problèmes non linéaires avec une fonction objectif différentiable en énumérant les points stationnaires aux sommets, sur les faces et arêtes et à l'intérieur du polyèdre des contraintes. Cela est réalisé grâce à l'énumération des points extrêmes et à une constuction paramétriques à partir de ces derniers des points stationnaires sur les arêtes, les faces et à l'intérieur du polyèdre.

La programmation DC (Difference of Convex function) offre des preuves de convergence théorique en cas d'optimisation sous contraintes linéaires et a été appliquée à des problèmes logistiques [LTPD08].

De nombreuses autres méthodes d'optimisation globales existent mais sont très limitées en tailles de problèmes (quelques dizaines voir quelques centaines de variables). Notons, cependant, qu'une procédure de reformulation dans une forme disposant d'une relaxation convexe a été proposée par [SP97]. Cette relaxation convexe est utilisée dans une procédure de Spatial Branch-and-Bound (par exemple, [PHLDM09] ou [Sah96] et est appliquée à la conception de process industriels).

Pour une certaine classe de problèmes non linéaires (avec une combinaison de termes bilinaires, quadratiques ou polynomiaux), l'algorithme GOP (Global Optimization Algorithm) a été proposé par [VF90]. Il résoud une série de problèmes primaux et duaux relaxés jusqu'à ce que la borne supérieure et la borne inférieure soient suffisamment proches.

2.3.3.3.2 Heuristiques et méthodes approchées à base de programmation linéaire Des heuristiques basées sur les méthodes de la programmation linéaire ont été proposées. On peut ainsi utiliser une séquence de problèmes avec des éléments linéarisés qui seront mis à jour entre deux optimisations : c'est la Programmation Linéaire Sucessive ([ZKL85]). Cette méthode reste heuristique sans forcément faire la preuve de la convergence ni assurer l'optimalité des solutions trouvées.

La méthode dite de Dynamic Slope Scaling Procedure (DSSP) a été proposée par [KP99]. Ces auteurs ont montré que cette méthode était équivalente à une méthode de relaxation Lagrangienne avec un approximation des sous-problèmes. Par ailleurs, c'est l'ancêtre de la 'Dynamic Cost Updating Procedure' présentée précédement dans les méthodes exactes.

De manière plus générale, on peut utiliser directement les méthodes d'optimisation linéaire en linéarisant la fonction objectif : il est possible de linéariser la fonction objectif non linéaire par une approximation linéaire par morceaux [ZW08], cette méthode fait cependant appel à des variables entières pour distinguer les différents morceaux ce qui la rend inapplicable dans le cas de problèmes de taille industrielle [Sol74], [KK82], [Moo89].

Les méthodes d'optimisation convexe (dont fait partie le point intérieur utilisé aussi en programmation linéaire) peuvent être utilisées heuristiquement pour trouver des solutions localement optimales mais ne peuvent valider l'obtention d'un minimum global. Notons que la solution trouvée va donc dépendre du point initial et que des procédures (toujours heuristiques) de 'multi-start' sont possibles (optimisation séquencielle en partant de différentes solutions).

2.3.3.3.3 Métaheuristiques Les métaheuristiques sont des algorithmes génériques de recherche se basant souvent sur la nature (recuit simulé, algorithmes génétiques...).

[YL99] proposent un recuit simulé avec un voisinage sur des points extrêmes du polytope du CCNFP.

[GCI00] proposent de résoudre un problème de transport généralisé (avec des coefficients de charge dans la contrainte de respect des capacités de production) par un algorithme génétique basé sur un codage d'arbre couvrant minimum ('spanning tree').

[FG07] proposent une méthode hybridant un algorithme génétique et une méthode de recherche locale pour le 'single-source uncapacitated minimum cost network flow problem with general concave costs'. Cette approche est motivée par le fait que tout MCNFP avec des fonctions de coûts linéaires quelconques peut être reformulé en un concave MCNFP sur un réseau plus grand [FL06]. De plus, les problèmes de flots dans un réseau capacitaire avec plusieurs sources peuvent être reformulés en un problème de flots sans capacité avec une seule source [FL06].

[IS01] proposent un algorithme évolutionnaire (algorithme génétique) faisant évoluer une population de points extrêmes pour optimiser le problème de 'non linear network flow'.

Les algorithmes génétiques (Genocop III et 5.0 [KM99]) proposent aussi de résoudre des problèmes d'optimisation globale (i.e. non linéaire non convexe) sous contraintes. Des exemples de problèmes de planification logistique sont disponibles dans [CCW05] et [JB09].

Une adaptation du Recuit Simulé (baptisé ISA pour 'Improved Simulated Annealing') a aussi été proposée par [JJT06] pour résoudre des problèmes d'optimisation non convexe sous contraintes linéaires ; de la même manière, les essaims particulaires ont aussi été adaptés par [VV09].

2.3.3.3.4 Conclusion Le problème tel que nous l'avons formulé n'a pas été résolu dans la littérature. Cependant, il est très proche du problème de transport et surtout de son extension avec économie d'échelles : le problème de transport à coût concave. Ce dernier est généralisé avec le problème de flot à coût concave qui est NP-difficile dans sa version discrète[YL99]. Nous avons présenté les méthodes exactes, les heuristiques notamment basées sur la programmmation linéaire et les métaheuristiques qui ont été mises en oeuvre sur la classe de problèmes de minimisation à fonction objectif continue non-linéaire non-convexe sous des contraintes linéaires ; ce qui correspond à la classe de notre problème. Dans le cas de problèmes de grande taille, les métaheuristiques semblent une approche intéressante, surtout si elles parviennent à exploiter, via des hybridations, les structures linéaires (issues des contraintes linéaires) du problème. Cette approche sera exploitée dans les méthodes mises en œuvre et décrites par la suite.

2.3.4 Borne inférieure

Nous proposons une borne inférieure pour évaluer la qualité des solutions trouvées. Le principe de la borne inférieure proposée repose sur le calcul d'un prix de cession minimum par zone de production pour une famille de véhicules. Ce prix de cession utilise au maximum les économies d'échelle en production. Pour ce faire, on se base sur une estimation a priori de la charge maximale $charge_max_{t,u}$ qui est affectable sur chaque technologie de production t de chaque zone de production u.

2.3.4.1 Calcul de la charge maximale

Pour une zone de production u donnée, on détermine, pour chaque famille de véhicules i, le nombre maximum de véhicules qui pourraient être produits sur cette zone de production. Ce nombre maximal

est déduit soit à partir des prévisions de ventes, soit à partir des limites de capacités de production.

Pour les prévisions de ventes, le nombre maximal de véhicules est égal à la somme du nombre de véhicules demandés par toutes les zones de commercialisation situées à l'extrémité d'une route de distribution partant de u :

$$Nbi1_{i,u} = \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.\left(\sum_{v=1}^{ZC} d_{k,v}.pv_{i,v}\right), \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV \tag{2.41}$$

Pour les capacités de production, il s'agit de déterminer, pour chaque technologie de production, le nombre maximal de véhicules qui peuvent être produits et de retenir la valeur la plus faible :

$$Nbi2_{i,u} = \min_{t=1,TP/xc_{i,t}>0}\left(\frac{cap_{t,u}^{max}}{xc_{i,t}}\right), \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV \tag{2.42}$$

Le nombre maximal de véhicules $Nbi3_{i,u}$ de la famille de véhicules i qui pourront être produits par la zone de production u est donc égal au minimum entre ces deux quantités :

$$Nbi3_{i,u} = min(Nb1_{i,u}, Nb2_{i,u}), \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV \tag{2.43}$$

L'objectif est de déterminer un majorant du nombre de véhicules produits sur une zone de production u par la technologie de production t. Ce nombre est égal à la somme, pour toutes les familles de véhicules i utilisant la technologie de production t et pouvant être produits sur la zone de production u, des nombres maximaux de véhicules pouvant être produits sur la zone de production u.

$$Nbt1_{t,u} = \sum_{i=1,FV/\prod_{t'=1,TP/xc_{i,t'}>0} cap_{t',u}^{max}>0 \text{ et } xc_{i,t}>0} Nbi3_{i,u}, \forall u = 1, ZP, \forall t = 1, TP \tag{2.44}$$

2.3.4.2 Spécificité du problème

Comme une technologie de production tp est partagée par l'ensemble des familles de véhicules, un autre majorant du nombre de véhicules produits pour cette technologie peut être calculé en retenant le nombre maximum de véhicules de la famille pour laquelle le plus de véhicules peuvent être produits.

$$max_{i=1,FV/\prod_{t'=1,TP/xc_{i,t'}.cap_{t',u}^{max}>0}} Nbt2_{tp,u} = \left(\frac{cap_{tp,u}^{max}}{xc_{i,tp}}\right), \forall u = 1, ZP \tag{2.45}$$

2.3.4.3 Obtention de la borne inférieure

Au final, on a donc une charge maximum estimée comme suit :

$$charge_max_{t,u} = \begin{cases} min(Nbt1_{t,u}, Nbt2_{t,u}) \text{ si t=tp} \\ Nbt1_{t,u} \text{ si t} \neq \text{tp} \end{cases} \tag{2.46}$$

L'estimation de cette charge maximale permet de calculer a priori un prix de cession ce qui rend le problème linéaire. Pour évaluer la borne inférieure, il suffit alors de résoudre le programme linéaire suivant :

$$minimiser\ f'(Y) = \sum_{i=1}^{FV}\sum_{k=1}^{RD}\left(Y_{i,k}.(pfd_{i,k} + \sum_{u=1}^{ZP}(c_{k,u}.xcs_{i,u}.xfd_{i,k}.(tam_{i,u} + \sum_{t=1}^{TP}(e_{i,t}.\frac{ff_{t,u}}{charge_max_{t,u}} + xc_{i,t}.fv_{t,u}))))\right) \quad (2.47)$$

sous les contraintes de satisfaction de la demande(2.55), de respect des capacités de production minimum (2.56) et maximum (2.57) et de positivité des variables (2.62).

2.3.5 Méthodes d'optimisation

Par la suite, nous allons proposer différentes méthodes pour résoudre le problème de planification sans contrainte de sourcing. Nous proposons d'abord de heuristiques puis des métaheuristiques.

2.3.5.1 Heuristiques

Nous proposons une heuristique basée sur la programmation linéaire, une heuristique basée sur la programmation non-linéaire et une heuristique basée sur la programmation linéaire successive.

2.3.5.1.1 Méthode avec une linéarisation du problème - HBI La borne inférieure offre une solution admissible qui peut être évaluée avec la fonction objectif non linéaire. Ainsi, en résolvant le programme linéaire de la borne inférieure (2.3.4.3) et en évaluant la solution avec la fonction objectif nous avons une solution heuristique du problème. Cette formulation est très proche des modèles linéaires rencontrés dans la littérature (par exemple, voir [CG07]). Cette solution sera aussi utilisée comme solution initiale pour d'autres méthodes de recherche. Cette méthode heuristique sera noté « HBI ».

2.3.5.1.2 Heuristique de répartition uniforme - HRU L'heuristique HRU consiste pour chaque famille de véhicules à répartir uniformément les demandes de chaque zone de commercialisation entre les routes de distribution potentielles. Pour une zone de commercialisation donnée, les routes de distribution potentielles sont donc celles qui ont comme destination la zone de commercialisation considérée et qui ont comme origine une zone de production permettant la production de ce type de produit c'est-à-dire disposant de toutes les technologies requises. La solution construite n'est pas obligatoirement admissible, elle respecte les contraintes de non-négativité (2.62) et de satisfaction de la demande (2.55) mais peut ne pas respecter les contraintes de capacité minimum et maximum ((2.56) et (2.57)). L'algorithme de principe de cette heuristique est donné sur la figure 1.

2.3.5.1.3 Programmation non linéaire Nous résolvons le modèle décrit en 2.3.1 directement à l'aide d'une méthode d'optimisation non-linéaire (optimisation convexe). Nous utilisons une méthode d'optimisation continue basée sur le point intérieur dont le pas est calculé à l'aide d'un modèle quadratique sur une région de confiance. Ce sous-problème est résolu à l'aide d'un gradient conjugué comme présenté dans [BNW06]. L'implémentation utilisée de cet algorithme est celle du solveur Knitro 6.0 [WN03] appelé via son interface Java. Le Jacobien et le Hessien sont calculés en utilisant la différenciation numérique proposée par le solveur.

Les conditions d'arrêt de l'algorithme sont doubles, à la fois sur l'admissibilité de la solution et son optimalité [WN03] :

– Le critère d'admissibilité calcule une pénalisation des contraintes violées,

Algorithme 1 Initialisation uniforme

pour $i = 1$ à FV **faire**
  pour $v = 1$ à ZC **faire**
    si $pv_{i,v} > 0$ **alors**
      Soit $R = \left\{ k \in RD / d_{k,v} = 1 \text{ et } \sum_{u=1,ZP} c_{k,u} . \prod_{t=1,TP/xc_{i,t}>0} cap_{t,u}^{max} > 0 \right\}$
      pour $k = 1, card(R)$ **faire**
        $Y_{i,k} = \frac{pv_{i,v})}{card(R)}$
      fin pour
    fin si
  fin pour
fin pour

– Le critère d'optimalité se base sur les conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) pour valider l'optimalité (locale).

Le problème étant non convexe, la solution renvoyée par le solveur dépend (de manière déterministe) du point initial qui est défini par le solveur et aucune garantie d'optimalité globale n'est donnée. Cependant les conditions KKT certifient l'optimalité locale. Cette méthode est une approche heuristique pour résoudre notre problème.

2.3.5.1.4 Programmation linéaire successive L'idée de cette méthode est similaire à la méthode utilisée pour résoudre le problème de mélange qui est non linéaire et non convexe [ABH+04]. Ce problème bien connu dans l'industrie pétrochimique a des minima locaux ce qui rend difficile son optimisation globale. Une méthode heuristique fréquemment utilisée dans l'industrie est la programmation linéaire successive qui va chercher à résoudre successivement une suite de problèmes linéaires pour converger vers un minimum local de bonne qualité. Appliquée à notre problème, l'idée est d'affiner itérativement les prix de cession en fonction des valeurs de flux trouvés à l'itération précédente. Cette approche heuristique (car nous n'avons aucune garantie de l'optimalité globale) est détaillée dans l'algorithme 2.

Algorithme 2 Algorithme de programmation linéaire successive

Soit Y_best la meilleure solution connue.
Soit k_max le nombre maximum d'itérations
Initialiser la solution courante Y_0 avec l'heuristique de construction uniforme (heuristique HRU).
$Y_best := Y_0$
Calculer tous les prix de cession pc à partir de la fonction d'évaluation (3.45).
k := 1
répéter
  Résoudre le problème linéaire avec les prix de cession pc pour obtenir Y_k.
  Calculer les nouveaux prix de cession pc à partir de la fonction $f(Y_k)$.
  si $f(Y_k) < f(Y_best)$ **alors**
    $Y_best := Y_k$
  fin si
  $k := k + 1$
jusqu'à $k = k_max$

2.3.5.2 Métaheuristiques

Nous proposons deux méthodes d'optimisation à base de recuit simulé pour résoudre ce probleme.

Nous notons qu'il existe un lien entre les quantités produites sur les zones de production et les quantités distribuées sur les routes de distribution. Notons $P_{i,u}, i = 1, FV, u = 1, ZP$ les quantites produites avec $P_{i,u}$ la quantité de véhicules de la famille de véhicules $i, i = 1, FV$ produite par la zone de production $u, u = 1, ZP$. A partir des quantités distribuées, les quantités produites peuvent être déterminées en appliquant la formule 2.48 :

$$P_{i,u} = \sum_{k=1,RD} c_{k,u}.Y_{i,k}, \forall i = 1, FV, u = 1, ZP \tag{2.48}$$

A partir des quantités produites, les quantités distribuées $Y_{i,k}$ peuvent être déterminées en résolvant un problème de transport pour chaque famille de véhicules $i, i = 1, FV$. Le problème de transport, pour la famille de véhicules i, peut être décrit de la manière suivante :

$$\text{minimiser} \sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}. \left(pfd_{i,k} + xfd_{i,k}. \sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}.pc_{i,u} \right) \tag{2.49}$$

sous contraintes

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k} = P_{i,u}, \forall u = 1, ZP \tag{2.50}$$

$$\sum_{k=1}^{RD} d_{k,v}.Y_{i,k} = pv_{i,v}, \forall v = 1, ZC \tag{2.51}$$

$$Y_{i,k} \geqslant 0, \forall k = 1, RD \tag{2.52}$$

La contrainte (2.51) concerne le respect de la demande de chaque zone de commercialisation alors que la contrainte (2.50) concerne le respect des quantités produites par chaque zone de production. La contrainte (2.52) assure la positivité des variables.

Aussi, deux approches ont été proposées selon que l'on cherche à déterminer prioritairement les quantités produites ou les quantités distribuées. Dans un premier temps, nous décrivons les éléments communs aux deux approches considérées à savoir les solutions initiales et les fonctions objectif considérées.

Puis, pour chaque approche, nous définissons le codage de la solution, le système de voisinage et l'algorithme de principe de la méthode proposée.

2.3.5.2.1 Solutions initiales Nous utilisons deux heuristiques pour déterminer une solution initiale admissible ou non :

- HRU est basée sur une répartition uniforme de la demande,
- HBI est basée sur la borne inférieure proposée.

2.3.5.2.2 Fonction objectif Comme les solutions proposées peuvent ne pas être admissibles, nous proposons deux fonctions afin de prendre en compte à la fois le critère économique tel qu'il a été défini précédemment et le respect des contraintes de capacité. Ainsi, à chaque solution Y est associé un couple de valeurs (f(Y), g(Y)) où :

- $f(Y)$ désigne le coût de la solution Y (fonction objectif définie dans le modèle mathématique (2.3.5.1.1)),
- $g(Y)$ est la fonction de violation des contraintes de capacité ($g(Y) = 0$ si les contraintes de capacité sont respectées, $g(Y) > 0$ sinon)

L'obtention d'une solution admissible sera favorisée en appliquant une relation d'ordre total sur l'ensemble des solutions de la manière suivante : Soient deux solutions Y et Y' et soient $(f(Y), g(Y))$ et $(f(Y'), g(Y'))$ leurs évaluations respectives. On dira que Y est une meilleure solution que Y' si et seulement si :

- soit $g(Y) < g(Y')$,
- soit $g(Y) = g(Y')$ et $f(Y) < f(Y')$.

Ainsi, toute solution admissible sera meilleure que n'importe quelle solution non admissible. La fonction de violation des contraintes de capacité doit intégrer à la fois les violations des contraintes de capacité minimale et celles des contraintes de capacité maximale. Nous l'avons défini de la façon suivante :

$$g(Y) = \sum_{u=1}^{ZP} \sum_{t=1}^{TP} max \left\{ \begin{array}{c} 0; \\ \sum_{i=1}^{FV} \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k}.xc_{i,t} - cap_{t,u}^{max}; \\ cap_{t,u}^{min} - \sum_{i=1}^{FV} \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k}.xc_{i,t} \end{array} \right\}$$

2.3.5.3 Métaheuristique basée sur les quantités distribuées

2.3.5.3.1 Codage de la solution Une solution est représentée par une matrice constituée de flux de distribution $(Y_{i,k})_{i \in FV, k \in RD}$ correspondant à la quantité de la famille de véhicules i transportée sur la route de distribution k. Le nombre de véhicules de type i transporté sur la route de distribution k est obligatoirement nul si une des conditions suivantes est vérifiée :

- le nombre véhicules de la famille de véhicules $i (i \in FV)$ demandé par la zone de commercialisation destination de la route de distribution k est nul,
- la zone de production à l'origine de la route de distribution k n'est pas en mesure de fabriquer un produit de type i c'est-à-dire qu'elle ne dispose pas des technologies de production requises.

Par convention, nous poserons alors $Y_{i,k} = -1$ afin de distinguer ces cas des cas où, bien que le transport soit possible, la quantité transportée est nulle.

Nous avons donc : $\forall i \in FV, k \in RD$

$$\left\{ \begin{array}{ll} Y_{i,k} = -1 & si \left\{ \begin{array}{l} \sum_{v=1}^{ZC} d_{k,v}.pv_{i,v} = 0 \\ \text{ou} \\ \sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}. \prod_{t=1/xc_{i,t}>0}^{TP} cap_{t,u}^{max} = 0 \end{array} \right. \\ Y_{i,k} \in \Re^{+} & autrement \end{array} \right. \tag{2.53}$$

2.3.5.3.2 Système de voisinage et procédure de réparation Ce système de voisinage consiste à déplacer un nombre de véhicules d'une famille de véhicules d'une route de distribution vers une autre. Tous les paramètres sont choisis aléatoirement. Ce système de voisinage, noté VD, est donné dans l'algorithme 3.

Ce système de voisinage assure le respect des contraintes de satisfaction de la demande. Par contre, les contraintes de capacités minimum et/ou maximum peuvent être violées. Nous avons donc proposé une procédure de réparation. Cette procédure consiste à appliquer plusieurs fois le système de voisinage VD jusqu'à ce que la solution soit admissible. L'algorithme de principe de cette procédure de réparation est donné en algorithme 4.

2.3.5.3.3 Algorithme de principe L'algorithme 5 donne l'algorithme de principe de la métaheuristique que nous avons mise en œuvre. Cette méthode intègre le système de voisinage et la procédure de réparation présentés précédemment.

Algorithme 3 Système de voisinage sur les flux de distribution VD

Soit Y une solution (admissible ou non)
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément une famille de véhicules $i \in FV$
  Soit $R_1 = \{k \in RD / Y_{i,k} > 0\}$ (ensemble des routes de distribution sur lesquelles la famille de véhicules i est transportée)
  Choisir aléatoirement et uniformément une route de distribution $k_1 \in R_1$
  Soit $R_2 = \{k \in RD / k \neq k_1$ et $Y_{i,k} \neq -1$ et $\exists v \in ZC / d_{k_1,v} = 1$ et $d_{k,v} = 1\}$ (ensemble des routes de distribution ayant comme destination la zone de commercialisation destination de k_1 et pouvant transporter la famille de véhicules i)
jusqu'à $R_2 \neq \oslash$
Choisir aléatoirement et uniformément une route de distribution $k_2 \in R_2$
Choisir aléatoirement et uniformément une quantité $q \in]0; Y_{i,k_1}]$
$Y_{i,k_1} = Y_{i,k_1} - q$
$Y_{i,k_2} = Y_{i,k_2} + q$

Algorithme 4 Procédure de réparation R

Soit Y une solution non-admissible ($g(Y) > 0$)
tant que $g(Y) > 0$ **faire**
  Choisir aléatoirement et uniformément une solution $Y' \in VD(Y)$
  si $g(Y') \leq g(Y)$ **alors**
    $Y = Y'$
  fin si
fin tant que

2.3.5.4 Métaheuristique basée sur les quantitées produites

Nous proposons une seconde méthode d'optimisation basée maintenant sur un couplage entre une metaheuristique et un modèle mathématique. Le modèle mathématique déterminera (si possible) la distribution optimale pour chaque solution au niveau de la production.

2.3.5.4.1 Codage de la solution Une solution est représentée par la matrice des quantités de production $(P_{i,u})_{i \in FV, u \in ZP}$, correspondant aux quantités de la famille de véhicules i produites sur la zone de production u. Le nombre de véhicules de la famille de véhicules i fabriqué sur la zone de production u est obligatoirement nul si une des conditions suivantes est vérifiée :

- la zone de production u n'est pas en mesure de fabriquer la famille de véhicules i c'est-à-dire qu'elle ne dispose pas des technologies de production requises,
- aucune zone de commercialisation accessible depuis la zone de production u n'a de demande en véhicules de la famille de véhicules i.

Par convention, nous poserons alors $P_{i,u} = -1$ afin de distinguer ces cas des cas où, bien que la production soit possible, la quantité produite est nulle.

Nous avons donc : $\forall i \in FV, u \in ZP$

$$\begin{cases} P_{i,u} = -1 \quad si \begin{cases} \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u} \sum_{v=1}^{ZC} d_{kv}.pv_{i,v} = 0 \\ \text{ou} \\ \prod_{t=1/xc_{i,t}>0}^{TP} cap_{t,u}^{max} = 0 \end{cases} \\ P_{i,u} \in \Re^{+} \quad autrement \end{cases} \tag{2.54}$$

Algorithme 5 Algorithme de principe avec le codage sur les quantités distribuées

Soit Y une solution admissible ou non admissible (ne respectant pas au moins une contrainte de capacité minimale ou maximale - $g(Y) > 0$)
si $g(Y) > 0$ **alors**
  Appliquer la procédure de réparation R
fin si
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément une solution $Y' \in VD(Y)$
  si $g(Y') > 0$ **alors**
    Appliquer la procédure de réparation R
  fin si
  si $f(Y') \leq f(Y)$ **alors**
    $Y = Y'$
  fin si
jusqu'à Critère d'arrêt

Système de voisinage et procédure de réparation Ce système de voisinage consiste à déplacer un nombre de véhicules d'une même famille de véhicules d'une zone de production vers une autre. Tous les paramètres sont choisis aléatoirement. Ce système de voisinage, noté VP, est donné dans l'algorithme 6.

Algorithme 6 Système de voisinage sur les productions VP

Soit P une solution (admissible ou non)
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément une famille de véhicules $i \in FV$
  Soit $U_1 = \{u \in ZP / P_{i,u} \geqslant 0\}$ (ensemble des zones de production fabriquant la famille de véhicules i)
  Choisir aléatoirement et uniformément une zone de production $u_1 \in U_1$
  Soit $U_2 = \{u \in ZP / u \neq u_1 \text{ and } P_{i,u} > 0\}$ (ensemble des zones de production pour lesquelles la fabrication de la famille de véhicules i est possible)
jusqu'à $U_2 \neq \oslash$
Choisir aléatoirement et uniformément une route de distribution $u_2 \in U_2$
Choisir aléatoirement et uniformément une quantité $q \in]0; P_{i,u_1}]$
$P_{i,u_1} = P_{i,u_1} - q$
$P_{i,u_2} = P_{i,u_2} + q$

Ce système de voisinage n'assure ni le respect des contraintes de satisfaction de la demande ni les contraintes de capacité minimale et/ou maximale. Dans un premier temps, afin de satisfaire les contraintes de capacité nous appelons la procédure de réparation R_{prod} présentée en algorithme7 .

Algorithme 7 Procédure de réparation R_{prod}

Soit P une solution non-admissible ($g(P) > 0$)
tant que $g(P) > 0$ **faire**
  Choisir aléatoirement et uniformément une solution P' tel que$P' \in V_{prod}(P)$
  si $g(P') \leq g(P)$ **alors**
    $P = P'$
  fin si
fin tant que

Après réparation, il est nécessaire de déterminer les quantités transportées sur les routes de distribution. La procédure d'évaluation de la fonction objectif est réalisée en trois temps : d'abord, on

évalue les prix de cession à partir des quantités produites. Puis, on calcule les flux de distribution à partir des quantités de production. Enfin, on évalue la fonction objectif.

Les prix de cessions sont calculés à partir des quantités de production et du coût total d'approvisionnement :

$$pc_{i,u} = xcs_{iu}.\left(tam_{i,u} + \sum_{t=1}^{TP} e_{i,t}.\left(\frac{ff_{t,u}}{\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.P_{i',t} + \delta_0\left(\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.P_{i',t}\right)} + xc_{i,t}.fv_{t,u}\right)\right), \forall i \in FV, u \in ZP$$

Ce problème de transport à plusieurs produits doit être résolu pour tous les types de produit déplacés lors de l'application du système de voisinage et de la procédure de réparation. Ce probleme de transport est résolu soit par un solveur de programme linéaire soit par la méthode de Balas-Hammer.

Nous redéfinissons la fonction d'évaluation économique f et la fonction de pénalisation g pour le codage sur les productions : en notant $t(P)$, la fonction de transformation d'une solution codée sur les productions vers la même solution codée sur les flux, on peut définir la fonction d'évaluation économique d'une solution codée sur les productions $f(P)$ comme étant équivalent à $f(t(P))$ et définir la fonction de pénalisation d'une solution codée sur les productions $g(P)$ comme étant équivalent à $g(t(P))$.

2.3.5.4.2 Algorithme de principe L'algorithme 8 donne l'algorithme de principe de la méta-heuristiques que nous avons mis en œuvre. Cette méthode intègre le système de voisinage sur les productions et la procédure de réparation présentés précédemment.

Algorithme 8 Algorithme de principe avec le codage sur les productions

Soit P une solution admissible ou non admissible (ne respectant pas au moins une contrainte de capacité minimale ou maximale - $g(P) > 0$)
si $g(P) > 0$ **alors**
  Appliquer la procédure de réparation R_{prod}
fin si
pour toutes les familles de véhicules i déplacées lors de la procédure de réparation **faire**
  Résoudre le problème de transport correspondant
  si le problème de transport n'a pas de solution **alors**
    $f(P) = +\infty$
  fin si
fin pour
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément $P' \in VP(P)$
  si $g(P') > 0$ **alors**
    Appliquer la procédure de réparation R_{prod}
  fin si
  pour toutes les familles de véhicules i déplacées lors de la procédure de réparation **faire**
    Résoudre le problème de transport correspondant à la famille de véhicule i
    si le problème de transport n'a pas de solution **alors**
      $f(P') = +\infty$
      Sortir de la boucle POUR
    fin si
  fin pour
  si $f(P') \leq f(P)$ **alors**
    $P = P'$
  fin si
jusqu'à Critère d'arrêt

2.3.6 Expérimentation

Nous appliquons les méthodes d'optimisation décrites précédemment sur différents jeux de données. Nous détaillons ces instances puis nous présentons les tableaux de résultats suivis d'une analyse.

Pour le problème étudié, les instances seront générées directement au niveau de détails attendu par le modèle mathématique (par exemple, on travaille avec des prix de flux d'approvisionnement et non pas des prix de transport d'approvisionnement plus des taux de douane d'approvisionnement). Cela permet d'avoir à générer le minimum d'éléments.

De plus, la génération des instances a cherché à assurer la cohérence des instances générées avec le cas industriel, tout en proposant des instances à complexité croissante. Les différents paramètres retenus pour la génération sont :

- La taille du problème, c'est-à-dire le nombre de ZP, ZC, FV et TP considérées.
- La densité du réseau, c'est-à-dire le nombre de routes de distribution possibles.
- La structure de coûts, c'est-à-dire la répartition des coûts tout au long de la chaîne logistique.

On peut noter que [CPS06] détermine 3 facteurs de difficulté d'une instance de planification de chaîne logistique :

- La taille du réseau logistique,
- La complexité des flux matériels,
- Les capacités.

Dans notre cas, les deux premiers facteurs sont inclus dans la taille du problème. Nous ne considérons pas spécifiquement différents ratios de charge/capacité car nous avons un ratio charge/capacité constant correspondant au cas industriel.

Nous détaillons maintenant ces différents paramètres :

2.3.6.1 Taille du problème

Différentes tailles de problèmes seront générées pour évaluer les méthodes d'optimisation. La taille des différents problèmes dépend du nombre d'éléments des ensembles des zones de production et de distribution, des familles de véhicules et des technologies de production.

Nombre de zones de production et de commercialisation Chaque type de réseau a un certain nombre de zones de chaque type. Les zones de commercialisation correspondent à l'ensemble des marchés mondiaux.

Nombre de familles de véhicules Le nombre de familles de véhicules correspond au nombre moyen de familles de véhicules par an.

Technologies de production Le nombre de technologies de production à prendre en compte dépend directement du nombre de famille de véhicules. Dans le cadre de l'industrie automobile, la production d'un véhicule au sein d'une usine terminale requiert trois technologies de production :

- le ferrage,
- la peinture,
- le montage.

Les usines terminales sont divisées en ateliers correspondants à ces technologies. Cependant des spécificités technologiques existent en fonction des familles de véhicules. Ainsi, nous considérons que la technologie de production 'peinture' est commune à toutes les familles de véhicules mais qu'il faudra une technologie de production 'montage' pouvant être partagée entre deux familles de véhicules. De même, une technologie de production 'ferrage' est requise par famille de véhicules. Le nombre total de TP sera donc égal à 1 (la technologie de production 'peinture') + nombre de plateformes (les technologies de production liées au 'montage') + nombre de familles de véhicules (les technologies de production liées au 'ferrage').

Les 6 tailles de problèmes en fonction de ces paramètres de génération sont présentées en figure 2.3.6.1.

	nb ZP	**nb ZC**	**nb FV**	**nb TP**
A	3	5	3	6
B	3	10	4	7
C	3	10	5	8
D	4	10	4	7
E	4	10	5	8
F	8	50	10	14

Figure 2.5 – Taille des différentes instances de test

2.3.6.2 Densité du réseau

Pour chaque type de réseau, nous définissons trois densités possibles selon le nombre de routes existantes entre les ZP et ZC.

- Un réseau peu dense (noté '1') a entre 70 et 80% des routes de distribution.
- Un réseau moyennement dense (noté '2') a entre 80 et 90% des routes de distribution.
- Un réseau dense (noté '3') a entre 90 et 100% des routes de distribution.

2.3.6.3 Structure de coûts

La structure de coûts, c'est-à-dire la répartition des différents coûts entre les différents processus de la chaîne logistique, est aussi un paramètre différenciant.

Indicateurs de la répartition des coûts Les instances se différencient aussi par leur structure des coûts. La répartition des coûts entre les coûts d'approvisionnement, les coûts de production fixes, les coûts de production variables, les coûts de transport de distribution (indépendant du prix de cession) et les coûts de douane de distribution (liés aux prix de cession) peut changer.

Pour chaque instance, des coûts seront générés en respectant une répartition moyenne totale du coût total entre :

- La part approvisionnement intégrant l'ensemble des coûts d'approvisionnement (notamment l'achat, le transport et la douane d'approvisionnement),
- La part amortissement intégrant les frais fixes de production ventilés sur les quantités produites,
- La part main d'œuvre intégrant les frais variables de production,
- La part transport de distribution intégrant les coûts de distribution indépendants du prix de cession,
- La part douane de distribution intégrant les coûts de distribution dépendant du prix de cession.

Différentes structures de coûts On définit 4 structures de coût (de A à D) qui sont différenciées par la répartition des différentes parts 2.3.6.3.

	Part appro	Part prod fixe	Part prod var	part transp distri	part douan distri
A	60%	10%	6%	4%	20%
B	60%	0%	16%	24%	0%
C	60%	0%	16%	4%	20%
D	60%	10%	6%	24%	0%

Figure 2.6 – Différentes structures de coût

Nous avons les remarques suivantes concernant ces différentes structures de coûts :

- Dans notre démarche, nous utilisons la solution générée par la borne inférieure pour évaluer ces coûts après la génération de chaque instance.
- La classe de coût A correspond aux coûts classiquement rencontrés dans l'industrie automobile.
- La classe de coût B correspond à des coûts linéaires (typiquement rencontrés dans les modèles de Supply Chain Design classiques).
- La classe de coût C correspond à des coûts linéaires pour les modèles sans contraintes de sourcing.
- La classe de coût D correspond à des coûts non-linéaires à cause sur les économies d'échelle en production.

La procédure de génération des instances est détaillée en Annexe 1.

2.3.6.4 Procédure de test

Par la suite, une itération correspond à la génération d'une nouvelle solution admissible et à son évaluation. Les métaheuristiques présentées sont testées sur 1000000 itérations (sans limite de temps sauf quand cela est mentionné) et avec 10 réplications (les résultats présentés sont donc des moyennes notées 'm' avec leur écart-type 's', sauf quand cela est mentionné).

Les résultats des métaheuristiques pour les instances de taille A à taille F sont présentés dans les tableaux ci-aptès. Les métaheuristiques appliquées correspondent aux deux métaheuristiques l'une avec un codage sur les quantité de flux distribués (cf. 2.3.5.3) noté 'FLUX' et l'autre avec un codage sur les quantités de production (cf. 2.3.5.4) notée 'PROD'. Ces deux métaheuristiques sont initialisées avec deux solutions différentes : soit avec la solution de l'heuristique HBI (cf. 2.3.5.1.1), on notera alors les méthodes de résolution 'FLUX/HBI' ou 'PROD/HBI' selon le cas, soit avec une solution crée par l'heuristique HRU (cf. 2.3.5.1.2), on notera alors les méthodes 'FLUX/HRU' et 'PROD/HRU' selon le cas. Pour chaque méthode et chaque instance, nous donnons le nombre moyen d'itérations sur les 10 réplications pour obtenir la meilleure solution, la moyenne sur les 10 réplications de l'écart relatif en pourcentage entre les meilleures solutions obtenues et la valeur de la borne inférieure, l'écart type sur les 10 réplications de l'écart relatif entre les meilleures solutions obtenues et la valeur de la borne inférieure et la moyenne sur les 10 réplications de l'écart relatif en pourcentage de la valeur de la solution initiale et la borne inférieure (si la solution initiale est inadmissible alors cette valeur est à $+\infty$).

Notons que dans le cas des initialisations avec la borne inférieure, pour les instances avec une structure de coût de type B et C, la solution initiale est la solution optimale (la valeur de la solution initiale est égale à la valeur de la borne inférieure). Nous ne donnons donc pas de résultats pour ces méthodes pour ces instances spécifiques.

Les heuristiques appliquées sont la programmation non linéaire (cf. 2.3.5.1.3) notée 'NLP', la programmation linéaire successive (cf. 2.3.5.1.4) notée 'SLP' et la linéarisation de la fonction objectif (cf. 2.3.4.3) notée 'LIN'. Ces heuristiques sont déterministes et sont donc testées avec une seule réplication dans les tableaux après en donnant les résultats pour les instances des 6 tailles de problèmes..

Le tableau 2.3.6.4 présente une synthèse générale des résultats. La figure 2.20 présente ces même résultats sous une forme graphique.

2.3.6.5 Résultats

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
A1A	53	**7,72%**	0,00%	1,29%	81	**7,72%**	0,00%	$+\infty$	5500	**7,72%**	0,00%	1,29%	142	**7,72%**	0,00%	$+\infty$
A1B	-	-	-	-	607142	**0,00%**	0,00%	0,44%	-	-	-	-	874174	**0,00%**	0,00%	0,4%
A1C	-	-	-	-	427261	**0,00%**	0,00%	6,69%	-	-	-	-	573098	**0,00%**	0,00%	6,7%
A1D	60	**12,9%**	0,00%	0,16%	2700	**12,9%**	0,00%	1,36%	7089	**12,9%**	0,00%	0,16%	284949	**12,9%**	0,00%	1,4%
A2A	215	**18,4%**	0,00%	0,47%	407	**18,4%**	0,00%	4,45%	1621	**18,4%**	0,00%	0,47%	379449	**18,4%**	0,00%	0,9%
A2B	-	-	-	-	610255	**0,00%**	0,00%	7,98%	-	-	-	-	854974	**0,00%**	0,00%	8,0%
A2C	-	-	-	-	173842	**0,00%**	0,00%	2,76%	-	-	-	-	22841	**0,00%**	0,00%	2,8%
A2D	83	**15,1%**	0,00%	0,69%	118	**15,1%**	0,00%	1,34%	211773	**15,1%**	0,00%	0,69%	90747	**15,1%**	0,00%	1,3%
A3A	4582	**15,0%**	0,00%	0,23%	8636	**15,0%**	0,00%	$+\infty$	8541	**15,0%**	0,00%	0,23%	5151	**15,0%**	0,00%	$+\infty$
A3B	-	-	-	-	138135	**0,00%**	0,00%	$+\infty$	-	-	-	-	195780	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
A3C	-	-	-	-	684217	**0,00%**	0,00%	$+\infty$	-	-	-	-	183896	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
A3D	11453	**16,3%**	0,00%	0,29%	13379	**16,3%**	0,00%	$+\infty$	65229	**16,3%**	0,00%	0,29%	60865	**16,3%**	0,00%	$+\infty$

Figure 2.7 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille A

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
A1A	**9,18%**	**9,11%**	**9,11%**
A1B	**1,06%**	**0,00%**	**0,00%**
A1C	**0,66%**	**0,00%**	**0,00%**
A1D	**13,5%**	**13,1%**	**13,1%**
A2A	**19,0%**	**18,9%**	**18,9%**
A2B	**0,90%**	**0,00%**	**0,00%**
A2C	**0,50%**	**0,00%**	**0,00%**
A2D	**16,3%**	**15,9%**	**15,9%**
A3A	**15,8%**	**15,0%**	**15,2%**
A3B	**0,71%**	**0,00%**	**0,00%**
A3C	**0,84%**	**0,00%**	**0,00%**
A3D	**17,1%**	**16,6%**	**16,6%**

Figure 2.8 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille A

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
B1A	691000	15,6%	0,00%	0,07%	866183	**15,7%**	0,01%	10,8%	981560	**15,6%**	0,00%	0,08%	241559	**15,6%**	0,00%	10,8%
B1B					798727	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					956035	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
B1C					704614	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					721679	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
B1D	905776	13,7%	0,00%	0,45%	796212	**13,8%**	0,00%	$+\infty$	683696	**13,7%**	0,00%	0,46%	982923	**13,7%**	0,00%	$+\infty$
B2A	742653	17,3%	0,00%	0,12%	948264	**17,4%**	0,01%	14,5%	0	**17,3%**	0,00%	0,13%	936599	**17,4%**	0,00%	14,5%
B2B					925433	**0,01%**	0,01%	2,32%					824002	**0,00%**	0,00%	2,33%
B2C					552	**0,00%**	0,00%	10,5%					519059	**0,00%**	0,00%	10,5%
B2D	36672	**18,9%**	0,00%	0,02%	583325	**18,9%**	0,00%	5,58%	870851	**18,9%**	0,00%	0,02%	283213	**18,9%**	0,00%	5,6%
B3A	469802	**15,5%**	0,00%	0,03%	515432	**15,5%**	0,00%	3,88%	629721	**15,5%**	0,00%	0,03%	490252	**15,5%**	0,00%	3,9%
B3B					540	**0,00%**	0,00%	22,1%					349298	**0,00%**	0,00%	22,1%
B3C					463820	**0,00%**	0,00%	18,8%					861072	**0,00%**	0,00%	18,8%
B3D	53506	**21,6%**	0,00%	0,16%	86561	**21,6%**	0,00%	11,4%	25473	**21,6%**	0,00%	0,16%	243387	**21,6%**	0,00%	11,3%

Figure 2.9 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille B

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
B1A	**16,0%**	**15,68%**	**15,76%**
B1B	**2,4%**	**0,00%**	**0,00%**
B1C	**1,0%**	**0,00%**	**0,00%**
B1D	**15,5%**	**14,29%**	**14,29%**
B2A	**19,3%**	**17,46%**	**17,52%**
B2B	**0,0%**	**0,00%**	**0,00%**
B2C	**1,6%**	**0,00%**	**0,00%**
B2D	**20,6%**	**18,9%**	**18,9%**
B3A	**16,2%**	**15,6%**	**15,6%**
B3B	**2,1%**	**0,00%**	**0,00%**
B3C	**2,6%**	**0,00%**	**0,00%**
B3D	**23,3%**	**21,8%**	**21,8%**

Figure 2.10 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille B

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
C1A	468947	**15,5%**	0,00%	1,20%	369367	**15,5%**	0,00%	9,56%	818717	**15,5%**	0,00%	1,20%	254880	**15,5%**	0,00%	9,56%
C1B					579556	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					204813	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
C1C					789346	**0,00%**	0,00%	25,5%					151527	**0,00%**	0,00%	25,5%
C1D	710671	**17,3%**	0,00%	0,43%	900636	**17,3%**	0,00%	5,96%	680543	**17,3%**	0,00%	0,43%	659906	**17,3%**	0,00%	5,96%
C2A	746025	**21,4%**	0,00%	0,08%	769777	**21,5%**	0,01%	16,9%	599547	**21,4%**	0,00%	0,08%	822468	**21,4%**	0,00%	16,9%
C2B					910292	**0,17%**	0,15%	21,4%					774142	**0,00%**	0,00%	21,6%
C2C					781135	**0,01%**	0,00%	13,2%					555662	**0,00%**	0,00%	13,2%
C2D	652	**17,4%**	0,00%	0,49%	1209	**17,4%**	0,00%	$+\infty$	682563	**17,4%**	0,00%	0,49%	793641	**17,4%**	0,00%	$+\infty$
C3A	311	**15,4%**	0,00%	0,30%	579	**15,4%**	0,00%	7,12%	555850	**15,4%**	0,00%	0,30%	555864	**15,4%**	0,00%	0,75%
C3B					155819	**0,00%**	0,00%	20,8%					256204	**0,00%**	0,00%	20,8%
C3C					569	**0,00%**	0,00%	6,41%					45235	**0,00%**	0,00%	0,46%
C3D	298102	**15,9%**	0,00%	0,02%	425584	**15,9%**	0,00%	5,24%	57166	**15,9%**	0,00%	0,02%	425584	**15,9%**	0,00%	1,27%

Figure 2.11 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille C

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
C1A	18,27%	15,71%	16,85%
C1B	3,57%	0,00%	0,00%
C1C	3,67%	0,00%	0,00%
C1D	18,67%	17,84%	17,84%
C2A	23,91%	21,44%	21,54%
C2B	6,55%	0,00%	0,00%
C2C	1,70%	0,00%	0,00%
C2D	19,66%	17,98%	17,98%
C3A	18,62%	15,72%	15,72%
C3B	4,32%	0,00%	0,00%
C3C	1,34%	0,00%	0,00%
C3D	19,00%	15,96%	15,96%

Figure 2.12 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille C

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
D1A	467988	**8,42%**	0,00%	1,311%	344114	**8,42%**	0,00%	$+\infty$	348305	**8,42%**	0,00%	1,31%	35461	**8,42%**	0,00%	$+\infty$
D1B					928573	**0,01%**	0,01%	$+\infty$					80170	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D1C					271622	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					79209	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D1D	920110	**3,21%**	0,00%	2,823%	599722	**3,21%**	0,00%	$+\infty$	391924	**3,21%**	0,00%	2,82%	598848	**3,21%**	0,00%	$+\infty$
D2A	343	**9,41%**	0,00%	0,09%	914	**9,41%**	0,00%	8,98%	240225	**9,41%**	0,00%	0,09%	298988	**9,41%**	0,00%	$+\infty$
D2B					936371	**0,01%**	0,02%	$+\infty$					335430	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D2C					537213	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					93419	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D2D	774848	**6,06%**	0,00%	2,246%	988569	**6,07%**	0,00%	$+\infty$	424432	**6,05%**	0,00%	2,25%	449628	**6,05%**	0,00%	$+\infty$
D3A	696102	**10,3%**	0,00%	0,627%	734704	**10,3%**	0,00%	$+\infty$	89717	**10,3%**	0,00%	0,63%	62557	**10,3%**	0,00%	$+\infty$
D3B					841928	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					82676	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D3C					786563	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					77818	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
D3D	189035	**15,4%**	0,00%	0,06%	812138	**15,4%**	0,00%	$+\infty$	241650	**15,4%**	0,00%	0,05%	87028	**15,4%**	0,00%	$+\infty$

Figure 2.13 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille D

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
D1A	**9,25%**	**9,79%**	**9,84%**
D1B	**1,39%**	**0,00%**	**0,00%**
D1C	**1,36%**	**0,00%**	**0,00%**
D1D	**13,49%**	**6,12%**	**6,12%**
D2A	**12,49%**	**9,50%**	**12,49%**
D2B	**1,85%**	**0,00%**	**0,00%**
D2C	**1,01%**	**0,00%**	**0,00%**
D2D	**9,56%**	**8,44%**	**8,44%**
D3A	**10,64%**	**10,91%**	**10,99%**
D3B	**0,78%**	**0,00%**	**0,00%**
D3C	**0,21%**	**0,00%**	**0,00%**
D3D	**15,53%**	**15,43%**	**15,43%**

Figure 2.14 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille D

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
E1A	224	**9,52%**	0,00%	0,09%	714	**9,52%**	0,00%	$+\infty$	224	**9,52%**	0,00%	0,09%	714	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E1B					747815	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					98374	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E1C					678881	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					94380	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E1D	94437	**8,12%**	0,00%	0,36%	830248	**8,12%**	0,00%	$+\infty$	56935	**8,12%**	0,00%	0,36%	31634	**8,12%**	0,00%	2,05%
E2A	400255	**6,68%**	0,00%	0,00%	768436	**6,68%**	0,02%	$+\infty$	88015	**6,68%**	0,00%	0,01%	87974	**6,68%**	0,00%	$+\infty$
E2B					816985	**0,01%**	0,01%	$+\infty$					73571	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E2C					779459	**0,00%**	0,00%	$+\infty$					81294	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E2D	642679	**8,52%**	0,00%	0,03%	944122	**8,52%**	0,00%	$+\infty$	241640	**8,52%**	0,00%	0,03%	51139	**8,52%**	0,00%	$+\infty$
E3A	881499	**12,2%**	0,00%	0,07%	890052	**12,2%**	0,00%	11,1%	1	**12,2%**	0,00%	0,07%	521370	**12,2%**	0,00%	11,1%
E3B					870947	**0,01%**	0,01%	$+\infty$					60597	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E3C					700194	**0,04%**	0,03%	$+\infty$					86213	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
E3D	505	**2,59%**	0,00%	0,04%	843211	**2,59%**	0,00%	$+\infty$	809321	**2,59%**	0,00%	0,04%	809346	**2,59%**	0,00%	$+\infty$

Figure 2.15 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille E

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
E1A	**9,61%**	**9,61%**	**9,61%**
E1B	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E1C	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E1D	**8,51%**	**8,51%**	**8,51%**
E2A	**14,28%**	**14,67%**	**14,67%**
E2B	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E2C	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E2D	**8,55%**	**8,52%**	**8,55%**
E3A	**12,32%**	**12,24%**	**12,32%**
E3B	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E3C	**0,00%**	**0,00%**	**0,00%**
E3D	**2,63%**	**2,63%**	**2,63%**

Figure 2.16 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille E

nom	FLUX/HBI				FLUX/HRU				PROD/HBI				PROD/HRU			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m	m	m	s	m
F1A	300495	**5,94%**	0,00%	0,14%	951510	**5,94%**	0,00%	$+\infty$	16018	**5,94%**	0,000%	0,14%	73958	**5,94%**	0,00%	$+\infty$
F1B					990913	**0,03%**	0,01%	$+\infty$					1	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
F1C					989956	**0,05%**	0,04%	$+\infty$					1	**0,09%**	0,00%	$+\infty$
F1D	216858	**6,24%**	0,00%	0,02%	989907	**6,29%**	0,03%	$+\infty$	34055	**6,24%**	0,000%	0,03%	82782	**6,25%**	0,00%	$+\infty$
F2A	7010	**6,57%**	0,00%	0,57%	967670	**6,59%**	0,01%	$+\infty$	396223	**6,57%**	0,000%	0,57%	96984	**6,57%**	0,00%	$+\infty$
F2B					992980	**0,08%**	0,04%	$+\infty$					91313	**0,01%**	0,00%	$+\infty$
F2C					953663	**0,02%**	0,02%	$+\infty$					87153	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
F2D	337523	**7,79%**	0,00%	0,06%	987956	**7,81%**	0,01%	$+\infty$	296015	**7,79%**	0,000%	0,06%	85014	**7,79%**	0,00%	$+\infty$
F3A	705817	**4,41%**	0,00%	0,02%	988119	**4,42%**	0,01%	$+\infty$	100001	**4,41%**	0,000%	0,02%	63599	**4,41%**	0,00%	$+\infty$
F3B					991235	**0,03%**	0,01%	$+\infty$					76378	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
F3C					983068	**0,05%**	0,02%	$+\infty$					89538	**0,00%**	0,00%	$+\infty$
F3D	595483	**11,1%**	0,00%	0,77%	989745	**11,2%**	0,01%	$+\infty$	448182	**11,1%**	0,000%	0,80%	70222	**11,1%**	0,00%	$+\infty$

Figure 2.17 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille F

nom	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
F1A	**impossible**	**6,08%**	**6,08%**
F1B	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F1C	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F1D	**impossible**	**6,27%**	**6,27%**
F2A	**impossible**	**7,02%**	**7,18%**
F2B	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F2C	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F2D	**impossible**	**7,86%**	**7,86%**
F3A	**impossible**	**4,43%**	**4,43%**
F3B	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F3C	**impossible**	**0,00%**	**0,00%**
F3D	**impossible**	**11,97%**	**11,97%**

Figure 2.18 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille F

	FLUX/BI	FLUX/UNIF	PROD/BI	PROD/UNIF	NLP	SLP	LIN
A	7,114%	7,115%	7,114%	7,114%	7,970%	7,387%	7,409%
B	8,560%	8,570%	8,559%	8,564%	10,069%	8,638%	8,650%
C	8,580%	8,597%	8,580%	8,580%	11,606%	8,721%	8,824%
D	4,527%	4,530%	4,396%	4,400%	6,463%	5,016%	5,276%
E	3,973%	3,980%	3,973%	3,973%	4,660%	4,682%	4,691%
F	3,505%	3,538%	3,501%	3,512%	impossible	3,635%	3,649%

Figure 2.19 – Synthèse générale des méthodes de résolutions appliquées aux différentes tailles d'instances

la figure 2.3.6.4 présente la synthèse des différentes méthodes de résolutions pour chaque classe de taille d'instance. Pour chaque taille d'instance, une moyenne sur toutes les instances où on n'obtient pas la solution optimale avec l'heuristique basée sur la borne inférieure (c'est-à-dire 6 instances dans le cas d'une initialisation avec l'heuristique HBI et 12 instances dans le cas de l'utilisation de l'heuristique HRU) .

2.3.6.6 Analyse des résultats sans contrainte de sourcing

La précédente campagne de tests a appliqué différentes méthodes d'optimisation sur des instances de taille variable. Les résultats de la campagne de test sont analysés sous deux aspects : la performance des méthodes en termes de qualité de solution (distance à la borne inférieure) et de durée de traitement nécessaire pour obtenir une bonne solution.

2.3.6.7 Performance des méthodes de résolution

La figure 2.20 présente la distance entre la meilleure solution trouvée et la borne inférieure calculée.

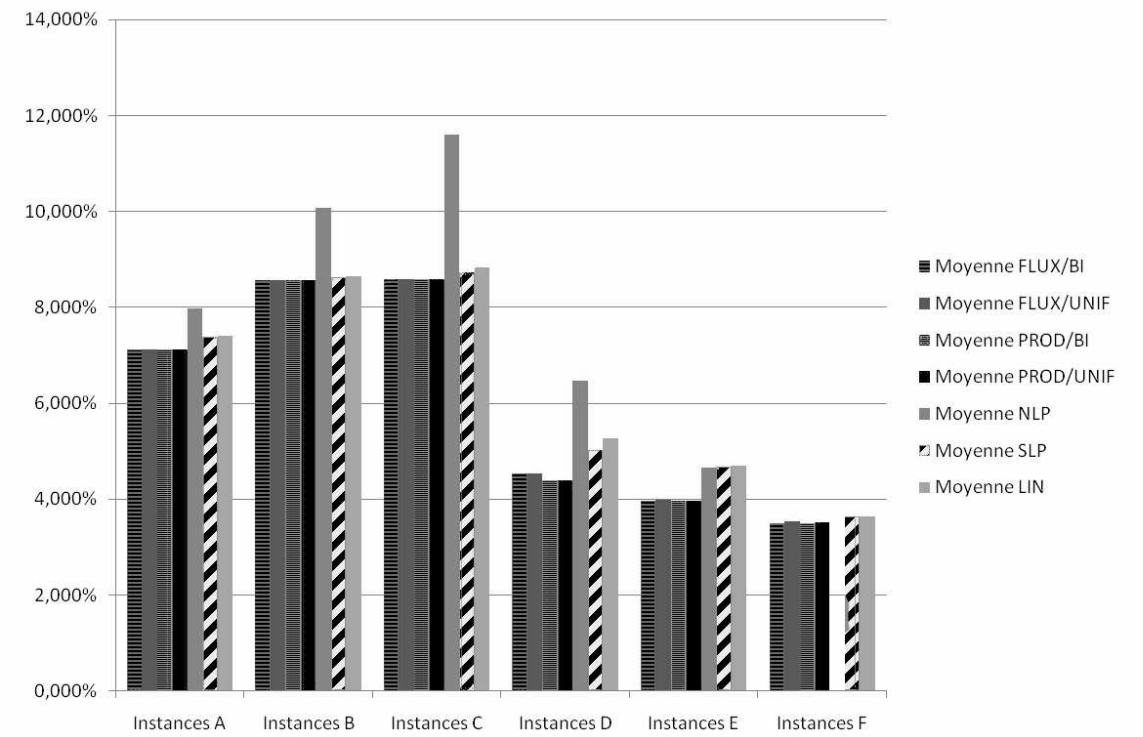


Figure 2.20 – Graphique de synthèse de la performance des méthodes

Nous relevons les éléments suivants :

- La méthode de programmation non linéaire est limitée en taille mémoire à partir de la taille d'instance F
- La performance générale des méthodes d'optimisation est cohérente sur l'ensemble des tailles d'instance. La convergence des métaheuristiques est identique quelle que soit la solution initiale utilisée.
- Les métaheuristiques sont performantes et relativement plus efficaces que les méthodes de linéarisation, de programmation linéaire successive ou de programmation non linéaire.

2.3.6.8 Durée des méthodes de résolution

La figure 2.21 présente l'évolution de la durée moyenne de traitement des méthodes d'optimisation selon la taille des instances.

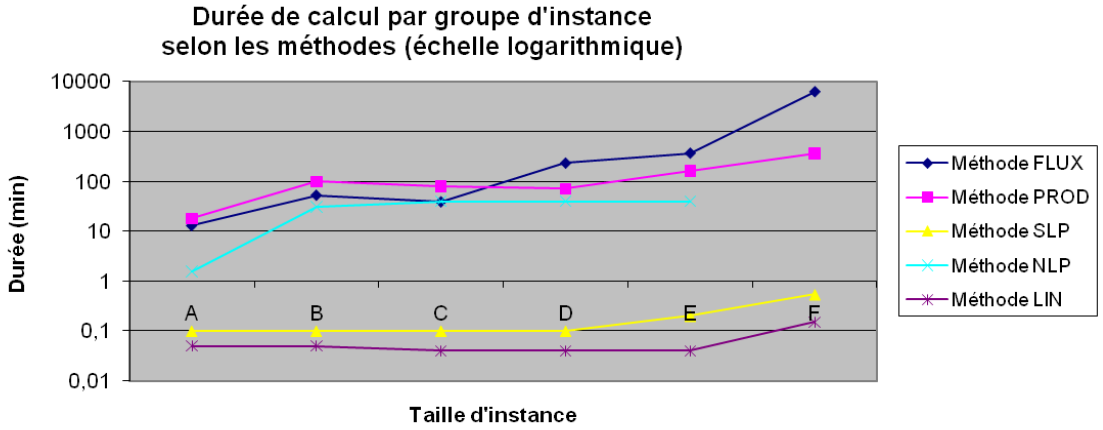


Figure 2.21 – Durée de calcul

Les différentes méthodes ont des durées de calcul très différentes :

- Les méthodes basées sur la programmation linéaire (linéarisation et SLP) sont très rapides et s'adaptent bien à l'accroissement de la taille des instances.
- La méthode de programmation non-linéaire a été paramétrée avec une limite de temps de 40 minutes ; au delà duquel un 'cross-over' (passage entre la méthode de point intérieur et une méthode de projection sur les contraintes de type simplex) est réalisé pour faire converger la solution. Cela limite le temps de calcul à environ 40 minutes au maximum.
- Les deux métaheuristiques convergent bien quelle que soit la solution initiale. Elles ont une durée qui augmente très rapidement avec la taille des instances. Cette augmentation est plus rapide pour la méthode basée sur les flux que celle basée sur les productions. Cela s'explique par l'augmentation plus rapide de la combinatoire sur les flux (nombre de familles de véhicules x nombre de zones de production x nombre de zones de commercialisation) que sur les productions (nombre de familles de véhicules x nombre de zones de production).

2.3.6.9 Conclusion de l'analyse

En synthèse de l'analyse, les métaheuristiques semblent plus performantes mais nécessitent plus de temps de calcul. Quand la taille des instances augmente, le codage sur les production semble être plus performant en terme de temps de calcul que celui sur les flux. De plus, les heuristiques basées sur la programmation linéaire sont très rapides mais ont des résultats moins bons. La programmation non linéaire donne des résultats globalement moins bons que les autres méthodes dans un temps de calcul raisonnable pour de petites tailles d'instances.

Ce problème et les approches de résolution ont été présentés à la conférence MOSIM 2010 [SGNG10b].

Par la suite, nous étudions le problème avec contraintes de sourcing.

2.4 Répartition stratégique avec contrainte de sourcing

Le modèle avec contraintes de sourcing reprend le modèle sans contrainte de sourcing en ajoutant des décisions au niveau de l'approvisionnement. En effet, des contraintes au niveau du sourcing sont maintenant prises en compte et il faut donc faire des choix pour organiser l'approvisionnement des pièces et réaliser l'assemblage des véhicules. Dans le cas d'un sourcing multiple (plusieurs sources pour une même famille de pièces à destination de l'assemblage d'un véhicule), le coût rendu des pièces achetées à intégrer dans le prix de revient de fabrication est la moyenne des différents coûts d'achat pondérée par les quantités achetées.

2.4.1 Formalisation mathématique

Nous présentons maintenant la formalisation mathématique du problème de répartition avec contraintes de sourcing ; c'est à dire du modèle stratégique incluant l'approvisionnement, la production et la distribution.

2.4.1.1 Données

Les données pour l'activité d'approvisionnement sont les suivantes :

FP	nombre de familles de pièces
ZA	nombre de zones d'approvisionnement,
RA	nombre de routes d'approvisionnement,
$app_{p,s}^{min}$	nombre minimum de famille de pièces de type p $(p = 1, FP)$ à acheter sur la zone d'approvisionnement s $(s = 1, ZA)$,
$app_{p,s}^{max}$	nombre maximal de famille de pièces de type p $(p = 1, FP)$ pouvant être achetés sur la zone d'approvisionnement s $(s = 1, ZA)$,
$pfa_{j,p}$	prix unitaire d'achat de la famille de pièces p $(p = 1, FP)$ transportée sur la route j $(j = 1, RA)$,
$a_{j,s}$	$a_{j,s} = 1$ si la route d'approvisionnement j $(j = 1, RA)$ a pour origine la zone d'approvisionnement s $(s = 1, ZA)$, 0 sinon,
$b_{j,u}$	$b_{j,u} = 1$ si la route d'approvisionnement j $(j = 1, RA)$ a pour destination la zone de production u $(s = 1, ZP)$, 0 sinon,

Les données correspondant à la production sont les suivantes :

FV	Nombre de familles de véhicules,
ZP	Nombre de zones de production,
TP	Nombre de technologies de production,
$ff_{t,u}$	Frais fixes de la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$fv_{t,u}$	Frais variables pour la production d'un véhicule standard utilisant la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$cap_{t,u}^{min}$	Nombre minimum de véhicules standards à produire avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$cap_{t,u}^{max}$	Nombre maximum de véhicules standards pouvant être produits avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ installée sur u $(u = 1, ZP)$,
$xc_{i,t}$	Ratio entre le nombre de véhicules de la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ produits avec la technologie de production $t(t = 1, TP)$ et un produit standard,
$xn_{i,p}$	Nombre de pièces de la famille de pièces $p(p = 1, FP)$ nécessaires à la production d'un véhicules de la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$
$xcs_{i,u}$	Coefficient de cession de la famille de véhicules i $(i = 1, FV)$ produite sur u $(u = 1, ZP)$.

Les données correspondantes aux activités de distribution sont les suivantes :

ZC	nombre de zones de commercialisation,
RD	nombre de routes de distribution,
$c_{k,u}$	$c_{k,u} = 1$ si la route de distribution k ($k = 1, RD$) a pour origine u ($u = 1, ZP$), 0 sinon,
$d_{k,v}$	$d_{k,v} = 1$ si la route de distribution k ($k = 1, RD$) a pour destination v ($v = 1, ZC$),0 sinon,
$pv_{i,v}$	prévision de ventes pour la famille de véhicules i ($i = 1, FV$) sur la zone de commercialisation v ($v = 1, ZC$),
$pfd_{i,k}$	Frais variable unitaire de distribution (indépendants du prix de cession) pour la famille de véhicules i ($i = 1, FV$) transportée sur la route de distribution k ($k = 1, RD$),
$xfd_{i,k}$	Coefficient de distribution pour la famille de véhicules i ($i = 1, FV$) transportée sur la route de distribution k ($k = 1, RD$),

2.4.1.2 Variables

Il s'agit de déterminer les variables $X_{i,j,p}$ ($i = 1, FV; j = 1, RA; p = 1, FP$), les quantités de famille de pièces p transportée sur la route d'approvisionnement j pour l'assemblage de la famille de véhicules i et $Y_{i,k}$ ($i = 1, FV; k = 1, RD$), la quantité de famille de véhicules i transportées sur la route de distribution k.

2.4.1.3 Contraintes

Les contraintes suivantes doivent être satisfaites :

1. Les prévisions de demande doivent être satisfaites pour toutes les familles de véhicules sur toutes les zones de commercialisation :

$$\sum_{k=1}^{RD} d_{k,v}.Y_{i,k} = pv_{i,v}, \forall i = 1, FV, \forall v = 1, ZC \tag{2.55}$$

2. Les minima et maxima de capacités de production pour toutes les technologies de production sur toutes les zones de production doivent être respectées :

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.(\sum_{i=1}^{FV} Y_{i,k}.xc_{i,t}) \geqslant cap_{t,u}^{min}, \forall t = 1, TP, \forall u = 1, ZP \tag{2.56}$$

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.(\sum_{i=1}^{FV} Y_{i,k}.xc_{i,t}) \leqslant cap_{t,u}^{max}, \forall t = 1, TP, \forall u = 1, ZP \tag{2.57}$$

3. L'équilibre de flux est à respecter entre les quantités de toutes les familles de pièces approvisionnées et les quantités de familles de véhicules distribuées :

$$xn_{i,p}.\sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k} = \sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.X_{i,j,p}, \forall p = 1, FP, \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV \tag{2.58}$$

4. Les minima et les maxima des capacités d'approvisionnement doivent être respectés pour toutes les familles de pièces sur toutes les zones d'approvisionnement :

$$\sum_{j=1}^{RA} a_{j,s}.(\sum_{i=1}^{FV} X_{i,j,p}) \geqslant app_{p,s}^{min}, \forall p = 1, FP, \forall s = 1, ZA \tag{2.59}$$

$$\sum_{j=1}^{RA} a_{j,s}.(\sum_{i=1}^{FV} X_{i,j,p}) \leqslant app_{p,s}^{max}, \forall p = 1, FP, \forall s = 1, ZA \tag{2.60}$$

5. Non-négativité des variables :

$$X_{i,j,p} \geqslant 0, \forall i = 1, FV, \forall p = 1, FP, \forall j = 1, RA \tag{2.61}$$

$$Y_{i,k} \geqslant 0, \forall i = 1, FV, \forall k = 1, RD \tag{2.62}$$

2.4.1.4 Fonction objectif

L'objectif est de minimiser les coûts d'exploitation sur l'intégralité de la Chaîne Logistique considérée.

$Minimiser\ f(X,Y) =$
$\sum_{i=1}^{FV} \sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}.(pfd_{i,k} + \sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}.pc_{i,u}.xfd_{i,k})$
avec les prix de cession $pc_{i,u}$ tels que :

$$pc_{iu} = xcs_{iu}.\left(\frac{\sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.\sum_{p=1}^{FP} xn_{i,p}.X_{i,j,p}.pfa_{j,p}}{\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i,k'} + \delta_0 \left(\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i,k'} \right)} + \sum_{t=1}^{TP} e_{i,t}.\left(\frac{ff_{t,u}}{\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.\sum_{k'=1}^{RD} c_{k'u}.Y_{i'k'} + \delta_0 \left(\sum_{i'=1}^{FV} e_{i',t}.\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i',k'} \right)} + xc_{i,t}.fv_{t,u} \right) \right) \tag{2.63}$$

2.4.2 Etude de la convexité de la fonction objectif

Dans cette partie, nous étudions la convexité de la fonction objectif avec la moyenne pondérée uniquement due à l'assemblage (sans la ventilisation des coûts fixes de production).

Considérons un réseau qui est constitué de deux zones d'approvisionnement ZA1 et ZA2, de deux zones de production ZP1 et ZP2 et des deux zones de commercialisation ZC1 et ZC2. Nous considérons une seule famille de pièces qui formera une unique famille de véhicules (coefficient de nomenclature de 1). Les coûts rendus des flux d'approvisionnement sont uniquement dépendant des zones d'approvisionnement : le coût rendu d'une pièce est de 1€/pc pour celles issues de ZA1 et de 2€/pc pour celles issues de ZA2. Cependant la production de la ZA1 est limitée à 500 pc. Le taux de douane de distribution est uniquement dépendant de la zone de commercialisation : il est de 10% à destination de ZC1 et de 30% à destination de ZC2. Nous négligeons les frais fixes et les frais variables de production sur les deux zones de production. La demande est respectivement de 2000 véhicules sur la ZC1 et de 500 véhicules sur la ZC2.

Nous instancions la fonction objectif avec les paramètres suivants :
$card(ZA) = 2$
$card(ZP) = 2$
$card(ZC) = 2$
$card(FP) = 1$
$card(FV) = 1$
$card(RA) = 4$
$card(RD) = 4$

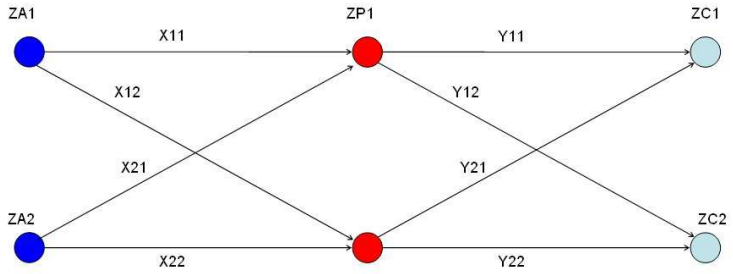


Figure 2.22 – Schéma du réseau simplifié avec approvisionnement

RA :

	ZA1	ZA2
ZP1	RA1	RA2
ZP2	RA3	RA4

RD :

	ZP1	ZP2
ZC1	RD1	RD2
ZC2	RD3	RD4

$TP = 1$

$pfd_{i,k} = 0, \forall i \in FV, k \in RD$

$xcs_{i,u} = 1, \forall i \in FV, u \in ZP$

$pfa_{1,j,1} =$

(€/pc)	ZA1	ZA2
ZP1	1	10
ZP2	1	10

$ff_{t,u} = 0, \forall t \in TP, u \in ZP$

$fv_{t,u} = 0, \forall t \in TP, u \in ZP$

$xfd_{1,k} =$

	ZP1	ZP2
ZC1	1,1	1,1
ZC2	1,3	1,3

Nous construisons des solutions (cf. figure 2.22) $\mathbf{S} = (X11, X12, X21, X22, Y11, Y12, Y21, Y22)^t$. Le coût total est :

$f(\mathbf{S}) = \frac{X11*1+X21*10}{X11+X21} * (1,1 * Y11 + 1,3 * Y12) + \frac{X12*1+X22*10}{X12+X22} * (1,1 * Y21 + 1,3 * Y22)$

Soient les trois solutions $S1$, $S2$ et $S3 = 1/2 * (S1 + S2)$ présentées dans le tableau suivant (2.4.2).

Solution	X11	X12	X21	X22	Y11	Y12	Y21	Y22		coût total
S1	500	0	0	2000	0	500	2000	0		2300
S2	0	500	2000	0	2000	0	0	500		2150
S3=1/2*(S1+S2)	250	250	1000	1000	1000	250	1000	250		2870

Comme $f(S3) > 1/2*(f(S1)+f(S2))$, la fonction objectif du problème avec contraintes de sourcing est non convexe. A noter que ce résultat est obtenu sans la ventilation des frais fixes de production (non convexité prouvée pour le problème sans contrainte de sourcing).

2.4.3 Etat de l'art du problème avec contraintes de sourcing

Le modèle avec contraintes de sourcing est donc un modèle de répartition avec approvisionnement, production et distribution. L'état de l'art du modèle sans contrainte de sourcing n'est plus entièrement applicable car la caractéristique d'assemblage (des pièces en un véhicule) supprime la structure de flots. Par la suite, nous réaliserons un état de l'art complémentaire sur les modèles avec assemblage pour étudier à la fois les modèles incluant les contraintes de sourcing et les méthodes de résolution alors employées. En premier lieu, nous étudierons les modèles de planification stratégiques prenant en compte les contraintes de l'approvisionnement, puis nous étudierons le problème de mélange ('pooling

problem' en anglais) et le problème de planification de chaîne logistique avec des prix de cession ('supply chain planning with transfer prices' en anglais).

2.4.3.1 La prise en compte des contraintes de sourcing dans la littérature

La modélisation d'une chaîne logistique requiert de modéliser des limites de capacité au niveau des fournisseurs. De nombreux modèles stratégiques de planification de chaîne logistique sont présentés dans [CG07]. La majorité de ces modèles sont linéaires et résolus avec des techniques de la programmation linéaire.

Par la suite, nous détaillons des modèles intégrant ces contraintes de sourcing et proposant des spécificités intéressantes :

Dans [ABHT95], un modèle de Supply Chain globale est proposé. Il intègre, en plus de l'assemblage et de la distribution, la prise en compte de la logistique internationale, notamment le 'duty drawback' (remboursement des frais de douane sous conditions). Un programme en nombres mixtes est présenté. Une méthode de Branch and Bound spécifique a été implémentée pour résoudre un cas industriel du secteur de la microélectronique. Le modèle de planification d'assemblage, de production et de distribution de [EGG+99] propose de gérer des évolutions technologiques dans les nomenclatures des produits finis. Ainsi des changements de composants dans l'assemblage d'un produit fini sont possibles. Appliqué à l'industrie automobile, ce modèle linéaire de grande taille n'est pas résolu dans l'article mais la méthode du lagrangien augmenté est citée comme perspective. L'activité de production peut aussi avoir des économies d'échelles ou d'envergure : [CM91] propose un modèle de chargement des usines intégrant l'approvisionnement et la distribution. Ce modèle de programmation linéaire en nombres mixtes est résolu avec une décomposition de Benders implémentée avec un solveur commercial.Dans un autre article sur la planification de la capacité et de la charge des usines [HL09], les auteurs prennent en compte les aspects non linéaires de la production. Ils utilisent un Recuit Simulé pour résoudre le problème. Le modèle de [YH09] optimise un réseau logistique de plusieurs niveaux avec des coûts de transport non linéaires. Un algorithme génétique est utilisé avec un codage d'arbre couvrant minimum.

L'utilisation dans cette littérature des contraintes de notre modèle est synthétisée en 2.23. Dans la figure 2.24, la taille des instances et le type de problème mathématique de cet état de l'art sont synthétisés.

Nous pouvons conclure que, généralement dans les modèles de planification stratégique avec assemblage de la littérature, des hypothèses de linéarité et surtout d'indépendance entre les coûts sont prises ; notamment pour utiliser la programmation linéaire comme méthode de résolution. Des modèles plus spécifiques vont chercher à modéliser plus finement la réalité souvent en ajoutant des non-linéarités au problème. Le problème de mélange est justement un problème classique de planification non-linéaire.

2.4.3.2 Le problème de mélange

Le problème de mélange est un problème rencontré dans la planification de l'industrie pétrochimique. Avec des limitations en termes d'approvisionnement, il s'agit de mélanger, de manière la plus économe, différents composants dans des cuves pour obtenir des produits dont les caractéristiques (par exemple, le taux de sulfate) doivent répondre à des critères de qualité. La modélisation du mélange (moyenne pondérée des caractéristiques des produits) apporte une non-linéarité. De plus, le 'pooling problem' est connu pour être non-convexe. Ce problème bilinéaire a été abondamment étudié dans la littérature [MF09].

Industriellement, il a été historiquement résolu par des méthodes de type SLP (Successive Linear Programming) [BL85]. Pour les problèmes bilinéaires (comme le pooling problème), on peut utiliser aussi une heuristique alternante [Coo64] qui va résoudre successivement deux problèmes linéaires liés entre eux ; les solutions d'un problème devenant des paramètres de l'autre. [ABH+04] démontre la convergence de cet algorithme vers un minimum local s'il n'existe qu'une seule solution à chaque étape de la procédure. Plus récemment, [AE09] propose d'utiliser une méthode basée sur la Relaxation Lagrangienne et [ABH+04] propose une méthode de Branch-and-Cut.

	Contraintes de satisfaction de la demande	**Equilibre des flux appro/distri**	**Capacité de production minimum**	**Capacité de production maximum**	**Capacité approvisionnement minimum**	**Capacité approvisionnement maximum**
[EGG+99]	X	X		X		X
[ABHT95]	X	X		X		X
[CM91]	X	X		X		X
[HL09]	X			X		X
[YH09]	X	X		X		X
[VG01]	X	X	X	X	X	X
[PHLDM09]	X	X		X		X
[ABH+04]	X	X		X		X
[AE09]	X	X		X		X

Figure 2.23 – Contraintes générales

	sites appro	sites prod	sites distri	composants	composés	modèle
[EGG+99]	/	/	/	/	/	LP
[ABHT95]	10	33	6	10	1	MILP
[CM91]	3	3	5	3	2	MILP
[HL09]	4	5	6	3	1	NLP
[YH09]	20	25	60	0	1	NLP
[VG01]	62	8	90	38	12	NLP
[PHLDM09]	62	8	90	35	12	NLP
[ABH+04]	?	8	?	11	16	NLP
[AE09]	?	8	?	11	16	NLP

Figure 2.24 – Taille et type des problèmes de la littérature

Le problème de mélange reste actuellement un problème difficle à résoudre optimalement sur de grandes instances, du fait de sa non-convexité.

Notons qu'à la différence de notre problème, le problème de mélange a une non-linéarité au niveau des contraintes et non au niveau de la fonction objectif.

2.4.3.3 Le problème de planification de chaîne logistique avec définition des prix de cession

Certains modèles de planification de la chaîne logistique prennent en compte la définition des prix de cession qui vont impacter les coûts liés à la valeur des produits (coûts de douane, coûts financiers des stocks, coût d'assurance...) mais aussi le bénéfice (après impôts) de l'entreprise. [VG01] propose un modèle de planification stratégique avec détermination des prix de cession. Ce problème bilinéaire est résolu par une heuristique alternante. L'heuristique alternante repose sur la bilinéarité de la fonction objectif du problème. Cela induit que pour des prix de cession fixés, la fonction objectif est linéaire en fonction des variables de flux. De même, pour des variables de flux fixées, la fonction objectif est linéaire en fonction des prix de cession. La résolution successive et itérative de ces deux programmes linéaires mène à un minimum local.

[PHLDM09] intègre l'heuristique alternante dans une recherche à voisinage variable (VNS). Cette métaheuristique repose sur l'utilisation de différents voisinages dont certains cherchent à obtenir un minimum local et d'autres à perturber la solution courante pour s'extraire des minima locaux. [PHLDM09] réalise la recherche locale avec l'heuristique alternante et la perturbation est réalisée en modifiant aléatoirement les prix de cession. Cette métaheuristique a prouvé sa convergence vers les solutions optimales de petites instances résolues en parallèle par une méthode de branch-and-cut spécialisée pour les programmes bilinéaires.

2.4.3.4 Conclusion sur l'état de l'art des problèmes de planification stratégique avec contraintes de sourcing

Les modèles avec contraintes de sourcing sont plus difficiles à résoudre que les problèmes sans contrainte de sourcing du fait de l'ajout de contraintes supplémentaires et, parfois, de non-linéarité supplémentaires notamment dans le lien entre les variables d'approvisionnement et celles de distribution. Malgré la perte de la structure de flots, les méthodes de résolution employées sont nombreuses avec une utilisation historique d'heuristiques (par exemple, le SLP ou la procédure alternante) et, plus récemment, de métaheuristiques (VNS) pour résoudre les problèmes de plus grandes tailles. Notre problème s'approche de celui de [VG01] mais, au lieu de considérer les prix de cession comme des variables libres, nous considérons qu'ils sont directement calculés à partir des décisions de répartition. Cette différence est remarque au niveau de la fonction objectif.

2.4.4 Borne inférieure

Nous proposons une borne inférieure pour le problème avec contraintes de sourcing. Elle pourra être utilisée pour évaluer la qualité des solutions obtenues.

L'idée est de linéariser le problème avec des prix de cession minimum. Le prix cession minimum est défini comme le prix avec le maximum d'économie d'échelle et le minimum de coût d'achat (sans contraintes d'approvisionnement). La différence avec la borne inférieure du problème sans contrainte de sourcing est l'intégration des contraintes de sourcing pour calculer le maximum d'économie d'échelle en production. Ainsi ce maximum d'économie d'échelle est calculé à partir d'une charge maximale pour chaque technologie de production t ($t = 1, TP$) installée sur chaque zone de production u ($u = 1, PZ$). Ainsi, la charge maximale va être déterminée à partir du nombre maximal de véhicules de familles de véhicules i ($i = 1, N$) pouvant être produits sur la zone de production u. Ce nombre est déterminé soit avec la demande prévisionnelle, soit avec les capacités de production, soit avec les capacités d'approvisionnement.

Pour les contraintes d'approvisionnement, nous définissons, pour chaque famille de pièces p ($p = 1, FP$) nécessaire à la production de la famille de véhicules i, le nombre maximum de composants disponibles et nous retenons le nombre minimum.

$$Nbi3_{iu} = \min_{p=1,FP/xn_{i,p}>0} \left(\frac{\sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.(\sum_{s=1}^{ZA} a_{j,s}.app_{p,s}^{max})}{xn_{i,p}} \right), \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV$$

Le nombre maximum de véhicules de la famille de véhicules i pouvant être réalisé sur la zone de production u est le minimum entre cette quantité $Nbi3_{iu}$, les prévisions de vente maximales $Nbi1_{iu}$ et les capacités maximales de production $Nbi2_{i,u}$ (définies pour la borne inférieure sans contrainte de sourcing).

$$Nbi_{i,u} = min(Nbi1_{iu}, Nbi2_{i,u}, Nbi3_{i,u}), \quad \forall u = 1, ZP, \forall i = 1, FV \tag{2.64}$$

La charge maximum $Nbmax1_{t,u}$ ($t = 1, TP, u = 1, ZP$) pour la technologie de production t installée sur la zone de production u est la somme du nombre précédent pour toutes les familles de véhicules i utilisant la technologie de production t.

$$Nbmax1_{t,u} = \sum_{\substack{i=1,FV/xc_{i,t}>0 \\ \text{et} \\ \Pi_{t'=1,TP/xc_{i,t'}>0} cap_{t',u}^{max}>0}} Nbi_{i,u}, \quad \forall t = 1, TP, \forall u = 1, ZP \tag{2.65}$$

De plus, dans notre problème, il existe une technologie de production tp qui est partagée par tous les produits. Cette spécificité peut être utilisée pour calculer une autre borne supérieure de la charge maximum $Nbmax2_{tp,u}$.

Au final, la charge maximum sur chaque zone de production u et pour chaque technologie de production t, sauf pour la technologie de production partagée, est le minimum défini entre les contraintes d'approvisionnement, de production ou de demande. Pour la technologie de production partagée, une autre quantité de charge est aussi évaluée.

$$Nbmax_{t,u} = \begin{cases} min(Nbmax1_{t,u}, Nbmax2_{t,u}) & \text{si} t = tp, \\ Nbmax1_{t,u} & \text{sinon} \end{cases} \tag{2.66}$$

Pour évaluer la borne inférieure, il suffit alors de résoudre le programme linéaire suivant :

$$minimiser\ f'(Y) = \sum_{i=1}^{FV}\sum_{k=1}^{RD}\left(Y_{i,k}.(pfd_{i,k} + \sum_{u=1}^{ZP}(c_{k,u}.xcs_{i,u}.xfd_{i,k}.(tam_{i,u} + \sum_{t=1}^{TP}(e_{i,t}.\frac{ff_{t,u}}{Nbmax_{t,u}} + xc_{i,t}.fv_{t,u}))))\right) \tag{2.67}$$

sous contraintes (2.55),(2.56),(2.57) et (2.62)

Les contraintes correspondent à la satisfaction de la demande (2.55), au respect des capacités minimum (2.56) et maximum (2.57) de production et à la positivité des variables (2.62).

2.4.5 Méthodes d'optimisation

Nous distingons les méthodes d'optimisation heuristiques et métaheuristiques.

2.4.5.1 Heuristiques

2.4.5.1.1 Méthode basée sur la programmation linéaire avec une linéarisation du problème Dans le cas avec contraintes de sourcing, la borne inférieure donne des prix de cessions qui peuvent être utilisés pour obtenir une solution admissible. Cette solution peut être ensuite évaluée avec la fonction objectif non linéaire (cf 2.4.1.4).

2.4.5.2 Méthode basée sur la programmation non linéaire

Nous utilisons le solver Knitro pour résoudre le problème d'optimisation non linéaire. Comme la fonction objectif est non convexe, cette approche est heuristique. L'implémentation est identique à celle proposée en 2.3.5.1.3.

2.4.5.2.1 Méthode basée sur la programmation linéaire successive Nous reprenons l'idée développée en 2.3.5.1.4 pour adapter l'heuristique de programmation linéaire successive au problème avec contraintes de sourcing. L'idée est toujours d'affiner itérativement les prix de cession en fonction des valeurs de flux d'approvisionnement et de distribution trouvées à l'itération précédente. L'algorithme de principe a déjà été présenté en algorithme 2.

Le programmme linéaire résolu à l'itération n avec l'ensemble PC_n des prix de cession estimé $pc^n_{i,u}, \forall i \in FV, u \in ZP$ à l'itération n est le suivant :

$$Minimiser\ f_n(X,Y,PC_n) = \sum_{i=1}^{FV}\sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}.(pfd_{i,k} + xfd_{i,k}.\sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}.xcs_{i,u}.pc^n_{i,u}) + \sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.\sum_{p=1}^{FP} X_{i,j,p}.pfa_{j,p} \tag{2.68}$$

avec pour variables $X_{i,j,p}$ $(i = 1, FV; j = 1, RA; p = 1, FP)$ et $Y_{i,k}$ $(i = 1, FV; k = 1, RD)$

sous les contraintes de satisfaction de la demande (2.55), de respect de capacités de production minimum et maximum (2.56) et (2.57), d'équilibre des flux (2.58), de respect des approvisionnements (2.59) et (2.60) et de positivité des variables (2.61) et (2.62).

Cette méthode est une heuristique car nous n'avons aucune garantie de l'optimalité globale.

2.4.5.3 Métaheuristiques

2.4.5.3.1 Solutions initiales Comme pour le problème sans contrainte de sourcing, nous proposons deux solutions initiales : la première basée sur une répartition uniforme des prévisions de vente sur le réseau de distribution et d'approvisionnement ; et la seconde basée sur la linéarisation de la borne inférieure.

Solution initiale uniforme La construction de cette solution va répartir la demande uniformément sur les différents flux disponibles. La solution créée sera, sauf cas particulier, uniquement valide pour la contrainte de satisfaction de la demande. L'algorithme 9 est détaillé ci-après.

Solution initiale basée sur le programme linéaire de la borne inférieure Un programme linéaire correspondant à celui du calcul de la borne inférieure (2.4.4) est résolu pour obtenir une solution admissible du problème.

Algorithme 9 Initialisation uniforme

pour $i = 1$ à FV **faire**
  pour $v = 1$ à ZC **faire**
    Soit R1 l'ensemble des routes de distribution $k \in RD$ telles que $Y_{i,k} \neq -1$ et $d_{k,v} = 1$
    pour $k = 1$ à $R1$ **faire**
      $Y_{i,k} = \frac{pv_{i,v}}{card(R1)}$
    fin pour
  fin pour
fin pour
pour $i = 1$ à FV **faire**
  pour $u = 1$ à ZP **faire**
    Soit $qp_{i,u}$ la quantité produite telle que $qp_{i,u} = \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k}$
    pour $p = 1$ à FP **faire**
      Soit R2 l'ensemble des routes d'approvisionnement $j \in RA$ telles que $X_{i,j,p} \neq -1$ et $b_{j,u} = 1$
      pour $j = 1$ à $R2$ **faire**
        $X_{i,j,p} = \frac{qp_{i,u}.xn_{i,p}}{card(R2)}$
      fin pour
    fin pour
  fin pour
fin pour

2.4.5.3.2 Métaheuristique sur les quantités produites Nous proposons une méthode d'optimisation basée sur une recherche locale et hybridée par deux programmes linéaires. Dans ce qui suit, nous décrivons d'abord la procédure d'initialisation, le codage utilisé, la procédure de décodage, le système de voisinage et la procédure de réparation utilisée. Enfin, nous présentons la fonction d'évaluation et l'algorithme de principe de la méthode.

Codage de la solution Une solution est représentée par la matrice des quantités de production $(P_{i,u})_{i \in FV, u \in ZP}$, correspondant aux quantités de la famille de véhicules i produite sur la zone de production u. Ce codage correspont à celui proposé en 2.3.5.4.1.

Rappelons qu'il y a un lien entre les quantités produites et les quantités distribuées (notées comme précédement $Y_{i,k} \forall i \in FV, k \in RD$) :

$$P_{i,u} = \sum_{k=1}^{RD} c_{k,u}.Y_{i,k}, \forall i = 1, FV, \forall u = 1, ZP$$

Il existe aussi un lien entre les quantités produites et les quantités approvisionnées (notées $X_{i,j,p} \forall i \in FV, j \in RA, p \in FP$) :

$$P_{i,u}.xn_{i,p} = \sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.X_{i,j,p}, \forall i = 1, FV, \forall u = 1, ZP, \forall p = 1, FP$$

Les solutions ne respectent pas forcément les capacités de production, nous utilisons donc la procédure de réparation R (algorithme 4) (présentée précédement) pour obtenir une solution respectant les containtes de capacités de production. Pour les autres contraintes, à partir de ce codage, une solution admissible peut généralement être obtenue grâce à la procédure de décodage.

Procédure de décodage des solutions A partir des quantités produites, nous devons déterminer les quantités approvisionnées et les quantités distribuées pour être capable d'évaluer complètement la solution. Ainsi, une procédure en trois étapes est proposée :

1. Résoudre le problème d'approvisionnement : Les flux d'approvisionnement sont déterminés à partir des quantités de production, des capacités d'approvisionnement et des routes d'approvisionnement disponibles.

2. Evaluer les prix de cession : Les prix de cession sont calculés à partir des quantités produites et des coûts d'approvisionnement.
3. Résoudre le problème de distribution : A partir des quantités de production et des prix de cession, les flux de distribution sont déterminés en respectant la contrainte de la demande et l'existence des routes de distribution.

Comme l'étape 2 correspond à l'évaluation des prix de cession détaillée précédemment, nous présentons uniquement les étapes 1 et 3 de la procédure de décodage dans ce qui suit :

Sous-problème d'approvisionnement Un programme linéaire peut être résolu pour déterminer les flux d'approvisionnement à partir des quantités des familles de véhicules i produites sur les zones de production u :

$$minimiser\ f_1(X) = \sum_{j=1}^{RA}\sum_{p=1}^{FP} X_{i,j,p}.pfa_{j,p} \tag{2.69}$$

sous contraintes

$$\sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.X_{i,j,p} = P_{i,u}.xn_{i,p}, \quad \forall u = 1, ZP, \forall p = 1, FP \tag{2.70}$$

et (2.59), (2.60), (2.61).

Sous-problème de distribution A partir des quantités de production et des prix de cessions $pc_{i,u}$ $(i = 1, FV, u = 1, ZP)$, les quantités de distribution peuvent être déterminées en résolvant le problème de transport pour toutes les familles de véhicules i $(i = 1, FV)$. Ce problème de transport est le suivant :

$$minimiser\ f_2(Y, i) = \sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}.\left(pfd_{i,k} + xfd_{i,k}.pc_{i,u}\right) \tag{2.71}$$

sous contraintes

$$\sum_{k=1}^{RD} c_{ku}.Y_{i,k} = P_{i,u}, \tag{2.72}$$

$$\forall u = 1, ZP \tag{2.73}$$

et (2.55), (2.62).

Les contraintes assurent l'équilibre entre les productions et les distributions (2.73), la satisfaction de la demande par les distributions (2.55) et la positivité des quantités distribuées (2.62).

La procédure de décodage proposée peut ne pas obtenir de solution admissible. En effet, selon l'existence des routes d'approvisionnement, le sous-problème d'approvisionnement peut ne pas avoir de solution. De même, selon l'existence des routes de distribution, le problème de distribution peut aussi ne pas avoir de solution. Dans le cas où aucune solution admissible n'est trouvée soit pour le sous-problème d'approvisionnement, soit pour le sous-problème de distribution, l'évaluation de la fonction objectif sera mise à $+\infty$.

Système de voisinage Le système de voisinage proposé est basé sur le transfert de quantités de production d'une famille de véhicules d'une zone de production à une autre zone de production. C'est le système de voisinage VP qui a été présenté en algorithme 6.

Evaluation des solutions Quand la solution est décodée et réalisable (après utilisation de la procédure de réparation si nécessaire), l'évaluation de la solution peut être réalisée avec la formule du calcul de la fonction objectif 2.4.1.4.

Algorithme de principe L'algorithme de principe est présenté en algorithme 10.

Algorithme 10 Algorithme de principe avec le codage sur les productions

Soit P une solution quelconque
Soit *best* la valeur de la meilleure solution trouvée
$best = +\infty$
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément $P' \in VP(P)$
  si $g(P') > 0$ **alors**
    Appliquer la procédure de réparation R
  fin si
  Décoder P' pour définir X, pc et Y.
  si P' n'a pas de solution **alors**
    $f(X,Y) = +\infty$
  sinon si $f(X,Y) \leq best$ **alors**
    $P = P'$
    $best = f(X,Y)$
  fin si
jusqu'à Critère d'arrêt

2.4.5.3.3 Métaheuristique sur les quantités distribuées Nous proposons d'exploiter la structure du problème qui différencie les variables de quantités d'approvisionnement X et les variables des quantité de distribution Y du problème d'approvisionnement-production-distribution en couplant une métaheuristique et un programme linéaire.

La métaheuristique, codée sur les flux de distribution, est chargée de valoriser les $Y_{i,k}$ ($i = 1, FV; k = 1, RD$), les quantités de famille de véhicules i transportées sur la route de distribution k.

La fonction objectif est la suivante :

$$\text{Minimiser } f'(X,Y) = \sum_{i=1}^{FV}\sum_{k=1}^{RD} Y_{i,k}.xfd_{i,k}.\sum_{u=1}^{ZP} c_{k,u}.xcs_{i,u}.\frac{\sum_{j=1}^{RA} b_{j,u}.\sum_{p=1}^{FP} X_{i,j,p}.pfa_{j,p}}{\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i,k'} + \delta_0(\sum_{k'=1}^{RD} c_{k',u}.Y_{i,k'})} \quad (2.74)$$

sous les contraintes de respects des équilibres de flux (2.58), des capacités de sourcing (2.59) et (2.60) et de non négativité des variables (2.61).

L'algorithme de principe de cette méthode est présenté en algorithme 11

2.4.6 Expérimentation

2.4.6.1 Instances de test

Les instances sont générées avec le même principe que pour le problème de répartition sans contrainte de sourcing en ajoutant les données pour l'approvisionnement.

Algorithme 11 Algorithme de principe avec le codage sur les quantités distribuées

Soit (X, Y) une solution admissible
Soit *best* la meilleure valeur connue
$best = +\infty$
répéter
  Choisir aléatoirement et uniformément $Y' \in VD(Y)$.
  si $g(Y') > 0$ **alors**
    Appliquer la procédure de réparation R
  fin si
  Résoudre le programme linéaire pour obtenir les X'.
  si (X', Y') n'a pas de solution **alors**
    $f'(X', Y') = +\infty$
  fin si
  si $f'(X', Y') \leq best$ **alors**
    $(X, Y) = (X', Y')$
  fin si
jusqu'à Critère d'arrêt

	zones			Véhicules et pièces			Technologies
	nb ZA	**nb ZP**	**nb ZC**	**nb FV**	**nb plateforme**	**nb FP**	**nb TP**
A	4	3	5	3	2	280	6
B	4	3	10	4	2	280	7
C	4	3	10	5	2	280	8
D	5	4	10	4	2	280	7
E	5	4	10	5	2	280	8
F	9	8	50	10	3	420	14

Figure 2.25 – Taille des différentes instances de test

Ainsi les différents paramètres retenus pour la génération sont :
- La taille du problème, c'est-à-dire le nombre de ZA, ZP, ZC, FV, FP et TP considérées.
- La densité du réseau, c'est-à-dire le nombre de routes d'approvisionnement et de distribution possibles.
- La structure de coûts, c'est-à-dire la répartition des coûts tout au long de la chaîne logistique.

Nous détaillons maintenant ces différents paramètres :

2.4.6.2 Taille du problème

Différentes tailles de problèmes seront générées pour évaluer les méthodes d'optimisation. La taille des différents problèmes dépend du nombre d'éléments des ensembles des zones d'approvisionnement, de production et de distribution, des familles de véhicules et de pièces et des technologies de production.

Nous définissons maintenant 6 tailles de problèmes en fonction de ces paramètres de génération :

2.4.6.3 Densité du réseau

Pour chaque type de réseau, nous définissons trois densités possibles selon le nombre de routes existantes entre les ZA et ZP et entre les ZP et ZC.
- Un réseau peu dense (noté '1') a entre 70 et 80% des routes d'approvisionnement et de distribution.
- Un réseau moyennement dense (noté '2') a entre 80 et 90% des routes d'approvisionnement et de distribution.
- Un réseau dense (noté '3') a entre 90 et 100% des routes d'approvisionnement et de distribution.

2.4.6.4 Structure de coûts

La structure de coûts, c'est-à-dire la répartition des différents coûts entre les différents processus de la chaîne logistique, reste identiques.

2.4.6.4.1 Différentes structures de coûts On définit 4 structures de coût (de A à D) qui sont différenciées par la répartition des différentes parts :

	Part appro	Part prod fixe	Part prod var	part transp distri	part douan distri
A	60%	10%	6%	4%	20%
B	60%	0%	16%	24%	0%
C	60%	0%	16%	4%	20%
D	60%	10%	6%	24%	0%

2.4.6.5 Paramétrage

Les métaheuristiques présentées sont testées sur 1 000 000 itérations (sans limite de temps sauf quand cela est mentionné) et avec 10 réplications (les résultats présentés sont donc des moyennes notées 'm' avec leur écart-type 's', sauf quand cela est mentionné).

Les résultats des métaheuristiques pour les instances de taille A à taille F sont présentés dans les tableaux 2.26, 2.30, 2.30, 2.32, 2.34 et 2.36. Les deux métaheuristiques appliquées correspondent aux deux métaheuristiques l'une avec un codage sur les quantité de flux (cf. 2.4.5.3.3) noté 'META FLUX' et l'autre avec un codage sur les quantités de production (cf. 2.4.5.3.2) notée 'META PROD'. Chaque méthode a été initialisée avec une solution admissible donnée par un programme linéaire.

Pour chaque méthode et chaque instance, nous donnons le nombre moyen d'itérations sur les 10 réplications pour obtenir la meilleure solution, la moyenne sur les 10 réplications de l'écart relatif en pourcentage entre les meilleures solutions obtenues et la valeur de la borne inférieure, l'écart type sur les 10 réplications de l'écart relatif entre les meilleures solutions obtenues et la valeur de la borne inférieure et la moyenne sur les 10 réplications de l'écart relatif en pourcentage de la valeur de la solution initiale et la valeur de la solution trouvée.

Les heuristiques appliquées sont la programmation non linéaire (cf. 2.4.5.2) notée 'NLP', la programmation linéaire successive (cf. 2.4.5.2.1) notée 'SLP' et la linéarisation de la fonction objectif (cf. 2.4.5.1.1) notée 'LIN'. Ces heuristiques sont déterministes et sont donc testées avec une seule réplication dans les tableaux 2.27, 2.29, 2.31, 2.33, 2.35, 2.37 en donnant les résultats pour les instances des 6 tailles de problèmes. .

Notes : L'heuristique sur la programmation non linéaire n'est plus applicable à partir de la taille d'instance C. La metaheuristique sur les flux dépasse la mémoire disponible à partir des instances de taille F (figure 2.36).

2.4.6.6 Résultats

Nom instance	META PROD				META FLUX			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m	m	m	s	m
A1A	760001	**7,78%**	0,00%	1,29%	71	**7,78%**	0,00%	1,23%
A1B	539601	**1,05%**	0,00%	0,00%	131963	**1,05%**	0,00%	0,00%
A1C	0	**0,66%**	0,00%	0,00%	1	**0,65%**	0,00%	0,01%
A1D	460001	**13,3%**	0,00%	0,16%	60	**13,30%**	0,00%	0,16%
A2A	99815	**18,5%**	0,00%	0,47%	281	**18,5%**	0,00%	0,48%
A2B	0	**0,90%**	0,00%	0,00%	0	**0,90%**	0,00%	0,00%
A2C	394000	**0,49%**	0,00%	0,01%	38	**0,49%**	0,00%	0,01%
A2D	68641	**15,4%**	0,00%	0,77%	117	**15,4%**	0,00%	0,77%
A3A	620001	**15,5%**	0,00%	0,24%	406359	**15,5%**	0,00%	0,24%
A3B	0	**0,57%**	0,00%	0,00%	0	**0,57%**	0,00%	0,00%
A3C	720001	**0,69%**	0,00%	0,00%	1	**0,63%**	0,00%	0,05%
A3D	680001	**16,9%**	0,00%	0,19%	34010	**16,9%**	0,00%	0,19%

Figure 2.26 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille A

Nom instance	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
A1A	**8,91%**	**8,91%**	**8,91%**
A1B	**1,06%**	**1,05%**	**1,05%**
A1C	**0,66%**	**0,66%**	**0,66%**
A1D	**13,48%**	**13,48%**	**13,48%**
A2A	**19,03%**	**19,03%**	**19,03%**
A2B	**0,90%**	**0,90%**	**0,90%**
A2C	**0,50%**	**0,50%**	**0,50%**
A2D	**16,35%**	**16,30%**	**16,30%**
A3A	**15,81%**	**15,54%**	**15,82%**
A3B	**0,71%**	**0,57%**	**0,57%**
A3C	**1,52%**	**0,67%**	**0,67%**
A3D	**17,12%**	**17,12%**	**17,12%**

Figure 2.27 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille A

Nom instance	META PROD				META FLUX			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m	m	m	s	m
B1A	91437	**16,03%**	0,00%	0,00%	294501	**15,9%**	0,00%	0,01%
B1B	620001	**2,44%**	0,00%	0,00%	0	**2,44%**	0,00%	0,00%
B1C	440001	**0,99%**	0,00%	0,01%	1	**0,93%**	0,00%	0,07%
B1D	353231	**14,9%**	0,00%	0,57%	526283	**14,9%**	0,00%	0,57%
B2A	0	**19,1%**	0,00%	0,00%	486893	**18,9%**	0,00%	0,20%
B2B	0	**0,03%**	0,00%	0,00%	0	**0,03%**	0,00%	0,00%
B2C	700001	**0,93%**	0,00%	0,07%	1	**0,91%**	0,00%	0,08%
B2D	560392	**20,6%**	0,00%	0,02%	273	**20,6%**	0,00%	0,02%
B3A	0	**16,2%**	0,00%	0,00%	140469	**16,2%**	0,00%	0,03%
B3B	0	**1,91%**	0,00%	0,00%	0	**1,91%**	0,00%	0,00%
B3C	200001	**1,22%**	0,00%	0,00%	1	**1,19%**	0,00%	0,03%
B3D	694873	**23,2%**	0,00%	0,15%	112781	**23,2%**	0,00%	0,15%

Figure 2.28 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille B

Nom instance	NLP	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI	ER/BI
B1A	16,03%	15,94%	16,03%
B1B	2,44%	2,44%	2,44%
B1C	1,00%	1,00%	1,00%
B1D	15,55%	15,52%	15,55%
B2A	19,10%	19,07%	19,09%
B2B	0,03%	0,03%	0,03%
B2C	0,99%	0,99%	0,99%
B2D	20,62%	20,62%	20,62%
B3A	16,22%	16,22%	16,22%
B3B	1,91%	1,91%	1,91%
B3C	1,23%	1,23%	1,23%
B3D	21,95%	23,35%	23,35%

Figure 2.29 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille B

Nom instance	META PROD				META FLUX			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m	m	m	s	m
C1A	928068	16,7%	0,00%	0,89%	730343	16,7%	0,00%	0,89%
C1B	0	3,57%	0,00%	0,00%	0	3,57%	0,00%	0,00%
C1C	152455	2,09%	0,00%	0,03%	501032	1,90%	0,00%	0,21%
C1D	385290	17,7%	0,00%	0,83%	577261	17,7%	0,00%	0,83%
C2A	56521	23,8%	0,00%	0,02%	129589	23,6%	0,00%	0,16%
C2B	0	6,54%	0,00%	0,00%	0	6,54%	0,00%	0,00%
C2C	0	0,40%	0,00%	0,00%	1	0,38%	0,00%	0,02%
C2D	126858	18,2%	0,00%	0,72%	106013	18,2%	0,00%	0,72%
C3A	820001	18,2%	0,00%	0,37%	860129	18,1%	0,00%	0,46%
C3B	700001	4,10%	0,00%	0,00%	0	4,10%	0,00%	0,00%
C3C	264684	1,17%	0,00%	0,02%	1	1,13%	0,00%	0,06%
C3D	156306	19,0%	0,00%	0,02%	285843	19,0%	0,00%	0,02%

Figure 2.30 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille C

Nom instance	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI
C1A	17,50%	17,69%
C1B	3,57%	3,57%
C1C	2,12%	2,12%
C1D	18,67%	18,67%
C2A	23,74%	23,83%
C2B	6,54%	6,54%
C2C	0,40%	0,40%
C2D	19,08%	19,08%
C3A	18,62%	18,62%
C3B	4,10%	4,10%
C3C	1,19%	1,19%
C3D	19,00%	19,00%

Figure 2.31 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille C

Nom instance	META PROD				META FLUX			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m	m	m	s	m
D1A	0	12,8%	0,00%	0,00%	3800	10,8%	0,00%	1,82%
D1B	600001	3,73%	0,00%	0,00%	0	3,73%	0,00%	0,00%
D1C	159836	3,94%	0,00%	0,00%	122885	3,74%	0,00%	0,15%
D1D	540001	9,76%	0,00%	3,40%	410971	9,76%	0,00%	3,40%
D2A	78699	12,4%	0,00%	0,07%	364	12,4%	0,00%	0,13%
D2B	140001	6,00%	0,00%	0,00%	0	6,00%	0,00%	0,00%
D2C	0	5,35%	0,00%	0,00%	0	5,35%	0,00%	0,00%
D2D	300001	9,39%	0,00%	0,16%	165558	9,41%	0,00%	0,14%
D3A	140001	16,5%	0,00%	0,23%	706888	15,9%	0,00%	0,70%
D3B	180001	3,25%	0,00%	0,00%	0	3,25%	0,00%	0,00%
D3C	40001	11,8%	0,00%	0,00%	365	11,2%	0,00%	0,61%
D3D	60001	24,1%	0,00%	0,03%	127755	24,1%	0,00%	0,03%

Figure 2.32 – Résultats des instances taille D

Nom instance	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI
D1A	12,77%	12,80%
D1B	3,73%	3,73%
D1C	3,89%	3,89%
D1D	13,49%	13,49%
D2A	12,49%	12,49%
D2B	6,00%	6,00%
D2C	5,20%	5,35%
D2D	9,39%	9,56%
D3A	16,67%	16,75%
D3B	3,25%	3,25%
D3C	11,89%	11,89%
D3D	24,10%	24,10%

Figure 2.33 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille D

Nom instance	META PROD				META FLUX			
	nb it	ER/BI		ER/SI	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m	m	m	s	m
E1A	465802	**13,5%**	0,00%	0,00%	49644	**13,0%**	0,00%	0,38%
E1B	45891	**12,6%**	0,00%	0,00%	647	**12,7%**	0,03%	0,17%
E1C	57986	**4,05%**	0,00%	0,07%	1838	**4,10%**	0,04%	0,02%
E1D	106723	**8,81%**	0,00%	0,51%	8728	**8,81%**	0,00%	0,51%
E2A	26947	**17,1%**	0,00%	0,08%	164374	**16,7%**	0,00%	0,10%
E2B	280001	**3,03%**	0,00%	0,13%	218	**3,03%**	0,00%	0,13%
E2C	0	**4,38%**	0,00%	0,00%	123103	**4,38%**	0,00%	0,00%
E2D	490322	**9,16%**	0,00%	0,03%	129710	**9,16%**	0,00%	0,03%
E3A	35317	**17,4%**	0,00%	0,14%	339509	**17,2%**	0,00%	0,32%
E3B	0	**7,19%**	0,00%	0,00%	487042	**7,26%**	0,02%	0,09%
E3C	0	**10,1%**	0,00%	0,00%	31270	**10,0%**	0,00%	0,07%
E3D	73494	**6,77%**	0,00%	0,42%	182950	**6,77%**	0,00%	0,42%

Figure 2.34 – Résultats des instances taille E

Nom instance	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI
E1A	13,39%	13,39%
E1B	12,61%	12,61%
E1C	4,12%	4,12%
E1D	9,37%	9,37%
E2A	17,06%	17,06%
E2B	3,17%	3,17%
E2C	4,38%	4,38%
E2D	9,16%	9,20%
E3A	17,48%	17,54%
E3B	7,19%	7,19%
E3C	10,07%	10,08%
E3D	7,22%	7,22%

Figure 2.35 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille E

Nom instance	META PROD			
	nb it	ER/BI		ER/SI
		m	s	m
F1A	0	10,5%	0,00%	0,00%
F1B	10303	6,35%	0,00%	0,01%
F1C	0	7,59%	0,00%	0,00%
F1D	5188	14,0%	0,00%	0,02%
F2A	2321	14,6%	0,00%	0,11%
F2B	1	16,3%	0,00%	0,00%
F2C	0	13,0%	0,00%	0,00%
F2D	34	17,4%	0,00%	0,17%
F3A	0	14,8%	0,00%	0,00%
F3B	1863	21,0%	0,00%	0,00%
F3C	0	22,4%	0,00%	0,00%
F3D	9771	21,9%	0,00%	0,95%

Figure 2.36 – Résultats des métaheuristiques sur les instances de taille F

Nom instance	SLP	LIN
	ER/BI	ER/BI
F1A	10,52%	10,54%
F1B	6,36%	6,36%
F1C	7,56%	7,59%
F1D	13,98%	13,98%
F2A	14,51%	14,68%
F2B	16,33%	16,33%
F2C	12,86%	12,98%
F2D	17,56%	17,56%
F3A	14,79%	14,79%
F3B	21,02%	21,02%
F3C	22,31%	22,40%
F3D	23,02%	23,02%

Figure 2.37 – Résultats des heuristiques sur les instances de taille F

	PROD	FLUX	NLP	SLP	LIN
A	7,65%	7,64%	8,00%	7,89%	7,92%
B	9,79%	9,75%	9,76%	9,86%	9,87%
C	10,95%	10,91%	impossible	11,21%	11,23%
D	9,91%	9,63%	impossible	10,24%	10,28%
E	9,51%	9,44%	impossible	9,60%	9,61%
F	14,98%	impossible	impossible	15,07%	15,10%

Figure 2.38 – Synthèse générale des résultats sur les différentes tailles d'instance

2.4.6.7 Analyse des résultats avec contraintes de sourcing

Comme réalisé pour le problème de répartition sans contrainte de sourcing, nous analysons les résultats de la campagne de test avec contraintes de sourcing. Cette analyse traite à la fois la performance et la durée des méthodes d'optimisation.

2.4.6.7.1 Performance des méthodes de résolution La distance moyenne entre les solutions trouvées et les bornes inférieures sont présentées en figure 2.39.

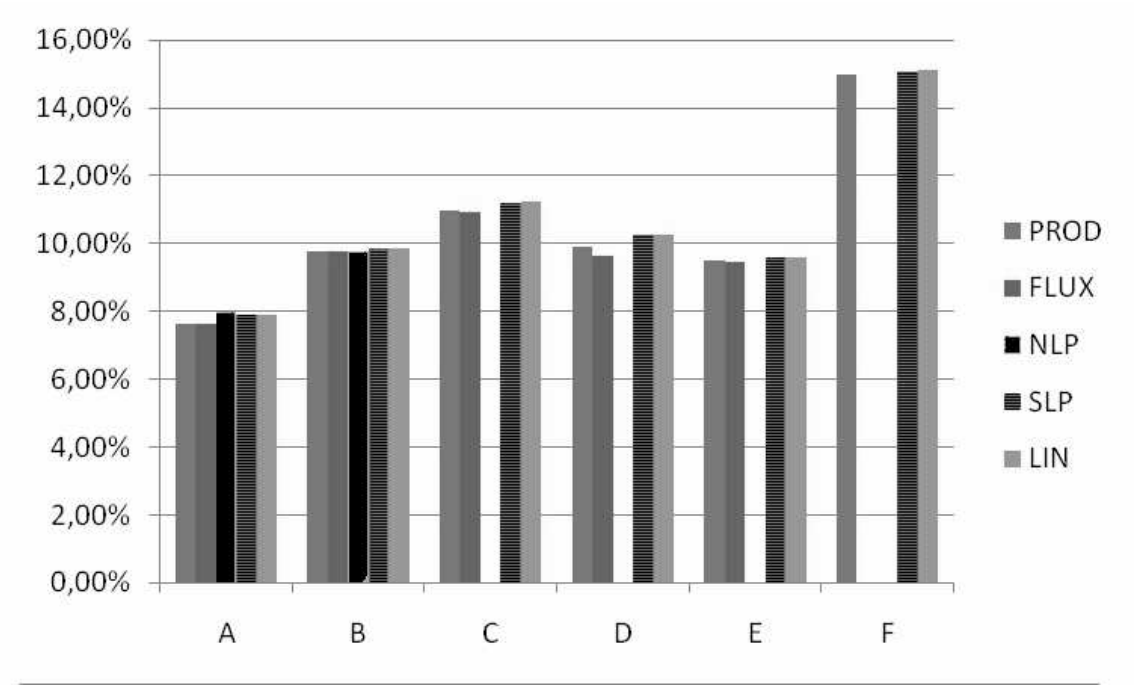


Figure 2.39 – Graphique de la synthèse générale

Suite à cette seconde campagne de test, nous observons les remarques suivantes sur la performance des méthodes :

- La programmation non linéaire est limitée aux tailles d'instance A et B.
- La métaheuristique sur les flux n'est plus opérationnelle au-delà de la taille d'instance E.
- Entre les deux metaheuristiques, celle sur les flux de distribution semble légèrement meilleure.

2.4.6.8 Durée des méthodes de résolution

La figure 2.40 présente la durée moyenne des différentes méthodes. Les durées des résultats des métaheuristiques sur les flux (notés FLUX) et sur les productions (notés PROD) ont été moyennées.

La durée du calcul conserve les tendances de la campagne de test sans contrainte de sourcing :

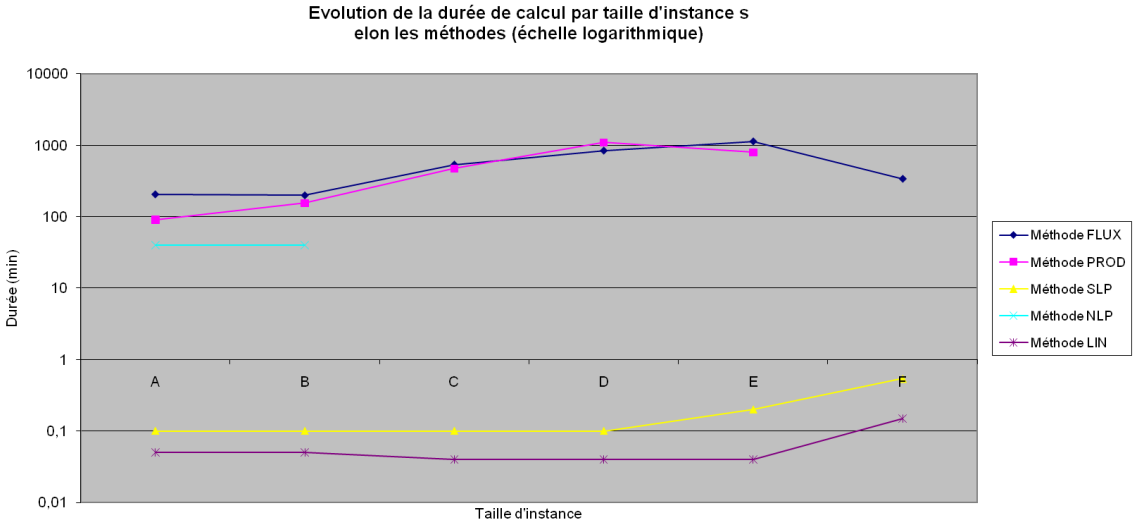


Figure 2.40 – Durées de calcul

- Les méthodes de linéarisation et SLP sont rapides quelle que soit la taille des instances.
- Les métaheuristiques ont une durée qui croit assez rapidement selon la taille des instances.

2.4.6.9 Conclusion de l'analyse avec constrainte de sourcing

A l'issue de cette seconde campagne de test avec contrainte de sourcing, nous concluons que selon le critère principal de l'utilisateur : temps de réponse ou qualité de la solution ; à la fois les méthodes heuristiques basées sur la programmation linéaire et les métaheuristique sont utilisables. Ces méthodes sont même complémentaires car les solutions approchées trouvées rapidement par les méthodes heuristiques peuvent servir de solution initiales pour les métaheuristiques.

Le problème de répartition stratégique avec contraintes de sourcing et les méthodes de résolution proposées ont été acceptées à la conférence ILS2010 [SGNG10a].

2.5 Conclusion

La répartition stratégique organise à horizon stratégique le système industriel dans les contraintes définies par les investissements industriels. Ce problème d'optimisation doit être résolu pour évaluer précisément l'impact industriel d'une décision d'investissement. Ainsi nous avons proposé un modèle de connaissance de la répartition stratégique appliquée à PSA. Nous avons alors distingué deux problèmes de répartition, un premier problème sans contrainte de sourcing et un second problème avec contraintes de sourcing. Dans les deux cas, le modèle de connaissance a permis de formuler un modèle de mathématique suivi d'une revue de littérature. Nous avons trouvé que dans la littérature, ce problème est généralement considéré comme facile car il est assimilé à un problème de multi-flots facilement résolu avec la programmation linéaire. Cependant, à partir du modèle de connaissance du système industriel de PSA, nous avons découvert une difficulté de résolution liée à la non-convexité de l'évaluation économique du problème. Pour les deux problèmes, aucune méthode exacte d'optimisation globale n'est vraiment performante sur des instances de la taille de notre problème industriel. Nous avons donc proposé des heuristiques et des métaheuristiques, souvent hybridées avec de la programmation linéaire, que nous avons testées et comparées sur des instances générées. Les métaheuristiques proposées sont prometteuses mais ont pour désavantage une durée de calcul qui augmente rapidement avec la taille des instances traitées. Par ailleurs, les méthodes heuristiques (linéarisation, programmation linéaire successive) proposées sont plus rapides mais obtiennent des résultats globalement de moins bonne qualité. Enfin, la méthode de programmation non linéaire est rapidement limitée en

taille d'instance et en qualité de résultats. Cette analyse est valable pour les problèmes sans et avec contrainte(s) de sourcing.

En perspective d'amélioration, il est possible de continuer à utiliser des propriétés mathématiques du problèmes, notamment l'ensemble des contraintes linéaires, pour définir des voisinages encore plus pertinants (étude du polyèdre des contraintes pour limiter au maximum l'exploration de solutions sous-optimales). De plus, l'application d'une métaheuristique basée sur une population, et non plus une unique solution, pourrait offrir de nouvelles possibilité (croisement, diversification/intensification....) lors de la phase de recherche. Ainsi selon les priorités des utilisateurs (temps de réponse ou qualité de la solution), les différentes méthodes peuvent être utilisées.

Avant de présenter le problème de planification stratégique avec investissements en chapitre suivant, nous pouvons conclure que les heuristiques donnent globalement de bonnes solutions dans des temps raisonables, notamment pour l'approche de programmation linéaire successive mais que la recherche d'une certaine qualité de solution pousse à utiliser les métaheuristiques.

Chapitre 3

La planification stratégique

La chose la plus miséricordieuse en ce bas monde est l'incapacité de l'esprit humain à mettre en corrélation toutes les informations qu'il contient. *H. P. Lovecraft*

Sommaire

3.1 Introduction 101
3.2 Modèle de connaissance 102
3.2.1 Généralités 102
3.2.2 Sous-système physique 102
3.2.3 Sous-système logique 103
3.2.4 Sous système décisionnel 106
3.3 Etat de l'art 116
3.3.1 La planification stratégique du réseau logistique 116
3.3.2 Analyse de la littérature 119
3.3.3 Méthodes d'optimisation 124
3.3.4 Offre logicielle 126
3.4 Formalisation mathématique 131
3.4.1 Ensembles 132
3.4.2 Paramètres 132
3.4.3 Variables 134
3.4.4 Fonction objectif 134
3.4.5 Contraintes 134
3.4.6 Modélisation des investissements 136
3.5 Méthodes de résolution 136
3.5.1 Heuristique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers successive 136
3.5.2 Métaheuristique 138
3.6 Conclusion 140

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la conception du réseau logistique et à la planification du réseau logistique ainsi conçu. En effet, il est nécessaire d'étudier l'impact des investissements en capacité de production et en capacité d'approvisionnement sur l'exploitation du réseau logistique car ces décisions, prises très en amont, vont structurer durablement la chaîne logistique et avoir un impact majeur sur sa performance économique. Ainsi le modèle de planification stratégique du réseau logistique s'intéresse à la fois aux décisions d'investissement en capacités (production et approvisionnement) et à la planification, sur plusieurs périodes, des activités d'approvisionnement, de production et de distribution.

Par la suite, nous présentons d'abord le modèle de connaissance de la planification stratégique du réseau logistique. Ce modèle de connaissance est fortement lié à celui de la répartition stratégique. Puis, un état de l'art sur les modèles et les méthodes présents dans la littérature est proposé. Ensuite, une formalisation mathématique du problème est donnée. Enfin, des méthodes de résolution sont proposées.

3.2 Modèle de connaissance

3.2.1 Généralités

La modélisation temporelle est réalisée en discrétisant le temps à l'aide de **périodes**.

A chaque période, un *coefficient de dépréciation monétaire* (%) sert à l'actualisation des coûts. Les différents coûts ne sont pas donnés par périodes ; ils sont indiqués pour une période de référence. Pour une période donnée, le coût est obtenu en multipliant le coût de la période de référence par le coefficient de dépréciation monétaire de la période.

L'ensemble des périodes va constituer un **horizon de planification**.

3.2.2 Sous-système physique

Nous étudions une chaîne logistique constituée de zones reliées entre elles par des routes. On distingue trois types de zones :

- Les **zones d'approvisionnement** qui sont les zones considérées pour acheter des familles de pièces. Elles sont désignées par leur *nom*.
- Les **zones de production** sont les zones considérées pour réaliser la production des familles de véhicules. Chaque zone de production est désignée par son *nom*. Un *nombre de jours ouvrés* annuel (en jours) est défini par zone de production.
- Les **zones de commercialisation** qui sont les zones considérées pour la vente des familles de véhicules. Elles sont définies par leur *nom*.

Chaque zone de production dispose d'une zone d'approvisionnement considérée comme *locale*, c'est-à-dire géographiquement proche de celle-ci.

Entre une zone d'approvisionnement et une zone de production, une **route d'approvisionnement** peut exister : cela traduit une possibilité de transport de la zone d'approvisionnement vers la zone de production. Ainsi cette route dispose d'un *prix de transport* par unité transportée (en m^3) et d'un délai d'approvisionnement (en h). De plus, une route d'approvisionnement impose différents stocks de sécurité :

- Un *stock de sécurisation* du transport déterminé à partir d'un niveau de stock de sécurisation (en h) permet de pallier aux aléas de transport à proximité de la zone de production,
- Un *stock de fonctionnement* avec un niveau de stock de fonctionnement (en h) est défini pour pallier aux aléas du transport international.

De plus, un *coefficient de transport d'urgence* (sans unité) est défini pour valoriser le coût des transports d'urgence (i.e. taxi, hélicoptère) parfois nécessaires pour éviter les ruptures d'approvisionnement. Un *délai d'approvisionnement* (h) définit le temps moyen de transport sur cette route.

De même, entre une zone de production et une zone de commercialisation une **route de distribution** peut être définie. La route de distribution est caractérisée par un *prix de transport* (en €) au véhicule et un *délai de distribution* (en h).

La structure du sous-système physique (constitué de zones d'approvisionnement, de zones de production, de zones de commercialisation, de routes d'approvisionnement, de routes de distribution et de technologies de production) reste inchangée sur l'horizon de planification.

Des **technologies de production** sont disponibles pour réaliser les activités nécessaires à la production des véhicules. Ces technologies sont caractérisées par leur *nom*. Une technologie de production peut être *spécifique* à une famille de véhicules. Cela indique que cette technologie de production est une condition nécessaire pour pouvoir produire la famille de véhicules.

Une technologie de production disponible sur une zone de production est une **ressource de production.** Les ressources ont des *frais fixes* (en €) et des *frais variables* (en €/vhl) pour leur utilisation. Une *ressource de production* peut être existante ou potentielle :

- Une **ressource de production existante** a des *frais d'investissement restants* (€) et une *durée d'amortissement restante* (en nombre de périodes). Une ressource de production existante a des *capacités de production minimum* et des *capacités de production maximum* dépendantes de la période.
- Une **ressource de production potentielle** a des frais d'investissement (€) pour son ouverture, qui seront amortis sur une *durée d'amortissement* (en périodes) à partir de la période où elle est investie. Toutes les ressources de production potentielles ont la même *durée d'amortissement.*

Une ressource de production potentielle a une *capacité de production minimum* et une *capacité de production maximum* indépendantes de la période.

3.2.3 Sous-système logique

Les **familles de pièces** sont des agrégats de pièces caractérisés par un *nom* et un *incoterm* qui déterminera comment se déroulera son transfert de propriété avec le fournisseur (il définira si le coût d'acquisition intègre le transport et ses sécurisations et la douane dans le cas d'un système d'ordre synchrone). De plus, un *volume d'emballage* (en m^3) est défini à partir de l'emballage nécessité par la famille de pièces lors de son transport.

Certaines familles de pièces sont dites *synchrones* quand ce système d'ordre leur est imposé ; ce qui oblige, pour une production données, à sourcer ces familles de pièces dans la zone d'approvisionnement locale à la zone de production.

Une famille de pièces disponible auprès d'une zone d'approvisionnement constitue une **source d'approvisionnement**. Elle a un prix d'acquisition (en €/pc) unitaire. Nous distinguons deux types de *sources d'approvisionnement* selon qu'elles sont existantes ou potentielles :

- Une **source d'approvisionnement existante** a des *frais d'investissements restants* (€) et une *durée d'amortissement restante* (en nombre de périodes). Les sources d'approvisionnement existantes ont une *capacité d'approvisionnement minimum* et une *capacité d'approvisionnement maximum* dépendantes de la période.
- Une **source d'approvisionnement potentielle** a des *frais d'investissement* (€) et une *durée d'amortissement* (en périodes). Elle sera amortie sur une durée d'amortissement à partir de la période où elle est investie. Toutes les sources d'approvisionnement potentielles ont la même *durée d'amortissement.*

Les sources d'approvisionnement potentielles ont une *capacité d'approvisionnement minimum* et une *capacité d'approvisionnement maximum* indépendantes de la période.

Les **familles de véhicules** sont des agrégats de véhicules caractérisés par un *nom* et un *coefficient de gabarit* (sans unité) pour évaluer un encombrement par rapport à un véhicule de réference.

Pour une famille de véhicules, on peut déterminer des **liens de nomenclature** avec des familles de pièces. Ces liens déterminent des *coefficients de nomenclature* pour définir la quantité (en pc) d'une famille de pièces nécessaire à la réalisation d'un véhicule d'une famille de véhicules.

Le transport d'une famille de pièces sur une route d'approvisionnement peut demander de traverser une **douane d'approvisionnement** et imposer l'application d'un *taux de douane.*

Lors du transport d'une famille de pièces sur une route d'approvisionnement, on utilise un **emballage** pour protéger les marchandises. Cet emballage est caractérisé par un *prix d'emballage* (en €/pc).

Le transport de familles de pièces achetées pour une famille de véhicules et empruntant une route d'approvisionnement à une période donnée est un **flux d'approvisionnement**. Il est caractérisé par une *quantité de flux d'approvisionnement* (en pc) transportée par ce flux d'approvisionnement. Cette valeur permettra de calculer les stocks liés aux transports tels qu'une *quantité de stock de fonctionnement* (en pc), une *quantité de stock de sécurisation* (en pc) et une *quantité d'encours d'approvisionnement* (en pc). Différents coûts sont aussi calculés au niveau des flux d'approvisionnement, tels

que :

1. un *coût d'acquisition* (en €) correspondant au transfert de propriété des pièces,
2. un *coût de transport* (en €) correspondant au coût de déplacement des pièces de la zone d'approvisionnement à la zone de production,
3. un *coût d'emballage* (en €) correspondant à l'utilisation de transconteneur pour le transport maritime (protection des pièces, mise en transconteneur...),
4. un *coût de transport d'urgence* (en €) lié aux livraisons en urgence (taxi, hélicoptère) pouvant survenir lors d'un aléa de transport, un incident 'qualité' ou une surconsommation,
5. un *coût de douane* (en €) lors du changement d'union douanière,
6. des *frais de stock de fonctionnement* (en €) correspondant au stock pour pallier aux aléas du transport intercontinental,
7. des *frais d'encours* (en €) correspondant à l'immobilisation dûe au temps de transport,
8. des *frais de stock de sécurisation* (en €) pour pallier aux aléas du transport de proximité,

Ces différents coûts permettront de définir le *coût rendu* (en €).

La **production** des familles de véhicules est réalisée sur une zone de production à une période donnée. Cette production est caractérisée par une *quantité de production* (en vhl) et par différents indicateurs économiques comme les *frais généraux* (en €/vhl), la *masse achat* (en €/vhl), le *complément logistique* (en €/vhl) et la *valeur ajoutée* (en €/vhl) de cette production. Ces coûts permettront de définir un *prix de revient de fabrication* (en €/vhl). Après affectation d'un *coefficient de cession* (par exemple, la marge commerciale), on obtiendra le *prix de cession* (en €/vhl) pour une famille de véhicules, pour une zone de production et pour une période.

Chaque production d'une famille de véhicules nécessite un certain nombre d'**activités de production**, chacune d'une certaine technologie. Ces activités sont caractérisées par un *coefficient de charge* de travail (sans unité) par rapport à la charge imposée par un véhicule de référence.

Le transport d'une famille de véhicules sur une route de distribution peut entraîner le passage en **douane de distribution** et l'application d'un *taux de douane*.

Le transport d'une famille de véhicules sur une route de distribution à une période donnée définit un **flux de distribution**. Un flux de distribution est caractérisé par une *quantité de flux de distribution* (en vhl) dont on déduit une *quantité d'encours de distribution* (en vhl). Différents coûts sont évalués sur un flux de distribution comme le *coût de cession* (en €), le *coût de transport* (en €), le *coût de douane* (en €) et les *frais d'encours* (en €). Cela permettra de définir *un coût rendu de distribution* (en €).

Des *prévisions de vente* (en vhl) sont connues pour des **distributions** c'est-à-dire pour une zone de commercialisation donnée et une famille de véhicules donnée. Les prévisions de vente pour une famille de véhicules et une zone de commercialisation sont dépendantes de la période.

La nomenclature liant les familles de véhicules et les familles de pièces reste inchangée sur l'horizon de planification : le nombre de familles de pièces et de familles de véhicules et les liens de nomenclature asssociés sont constants.

Nous reprenons du modèle précédent le prix flux d'approvisionnement (€/pc) correspondant au prix rendu d'approvisionnement pour une unité d'une famille de pièces sur un flux d'approvisionnement. Ce prix est indépendant de la période mais sera actualisé pour prendre en compte la dépréciation monétaire.

De même, les prix flux de distribution (€/vhl) et les coefficients de flux de distribution (/) sont utilisés pour valoriser les flux de distribution. Ces éléments sont indépendants de la période mais seront actualisés pour prendre en compte la dépréciation monétaire.

Les classes étudiées et leurs relations sont synthétisés en figure 3.1.

Notons que les aspects temporels sont intégrés dans ce modèle via la description de tableaux indéxés par la période ; par exemple, $quantite_flux_distri[h]$ pour les quantités de flux distribués à une période h donnée.

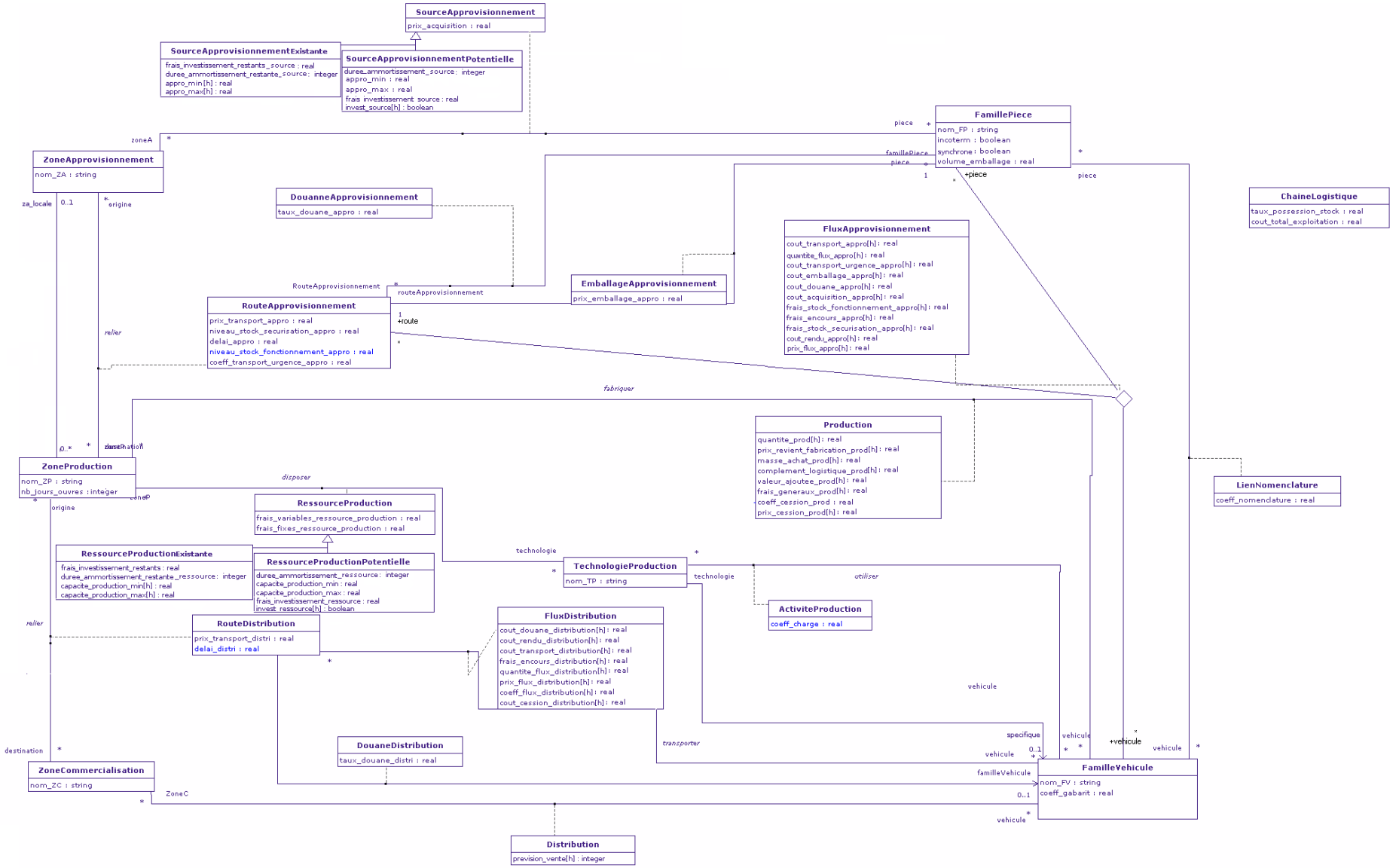


Figure 3.1 – Diagramme de classes du modèle de connaissance

3.2.4 Sous système décisionnel

Nous utiliserons les notations suivantes :

Description des ensembles	Ensemble	Indice
Ensemble des zones de commercialisation	ZC	v
Ensemble des zones de production	ZP	u
Ensemble des zones d'approvisionnement	ZA	s
Ensemble des familles de véhicules	FV	i
Ensemble des technologies de production	TP	t
Ensemble des routes de distribution	RD	k
Ensemble des routes d'approvisionnement	RA	j
Ensemble des familles de pièces	FP	p
Ensemble des périodes	H	h

Remarques : Afin de simplifier les notations, nous avons choisi la convention suivante : un attribut sera représenté par le nom de l'attribut indicé par le ou les objet(s) s'y rapportant. Par exemple, $quantite_prod_{h,i,u}$ désigne l'attribut *quantite_prod* de l'instance de la classe Production, classe d'association entre la zone de production u, la famille de véhicules i et la période h. De même, $origine(j)$ désigne la zone d'approvisionnement ayant le rôle 'origine' pour l'instance j de la classe route d'approvisionnement.

L'ensemble des décisions sont synthétisées dans un plan de montage stratégique secondé par un plan d'investissement. Ce plan de montage indique les productions, c'est-à-dire les quantités de familles de véhicules produites sur les zones de production. Ce plan de montage est réalisé de manière cohérente avec le plan d'investissement indiquant les évolutions en termes de capacités de production ou d'achat. Les investissements vont donc définir les contraintes inhérentes au plan de montage. A partir de ce plan de montage, l'ensemble de la chaîne logistique est synchronisée grâce au lien entre la production de familles de véhicules, les flux de familles de pièces approvisionnées des zones d'approvisionnement aux zones de production et les flux de familles de véhicules distribuées des zones de production aux zones de commercialisation.

La réalisation d'un plan de montage donne des valeurs aux attributs suivants :

$quantite_prod_{h,i,u}$: quantité (en vhl) de la famille de véhicules i produite sur la zone de production u à la période h.

$quantite_flux_appro_{h,i,j,p}$: quantité (en pc) de la famille de pièces p transportée sur la route d'approvisionnement j pour assembler des véhicules de la famille de véhicules i à la période h.

$quantite_flux_distri_{h,i,k}$: quantité (en vhl) de la famille de véhicules i transportée sur la route de distribution k à la période h.

Parallèlement, la réalisation d'un plan d'investissement donne des valeurs aux attributs suivants :

$invest_source_{h,p,s}$: est égal à 1 si on décide d'investir la famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s à la période h.

$invest_ressource_{h,t,u}$: est égal à 1 si on décide d'investir la technologie de production t sur la zone de production u à la période h.

Les contraintes suivantes sont nécessaires à planification de la chaîne logistique étudiée :

3.2.4.1 Possibilités d'investissement limitées

Les ouvertures correspondent à des investissements qui sont amortis sur une période correspondant au délai d'amortissement. Les investissements ne sont possibles qu'à des périodes laissant suffisamment de temps à l'investissement d'être amorti complètement sur la fin de l'horizon. De plus, nous ne considérons que la possibilité d'investissement et non le cas de desinvestissement (fermeture d'une usine...).

3.2.4.2 Investissement des sources de familles de pièces synchrones consécutivement à l'affectation d'une nouvelle famille de véhicules

L'ouverture de certaines ressources de production imposent l'investissement simultané de sources d'approvisionnement liées aux familles de pièces caractérisées comme 'synchrone' .

Soit $local(u)/u \in ZP$ la zone d'approvisionnement à proximité de la zone de production u.
Soit $synchrone(t)/t \in TP$ l'ensemble des familles de pièces livrées en synchrone lorsque la technologie de production t est installée ($synchrone(t) \subset FP$).

$$\begin{aligned} &invest_source_{h,p,s} = invest_ressource_{h,t,u} \\ &\forall t \in TP, u \in ZP, s = local(u), p \in synchrone(t), h \in H \end{aligned} \tag{3.1}$$

3.2.4.3 Satisfaction de la demande commerciale

Les flux de distribution doivent répondre exactement aux prévisions des quantités de familles de véhicules au niveau des zones de commercialisation à chaque période.

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in RD/destination(k)=v} quantite_flux_distri_{h,i,k} = prevision_vente_{h,i,v} \\ &\forall i \in FV, v \in ZC, h \in H \end{aligned} \tag{3.2}$$

3.2.4.4 Conservation des flux au niveau des zones de production

Pour respecter la nomenclature des familles de véhicules au niveau des zones de production, il faut respecter la contrainte d'équilibre entre les flux d'approvisionnement et les flux de distribution à chaque période.

$$\begin{aligned} &\sum_{k \in RD/origine(k)=u} quantite_flux_distri_{h,i,k}.coeff_nomenclature_{i,p} \\ &= quantite_prod_{h,i,u}.coeff_nomenclature_{i,p} \\ &= \sum_{j \in RA/destination(j)=u} quantite_flux_appro_{h,i,j,p}, \forall i \in FV, p \in FP, u \in ZP, h \in H \end{aligned} \tag{3.3}$$

3.2.4.5 Respect des capacités de production existantes

Pour une période, pour une technologie donnée et sur une zone de production, la charge totale de travail est la somme, pour toutes les familles de véhicules produites sur la zone de production, de la quantité produite, corrigée par le coefficient de charge de la technologie pour la famille de véhicules. Cette charge totale doit respecter la capacité minimale et la capacité maximale de la ressource de production existante de la zone de production ayant la technologie considérée.

$$\begin{aligned} &capacite_min_{h,t,u} \leqslant \sum_{i \in FV} quantite_prod_{h,i,u}.coeff_charge_{i,t} \\ &\forall t \in TP, u \in ZP, (t,u) existant, h \in H \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{i \in FV} quantite_prod_{h,i,u}.coeff_charge_{i,t} \leqslant capacite_max_{h,t,u} \\ &\forall t \in TP, u \in ZP, (t,u) existant, h \in H \end{aligned} \tag{3.5}$$

3.2.4.6 Respect des capacités de production potentielles

Pour les ressources de production potentielles, la contrainte de capacité de production ne s'applique que sur les ressources ouvertes avant ou à la période d'étude.

$$\sum_{h'=1}^{h} invest_ressource_{h',t,u}.capacite_min_{t,u} \leqslant \sum_{i \in FV} quantite_prod_{h,i,u}.coeff_charge_{it} \quad (3.6)$$
$$\forall t \in TP, u \in ZP, (t,u) potentiel, h \in H$$

$$\sum_{i \in FV} quantite_prod_{h,i,u}.coeff_charge_{i,t} \leqslant \sum_{h'=1}^{h} invest_ressource_{h',t,u}.capacite_max_{t,u} \quad (3.7)$$
$$\forall t \in TP, u \in ZP, (t,u) potentiel, h \in H$$

3.2.4.7 Respect des capacités d'approvisionnement existantes

Pour une famille de pièces donnée et sur une zone d'approvisionnement donnée, la quantité approvisionnée est bornée par une capacité d'approvisionnement minimum et par une capacité d'approvisionnement maximum correspondant à la période concernée.

$$appro_min_{h,p,s} \leqslant \sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \quad (3.8)$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, (p,s) existant, h \in H$$

$$appro_max_{h,p,s} \geqslant \sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \quad (3.9)$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, (p,s) existant, h \in H$$

3.2.4.8 Respect des capacités d'approvisionnement potentielles

Pour une source d'approvisionnement potentielle, la contrainte des capacités d'approvisionnement n'est appliquée que sur les sources ouvertes avant ou à la période d'étude.

$$\sum_{h'=1}^{h} invest_source_{h',p,s}.appro_min_{p,s} \leqslant \sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \quad (3.10)$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, (p,s) potentiel, h \in H$$

$$\sum_{j \in RA/origine(j)=s} \sum_{i \in FV} quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \leqslant \sum_{h'=1}^{h} invest_source_{h',p,s}.appro_max_{p,s} \quad (3.11)$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, (p,s) potentiel, h \in H$$

3.2.4.9 Respect des familles de pièces synchrones

Les familles de pièces synchrones nécessaires à la production d'une famille de véhicules sur une zone de production doivent être investies dans la zone d'approvisionnement locale à ladite zone de production. Cela implique que, quand l'investissement d'une ressource de production d'une technologie de production spécifique à une famille de véhicule est réalisé, les investissements de sources d'approvisionnement des familles de pièces synchrones de la famille de véhicules sont investis simultanément dans la zone d'approvisionnement locale à la zone de production de la ressource de production.

$$invest_source_{h,p,s} \geq invest_ressource_{h,t,u}$$
$$\forall h \in H, t \in TP, i \in FV/specifique(t) = i, u \in ZP, p \in FP/synchrone(p) = 1, s \in ZA/locale(u) = s \quad (3.12)$$

3.2.4.10 Evaluation économique de la Chaîne Logistique

L'évaluation de la chaîne logistique demande de calculer, de manière la plus exhaustive possible, tous les coûts liés à l'approvisionnement, à la production et à la distribution.

3.2.4.11 Evaluation des coûts d'approvisionnement

Pour un flux d'approvisionnement, les coûts suivants sont évalués :
- Part d'amortissement d'une source d'approvisionnement existante
- Part d'amortissement d'une source d'approvisionnement potentielle
- Coût d'acquisition du flux d'approvisionnement
- Coût de transport d'urgence du flux d'approvisionnement
- Coût de transport du flux d'approvisionnement
- Coût d'emballage du flux d'approvisionnement
- Coût de douane du flux d'approvisionnement
- Frais de sécurisation du flux d'approvisionnement
- Frais de stock de fonctionnement du flux d'approvisionnement
- Frais d'encours du flux d'approvisionnement

Part d'amortissement d'une source d'approvisionnement existante A une période donnée, lorsqu'une source d'approvisionnement est existante et n'a pas été encore totalement amortie, une part des frais d'amortissement de la période est affectée à l'achat d'une pièce.

$$part_amort_source_existante_{h,p,s} = \begin{cases} 0 \text{ si } h > duree_amort_source_restant_{p,s} + min_{h' \in H}(h') \\ \frac{frais_invest_source_restant_{p,s}}{duree_amort_source_restant_{p,s}. \sum_{i' \in FV} \sum_{j' \in RA/origine(j')=s} quantite_flux_appro_{h,i',j',p}} \quad autrement \\ \forall s \in ZA, p \in FP, (s,p) existant, h \in H \end{cases} \tag{3.13}$$

Part d'amortissement d'une source d'approvisionnement potentielle A une période donnée, lorsqu'un investissement a été réalisé pour mettre en place une source d'approvisionnement, une part d'amortissement des frais d'investissement est affectée à l'achat d'une pièce auprès de cette source. Cette part correspond aux frais d'investissement de la période divisés par la quantité totale de pièces achetées à cette même source à la même période.

$$\begin{aligned} &part_amort_source_potentielle_{h,p,s} = \\ &\frac{frais_invest_source_{ps}. \sum_{h' \in H/h' \geq h - duree_amort_source + 1 \ et \ h' \leq h} invest_source_{h',p,s}}{duree_amort_source. \sum_{i' \in FV} \sum_{j' \in RA/origine(j)=s} quantite_flux_appro_{h,i',j',p}} \\ &\forall s \in ZA, p \in FP, (p,s) potentiel, h \in H \end{aligned} \tag{3.14}$$

Coût d'acquisition A une période donnée, le coût d'acquisition correspond à ce que PSA paie pour devenir propriétaire des familles de pièces p sur le flux d'approvisionnement utilisant la route d'approvisionnemnet j à destination de l'assemblage de la famille de véhicules i. Le coût d'acquisition d'un flux est le produit du prix d'acquisition (en €/pc) de chaque famille de pièces p à la zone d'approvisionnement à l'origine de la route d'approvisionnement j par la quantité (en m^3) de famille de pièces constituant le flux.

$$\begin{aligned} cout_acquisition_{h,i,j,p} &= prix_aquisition_{p,origine(j)}.quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.15}$$

Coût de transport d'urgence Un coefficient de transport d'urgence est calculé à partir d'un retour d'expérience et caractérise les routes en fonction du pays d'origine et de destination. A une période donnée, ce coefficient est à appliquer au coût d'acquisition du flux d'approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_transport_urgence_appro_{h,i,j,p} = \\ &coeff_transport_urgence_j.cout_acquisition_{h,i,j,p}.quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.16}$$

Le coût de transport d'urgence est un surcoût de transport uniquement. Il n'est ni compté dans le coût de douane, ni valorisé dans les stocks.

Coût de transport A une période donnée, le coût de transport d'un flux d'approvisionnement est le produit du prix unitaire de transport du flux (€/m^3) par la quantité de famille de pièces (pc) circulant sur le flux multiplié par le volume de son emballage (m^3/pc).

$$\begin{aligned} &cout_transport_appro_{h,i,j,p} = \\ &volume_emballage_p.prix_transport_appro_j.quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.17}$$

Coût d'emballage A une période donnée, le coût d'emballage d'un flux d'approvisionnement est le produit du prix d'emballage unitaire d'une famille de pièces (€/pc) sur une route d'approvisionnement multiplié par la quantité transportée (pc) sur le flux d'approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_emballage_appro_{h,i,j,p} = prix_emballage_appro_{j,p}.quantite_flux_appro_{h,i,j,p} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.18}$$

Coût de douane appro A une période donnée, le coût de douane d'un flux d'approvisionnement est calculé à partir de la valeur en douane de la famille de pièces formant le flux sur laquelle est appliqué le taux de douane. Cette valeur en douane est définie comme la somme du coût d'acquisition, du coût de transport du flux d'approvisionnement et du coût d'emballage approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_douane_appro_{h,i,j,p} = \\ &taux_douane_appro_{j,p}.(cout_acquisition_{h,i,j,p} + \\ &cout_transport_appro_{h,i,j,p} + cout_emballage_appro_{h,i,j,p}) \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.19}$$

Frais de stock de sécurisation approvisionnement A une période donnée, les frais de sécurisation correspondent aux frais financiers du stock de sécurisation vis-à-vis des aléas de transport sur une route d'approvisionnement donnée (avec un niveau de stock de sécurisation donné) des flux d'approvisionnement. Ces frais correspondent à l'immobilisation financière de la valeur des pièces (prix d'achat) par un taux de possession de stock.

$$\begin{aligned} &frais_stock_securisation_appro_{h,i,j,p} = \\ &\frac{niveau_stock_securisation_appro_j.quantite_flux_appro_{h,i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.20}$$

Frais de stock de fonctionnement d'un flux d'approvisionnement A une période donnée, les frais de stock de fonctionnement d'un flux d'approvisionnement sont les frais financiers liés aux niveaux de stock de fonctionnement nécessaires pour la sécurisation des transports trans-continentaux entre des zones d'approvisionnement et des zones de production très éloignées.

$$frais_stock_fonctionnement_appro_{h,i,j,p} = \frac{niveau_stock_fonctionnement_appro_j.quantite_flux_appro_{h,i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}$$
$$\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \tag{3.21}$$

Frais d'encours d'approvisionnement d'un flux d'approvisionnement A une période donnée, les frais des encours de transport entre les zones d'approvisionnement et les zones de production sont les frais financiers liés aux valeurs des familles de pièces constamment immobilisées dans l'encours de transport du flux d'approvisionnement. Cela est calculé à partir du délai de transport d'approvisionnement et du nombre de jours ouvrés de la zone de production.

$$frais_encours_appro_{h,i,j,p} = \frac{delai_appro_j.quantite_flux_appro_{h,i,j,p}.prix_acquisition_{p,origine(j)}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}$$
$$\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \tag{3.22}$$

Coût rendu d'un flux d'approvisionnement A une période donnée, le coût rendu flux d'approvisionnement correspond au coût des pièces d'une famille de pièces arrivées à destination d'un flux d'approvisionnement.

$$\begin{aligned} &cout_rendu_appro_{h,i,j,p} = \\ &part_amort_source_existante_{h,i,j,p} + part_amort_source_potentielle_{h,i,j,p} \\ &+cout_acquisition_{h,i,j,p} + cout_transport_urgence_appro_{h,i,j,p} \\ &+cout_transport_appro_{h,i,j,p} + cout_emballage_appro_{h,i,j,p} + cout_douane_appro_{h,i,j,p} \\ &+frais_stock_securisation_appro_{h,i,j,p} + frais_stock_fonctionnement_appro_{h,i,j,p} \\ &+frais_encours_appro_{h,i,j,p} \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.23}$$

Cette expression peut être simplifiée en factorisant un prix de flux d'approvisionnement :

$$\begin{aligned} &prix_flux_appro_{j,p} = prix_transport_appro_j.volume_emballage_p.(1 + taux_douane_appro_{j,p}) \\ &+prix_emballage_appro_{j,p} \\ &+prix_acquisition_{p,origine(j)}.(1 + taux_douane_appro_{j,p} + coeff_transport_urgence_j \\ &+taux_possession_stock.\frac{niveau_stock_securisation_j + niveau_stock_fonctionnement_j + delai_appro_j}{nb_jours_ouvres_{destination(j)}}) \\ &\forall j \in RA, p \in FP \end{aligned} \tag{3.24}$$

La nouvelle formulation devient :

$$\begin{aligned} &cout_rendu_appro_{h,i,j,p} = quantite_flux_appro_{h,i,j,p}.(part_amort_source_existante_{h,i,j,p} \\ &+part_amort_source_potentielle_{h,i,j,p} + prix_flux_appro_{h,j,p}) \\ &\forall i \in FV, j \in RA, p \in FP, h \in H \end{aligned} \tag{3.25}$$

3.2.4.12 Evaluation des coûts de production

La production d'une famille de véhicules sur une zone de production définit différents coûts :
- Part des amortissements des ressources de production existantes
- Part des amortissements des ressources de production potentielles
- Masse achat d'un véhicule
- Complément logistique d'un véhicule
- Valeur ajoutée d'un véhicule
- Part des frais fixes d'un véhicule
- Prix de revient de fabrication d'un véhicule

Part des amortissement des ressources de production existantes A une période donnée, pour les ressources de production en cours d'amortissement, un véhicule utilisant ces ressources se voit affecté une part de l'amortissement restant de ces ressources. Ainsi la part d'amortissement des ressources de production pour un véhicule produit est la somme, pour toutes les ressources utilisées, des frais d'investissement amortis sur la période étudiée et répartis sur le total des véhicules utilisant chaque ressource.

$$
\begin{aligned}
&part_amort_ressource_existante_{h,i,u} = \\
&\begin{cases}
0 \text{ si } h \geq duree_amort_ressource_restante_{t,u} + min_{h' \in H}(h') \text{ ou} \\
\quad \sum_{i' \in FV / coeff_charge_{i't} > 0} quantite_prod_{h,i',u} = 0 \\
\sum_{t \in TP / coeff_charge_{it} > 0 \text{ et } (t,u) existant} \\
\left(\frac{frais_invest_ressource_restant_{t,u}}{duree_amort_ressource_restante_t . \sum_{i' \in FV / coeff_charge_{i't} > 0} quantite_prod_{h,i',u}} \right) \\
\text{sinon}
\end{cases} \\
&\forall h \in H, i \in FV, u \in ZP
\end{aligned}
\tag{3.26}
$$

Part des amortissement des ressources de production potentielles A une période donnée, pour les ressources de production potentielles ayant été investies sur une période précédente ou à la période courante, un véhicule utilisant ces ressources se voit affecté une part de l'amortissement des frais d'investissement de ces ressources.

$$
\begin{aligned}
&part_amort_ressource_potentielle_{h,i,u} = \\
&\begin{cases}
\sum_{t \in TP / coeff_charge_{i,t} > 0 \text{ et } (t,u) potentiel} \\
\left(\frac{frais_invest_ressource_{t,u} . \sum_{h' \in H / h' \geq h - duree_amortissement_ressource + 1 \text{ et } h' \leq h} invest_ressource_h',t,u}{duree_amort_ressource . \sum_{i' \in FV / coeff_charge_{i't} > 0} quantite_prod_{h,i',u}} \right) \\
\text{si } \sum_{i' \in FV / coeff_charge_{i't} > 0} quantite_prod_{h,i',u} > 0 \\
0 \text{ sinon}
\end{cases} \\
&\forall h \in H, i \in FV, u \in ZP,
\end{aligned}
\tag{3.27}
$$

Masse achat A une période donnée, la masse achat est la valeur moyenne d'achat des familles de pièces composant un véhicule d'une famille de véhicules. Elle correspond à la moyenne des coûts d'acquisition réalisés pour une famille de véhicules pour une zone de production. Cela intègre aussi les coûts de douanes et les frais financiers fournisseurs.

$$masse_achat_{h,i,u} = \begin{cases} (\frac{1}{quantite_prod_{h,i,u}}. \sum_{j \in RA/destination(j)=u} (\sum_{p \in FP/coeff_nomenclature_{ip}>0} (cout_acquisistion_{h,i,j,p} \\ +cout_douane_appro_{h,i,j,p} + part_amort_source_existante_{h,p,s} \\ +part_amort_source_potentielle_{h,p,s}))) \\ \text{si } quantite_prod_{h,i,u} > 0 \\ \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$
$$\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \tag{3.28}$$

Complément logistique A une période donnée, le complément logistique est la valorisation par véhicule des différents coûts de la logistique d'approvisionnement des familles de pièces entrant dans l'assemblage d'une famille de véhicules. Ces coûts logistiques prennent en compte, pour tous les flux de familles de pièces pour une famille de véhicules d'une zone de production, le coût de transport, le coût de transport d'urgence, le coût d'emballage, les frais de stock de fonctionnement, les frais de stock de sécurisation et les frais d'encours divisés par la quantité de cette famille de véhicules sur cette zone de production.

$$complement_logistique_{h,i,u} = \begin{cases} \frac{1}{quantite_prod_{h,i,u}}. \\ \sum_{j \in RA/destination(j)=u} (\sum_{p \in FP/coeff_nomenclature_{i,p}>0} (cout_transport_appro_{h,i,j,p} \\ +cout_transport_urgence_appro_{h,i,j,p} \\ +cout_emballage_appro_{h,i,j,p} + frais_stock_fonctionnement_appro_{h,i,j,p} \\ +frais_stock_securisation_appro_{h,i,j,p} + frais_encours_appro_{h,i,j,p})) \\ \text{si } quantite_prod_{h,i,u} > 0 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$
$$\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \tag{3.29}$$

Part frais fixes de production A une période donnée, la part des frais fixes de production d'un véhicule produit sur une zone de production correspond aux frais fixes des ressources de production installées sur les zones de production dont les technologies interviennent dans la production de la famille de véhicules et répartis sur les quantités produites de toutes les familles de produits.

$$part_frais_fixes_{h,i,u} = \begin{cases} \sum_{t \in TP/coeff_charge_{i,t}>0} (\frac{frais_fixes_{t,u}}{\sum_{i' \in FV/coeff_charge_{i',t}>0} quantite_prod_{h,i',u}}) \\ \text{si } \sum_{i' \in FV/coeff_charge_{i',t}>0} quantite_prod_{h,i',u} > 0 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$
$$\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \tag{3.30}$$

Valeur ajoutée A une période donnée, la valeur ajoutée d'un véhicule correspond à la somme, pour toutes les technologies nécessaires à la famille de véhicules, des frais variables de production corrigés par le coefficient de charge.

$$valeur_ajoutee_{h,i,u} = \sum_{t \in TP/coeff_charge_{i,t}>0} coeff_charge_{it}.frais_variables_{t,u}$$
$$\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \tag{3.31}$$

Prix de revient de fabrication Le prix de revient de fabrication correspond à la somme des coûts de production pour une unité d'une famille de véhicules sur une zone de production.

$$\begin{aligned} &prix_revient_fabrication_{h,i,u} = \\ &part_amort_ressource_existante_{h,i,u} + part_amort_ressource_potentielle_{h,i,u} \\ &+masse_achat_{h,i,u} + complement_logistique_{h,i,u} \\ &+part_frais_fixes_{h,i,u} + valeur_ajoutee_{h,i,u} \\ &\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \end{aligned} \tag{3.32}$$

Prix de cession A une période donnée, le prix de cession est le prix de vente d'un véhicule entre la filiale de production et la filiale de commercialisation. Il est calculé à partir du prix de revient de fabrication, éventuellement corrigé par un coefficient de cession. Ce dernier correspond à la marge de la filiale de production.

$$\begin{aligned} &prix_cession_{h,i,u} = prix_revient_fabrication_{h,i,u}.coeff_cession_{iu} \\ &\forall i \in FV, u \in ZP, h \in H \end{aligned} \tag{3.33}$$

3.2.4.13 Evaluation des coûts de distribution

Pour un flux de distribution, les coûts suivants sont évalués :
- Coût de cession du flux
- Coût de transport du flux
- Coût de douane du flux
- Frais d'encours du flux
- Coût rendu du flux

Les coûts pour chaque flux de distribution sont détaillés ci-après :

Coût de cession A une période donnée, le coût de cession pour un flux de distribution est la valorisation de la valeur de la famille de véhicules transportée. Le coût de cession du flux est calculé en multipliant le prix de cession de la famille de véhicules sur la zone de production d'origine du flux par la quantité (en vhl) de la famille de véhicules constituant le flux de distribution.

$$\begin{aligned} &cout_cession_{h,i,k} = prix_cession_{h,i,origine(k)}.quantite_flux_distri_{h,i,k} \\ &\forall i \in FV, k \in RD, h \in H \end{aligned} \tag{3.34}$$

Coût de transport A une période donnée, le coût de transport d'un flux de distribution est le prix unitaire de transport sur la route de distribution corrigé par le coefficient de gabarit et multiplié par la quantité de véhicules formant le flux.

$$\begin{aligned} &cout_transport_distri_{h,i,k} = prix_transport_distri_{k}.coeff_gabarit_{i}.quantite_flux_distri_{h,i,k} \\ &\forall i \in FV, k \in RD, h \in H \end{aligned} \tag{3.35}$$

Coût de douane A une période donnée, le coût de douane d'un flux de distribution est calculé à partir de la valeur en douane de la famille de véhicules formant le flux de distribution sur laquelle est appliqué le taux de douane de distribution. Cette valeur en douane est définie comme la somme du coût cession et du coût de transport de distribution. A cet horizon, on surestime donc la douane car on intègre le coût de transport entre la frontière et la zone de commercialisation.

$$cout_douane_distri_{h,i,k} = taux_douane_distri_{i,k}.(cout_cession_{h,i,k} + cout_transport_distri_{h,i,k}) \\ \forall i \in FV, k \in K, h \in H \tag{3.36}$$

Frais d'encours de distribution A une période donnée, ce sont les frais financiers liés à l'encours d'un flux de distribution. Cela est calculé à partir du délai de distribution, du nombre jours ouvrés de l'usine expéditrice, du prix de cession des véhicules et du taux de possession de stock.

$$frais_encours_distri_{h,i,k} = \frac{delai_distri_k.quantite_flux_distri_{h,i,k}.prix_cession_{h,i,u}.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{origine(k)}} \\ \forall i \in FV, k \in RD, h \in H \tag{3.37}$$

Coût rendu A une période donnée, le coût rendu d'un flux de distribution est la somme des coûts de distribution.

$$cout_rendu_distri_{h,i,k} = cout_cession_{h,i,k} + cout_transport_distri_{h,i,k} \\ + cout_douanes_distri_{h,i,k} + frais_encours_distri_{h,i,k} \forall i \in FV, k \in RD, h \in H \tag{3.38}$$

Cette expression peut être simplifiée en calculant un coefficient de flux de distribution (pour la partie dépendante du prix de cession) et un prix de flux de distribution (pour la partie indépendante du prix de cession) : les frais de distribution non dépendants du prix de cession sont aussi calculables a priori pour chaque flux de distribution de la famille de véhicules i sur la route de distribution k.

$$prix_flux_distri_{i,k} = prix_transport_distri_k.coeff_gabarit_i.(1 + taux_douanes_distri_{ik}) \\ \forall i \in FV, k \in RD \tag{3.39}$$

$$coeff_flux_distri_{i,k} = 1 + taux_douane_distri_{ik} + \frac{delai_distri_k.taux_possession_stock}{nb_jours_ouvres_{origine(k)}} \\ \forall i \in FV, k \in RD \tag{3.40}$$

La nouvelle formulation devient :

$$cout_rendu_distri_{h,i,k} = \\ quantite_flux_distri_{h,i,k}.(prix_flux_distri_{ik} + prix_cession_{h,i,u}.coeff_flux_distri_{i,k}) \\ \forall i \in FV, k \in RD, h \in H \tag{3.41}$$

3.2.4.14 Coût de la chaîne logistique

Au niveau de la chaîne logistique, les coûts suivants sont évalués :
- Coût d'exploitation de la chaîne logistique
- Coût total d'exploitation de la chaîne logistique

Coût d'exploitation de la chaîne logistique Le coût d'exploitation totalise l'ensemble des coûts de distribution de la chaîne logistique à une période donnée :

$$cout_exploitation_h = \sum_{i \in FV} \sum_{k \in RD} cout_rendu_distri_{h,i,k} \forall h \in H \tag{3.42}$$

Coût total d'exploitation de la chaîne logistique Le coût total d'exploitation somme, sur toutes les périodes de l'horizon, les coûts d'exploitation actualisés :

$$cout_total_exploitation = \sum_{h \in H} coeff_depreciation_h.cout_exploitation_h \tag{3.43}$$

Nous venons de présenter un modèle de connaissance d'une chaîne logistique internationale permettant d'étudier les impacts économiques et industriels des décisions d'investissement et d'exploitation sur un horizon stratégique. Appliqué à une chaîne logistique automobile, ce modèle permet de simuler de nombreux scénarii d'investissement (nouvelles capacités de production, déplacement de capacités de production) ou d'exploitation (niveaux de demande, coûts de transport...). Cependant il requiert un grand nombre de donnnées industrielles avec une certaine fiabilité.

Dans ce qui suit, nous réalisons un état de l'art pour étudier les modèles similaires et les éléments différenciant existants dans la littérature.

3.3 Etat de l'art

Dans cette section, nous présentons un état de l'art de la planification stratégique de réseaux logistiques. Cet état de l'art a été présenté à la conférence francophone JDJN 2009 [SGNG09].

Des états de l'art antérieurs concernant le SNP (Strategic Network Planning - terme anglais pour la planification stratégique du réseau logistique) se sont focalisés sur la conception de réseau de distribution [GP95], sur le Problème de Facility Location (FLP) [MNSdG09], sur l'aspect global [MG05], sur les différentes décisions [DBG+07], sur l'intégration des décisions tactiques [GVD02] et sur les hypothèses liées au contexte de délocalisation [HFHA08]. Notre état de l'art se focalise, pour sa part, sur les modèles de production-distribution avec nomenclature en portant une attention particulière sur la modélisation des processus d'approvisionnement, de production et de distribution.

Par la suite, nous détaillons la planification stratégique de réseau logistique, ses critères quantitatifs et ses hypothèses. Puis, nous comparons des modèles de la littérature sur ces points ainsi que les techniques mises en œuvre.

3.3.1 La planification stratégique du réseau logistique

La planification stratégique demande, dans une approche holistique, de définir la structure du réseau logistique d'une chaîne logistique. La figure 3.2 présente le modèle de base du réseau logistique avec, en extrémités de chaîne, les clients et les fournisseurs et, au centre, un réseau formé de sites de production (usines) et de stockage (entrepôts). Ce réseau est aussi appelé 'réseau de production-distribution' [Mar05].

Le planification stratégique de réseau logistique doit définir l'état des différents sites (fournisseur, usine, entrepôt...) et la circulation des flux de produits et de composants dans la chaîne logistique [SK07]. L'horizon d'étude est, en général, de trois à dix ans en fonction du capital engagé et de la réactivité du système industriel. L'objectif est de maximiser le bénéfice de l'entreprise dans cette nouvelle configuration. Pour ce faire, on calcule la différence entre les revenus et les coûts d'exploitation liés aux différents sites et liaisons de transport. L'ensemble des éléments pris en compte sont agrégés et projetés sur l'horizon d'étude. Ainsi nous considérons le problème de planification stratégique de réseau logistique comme devant définir les investissements et la planification agrégée des approvisionnements, des productions et des distributions. Bien que la valorisation du profit soit préconisée pour mener à bien la planification stratégique de réseau logistique, nous concentrons notre étude sur les coûts supportés par les différents processus de l'entreprise PSA. Nous recensons également les principales hypothèses des modèles étudiés.

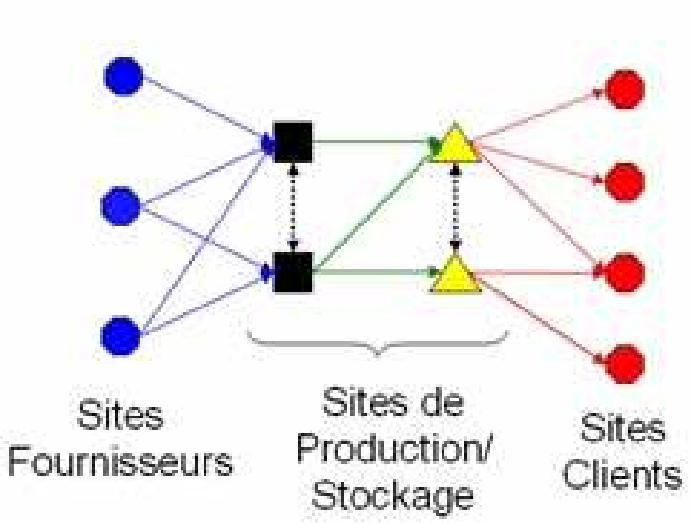


Figure 3.2 – Modèle de base de réseau logistique

3.3.1.1 Critères quantitatifs

L'évaluation quantitative d'un modèle de planification stratégique demande de calculer un coût total sur la chaîne logistique. Comme préconisé dans [Bal04], nous différencions les différentes fonctions du stock (stock de cycle, de sécurité, saisonnier et encours) dans les différents processus pour les valoriser séparément. Ce coût total peut se décomposer entre les processus industriels ainsi qu'un processus transversal :

Le processus d'approvisionnement :

- Dotation aux amortissements des investissements fournisseur : amortissement du coût d'ouverture d'un fournisseur (i.e. certification fournisseur, outillage...).
- Coût d'achat : coût payé au fournisseur pour les produits qui lui sont achetés.
- Coût de transport amont : coût pour transporter les produits achetés chez un fournisseur aux sites de production (i.e. prestation, transport, emballage...).

Le processus de production :

- Dotation aux amortissements des investissements en usine : amortissement du coût d'ouverture d'une usine (i.e. immobilier, recrutement du personnel).
- Dotation aux amortissements des investissements en ressources : amortissement des coûts d'installation d'une capacité de production (i.e. conception, installation...).
- Coût fixe de fonctionnement d'une usine : coût de fonctionnement d'une usine (i.e. frais généraux, taxes et impôts locaux divers...).
- Coût fixe de fonctionnement d'une ressource : coût de possession de la ressource de production (i.e. loyer, maintenance...).
- Coût variable de production : ensemble des coûts variables de production comme la main d'œuvre, les énergies...
- Coût du stock de cycle : coût du stock imposé par les campagnes de production.

Le processus de distribution :

- Dotation aux amortissements des investissements en entrepôt : amortissement du coût d'ouverture d'un entrepôt (i.e. immobilier).
- Coût fixe de fonctionnement d'entrepôt : coût de fonctionnement de l'entrepôt (i.e. entretien, sécurité).
- Coût de stock saisonnier : coût lié à la gestion du stock saisonnier.
- Coût de rupture de stock : coût de rupture de stock et/ou de backlog.
- Coût transport aval : coût pour transporter les produits finis des usines aux clients.

Transversal :

- Coûts de douanes : coûts dus aux droits de douanes lors du transport international.
- Effet de change explicite : coût dû à l'application des différents taux de change.
- Impôts et taxes : modification des coûts en fonction de la fiscalité des différents pays.
- Coût de l'encours de transport : évaluation du stock immobilisé dans le transport.
- Coût du stock de sécurité : coût lié au stock pour pallier les aléas de production et de transport.

Ces coûts sont estimés et cet estimation dépend grandement des hypothèses prises lors de la modélisation.

3.3.1.2 Hypothèses de modélisation

Nous allons maintenant lister les hypothèses fréquemment rencontrées dans les modèles. En premier lieu, nous présentons les hypothèses les plus fortes :

- Modèle multi-périodes : la modélisation d'un horizon temporel de plusieurs périodes offre une approche dynamique de l'évolution du contexte du réseau logistique de l'entreprise.
- Modèle de réseau au lieu d'un modèle de chaîne : la modélisation en réseau offre la possibilité d'échange de produits entre tous les sites, y compris sur le même niveau.
- Application industrielle : certains modèles sont réalisés à partir d'un cas d'étude industriel.
- International : ces modèles sont décrits explicitement comme "internationaux" (ou "globaux").
- Maximisation du bénéfice : l'objectif est de maximiser le bénéfice ; dans le cas contraire, l'objectif est la minimisation des coûts.
- Gestion des risques : ces modèles cherchent à valoriser les incertitudes inhérentes à la logistique.

D'autres hypothèses plus précises vont influer sur la modélisation des différents processus industriels :

Le processus approvisionnement :

- Limite de capacité des fournisseurs : l'approvisionnement est considéré comme limité en quantité achetable par période.
- Mono-sourcing d'approvisionnement : les sites de production sont affectés à un seul fournisseur par composant.

Le processus production :

- Limite des capacités de production : les quantités produites sont limitées soit en nombre de produits, soit en temps de travail.
- Gestion des technologies de production : chaque capacité est dédiée à une technologie, elle-même requise par des produits spécifiques. Cela permet de gérer finement les capacités de stockage et les goulots de production sur un même site.
- Contraintes de layout : la surface disponible dans un site est prise en compte et peut limiter les installations de ressources de production (i.e. des lignes de production).
- Dépassement de la capacité de production : la capacité nominale de production peut être dépassée sous condition et avec un surcoût.

Le processus distribution :

- Limite de capacité d'entreposage : la capacité de stockage des entrepôts est limitée, ce qui contraint les quantités stockées par période.
- Mono-sourcing de distribution : les sites clients sont affectés à un unique site de production ou de distribution.

Hypothèses transversales : Les hypothèses transversales sont appliquées, si nécessaires, sur les trois processus.

- Gestion des incoterms : la gestion des incoterms détermine comment, entre fournisseurs et clients, se répartissent les frais de transport.
- Gestion du Duty drawback : certaines zones douanières où sont localisées des usines d'assemblage proposent des régimes douaniers avantageux en fonction des pays d'origine des composants et des pays de destination des produits. Cela impose de déterminer ou de contraindre le régime douanier de chaque flux de produits.

- Budget d'investissement : un budget contraint les possibilités d'investissement en nouveaux sites et/ou en nouvelles ressources de production.
- Contrainte d'ouverture/fermeture : les décisions d'investissement en termes de sites sont contraintes par des règles, par exemple : 'un site que l'on construit doit rester ouvert sur le reste de l'horizon' ou 'un nombre de fermetures de sites est limité'.
- Limite de capacité de transport : les quantités transportées sont bornées.
- Multi-organisation du transport : l'affectation des quantités transportées est réalisée sur différentes organisations de transport, i.e.. messagerie, lot, en camion complet..., avec des tarifications différentes selon la quantité.
- Plusieurs modes de transport : une liaison de transport propose différents modes de transport avec des caractéristiques différentes (i.e. coût, délai).

Avec ces différents critères et hypothèses, nous allons maintenant étudier des modèles de planification stratégique de la littérature.

3.3.1.3 Périmètre et objectif de l'état de l'art

Notre état de l'art s'est focalisé sur les modèles de conception de chaînes logistiques de production-distribution multi-échelons (c'est-à-dire avec, au moins, 3 niveaux le long de la chaîne logistique), multi-produits (c'est-à-dire qui gèrent les flux de plusieurs types de produits) et avec une nomenclature (c'est-à-dire avec un assemblage de composants achetés en produits finis). Après plus de 150 articles de planification stratégique parcourus, 23 articles ont correspondu à ces critères. Ces articles sélectionnés sont présentés dans les tableaux des figures 3.3, 3.4 et 3.5.

3.3.2 Analyse de la littérature

Le compromis entre la localisation et le transport a été majoritairement étudié dans les problèmes de Facility Location (FLP), parent de la planification stratégique de réseau logistique [MNSdG09]. Les modèles basés sur des cas industriels (52%) ont des hypothèses spécifiques à leur secteur d'étude. Par ailleurs, les modèles 'théoriques' n'intègrent pas simultanément l'ensemble des hypothèses générales (figure 3.3). Cependant nous constatons que les modèles les plus récents tendent à intégrer de plus en plus d'éléments i.e. [Mar05], [PRI06] et [WLR+05].

Dans [RLC05], les auteurs présentent l'ensemble des décisions prises au sein de la chaîne logistique et leurs interactions. La décision de conception du réseau physique est immédiatement suivie par les décisions suivantes :

- Sur l'approvisionnement : choix des fournisseurs et conception des flux d'approvisionnement,
- Sur la production : implantation des ateliers et planification tactique de la production,
- Sur le transport : choix des modes de transport et planification du transport en termes de massification et de routage.

Il est donc primordial, au niveau stratégique, d'anticiper, au minimum, les décisions directement postérieures telles que :

Anticipation des décisions d'approvisionnement L'anticipation des choix des fournisseurs dans le schéma global du réseau logistique est primordiale. Cependant peu de modèles considèrent des investissements au niveau des fournisseurs. La conception des flux d'approvisionnement notamment en termes de limites de capacités fournisseurs ou d'économies d'échelles est aussi à considérer.

Anticipation des décisions de production La décision de planification de la production va demander, au niveau de la planification stratégique du réseau logistique de raisonner sur une planification (nécessairement multi-périodes) qui intègre les contraintes majeures de la gestion de la capacité de production notamment au niveau des différents goulots de production. De plus, la planification va chercher à profiter des économies d'échelle grâce à la distinction des coûts fixes et des coûts variables et à limiter le dépassement de la capacité nominale de production. Au niveau de la décision d'implantation des sites, les modèles de planification stratégique de réseau logistique

doivent intégrer les contraintes notamment en termes de surfaces et de compatibilité entre les différents investissements en ressources de production ou de stockage.

Anticipation des décisions de transport Les différents modes de transport doivent être pris en compte dans les diverses liaisons avec des coûts différents. La massification des flux, qui exploite les économies d'échelle des différentes organisations de transport, est aussi à anticiper [Fle93], ie. avec des coûts non linéaires du transport en messagerie. Les décisions de planification du transport, très impactantes si les ressources de transports sont limitées, est aussi à réaliser ou, au minimum, à intégrer avec des limites de capacités sur certains modes de transport.

Par ailleurs, à l'heure de la mondialisation, peu de chaînes logistiques restent uniquement domestiques.

Dans [MG05], les auteurs prônent la prise en compte de l'environnement global. En conséquence, l'aspect international est à intégrer en amont, notamment lors de la planification stratégique du réseau logistique :

- A l'international, un sourcing global doit intégrer l'ensemble des facteurs de coûts notamment les coûts des stocks de sécurité et des encours.
- Les coûts de douanes sont un des leviers du commerce international et varient en fonction de la valeur des produits et des accords entre les pays. Leur prise en compte ainsi que, l'anticipation des règles de 'duty drawback' ou de 'local content' peuvent permettre de profiter de réductions substantielles sur les frais de douanes.
- De plus, les impôts et taxes locales ont un impact majeur sur les résultats des filiales nationales. Ces effets peuvent aussi être anticipés, voir optimisés avec le calcul des prix de cession (via les incoterms).

	[ABHT95]	[Mar05]	[PRI06]	[SSP08]	[FFH06]	[DBX06]	[Hic99]	[YYEC03]	[WLR+05]	[KR00]	[LHHA06]	[SB00]	[KS99]	[VMB06]	[HFHA08]	[FS04]	[TBP08]	[CFL09]	[MNSdG06]	[CPS06]	[PMD04]	[JJCP02]	[JP01]
Modèle multi-période	X	X	X	X	X				X		X		X	X	X	X	X	X	X				
Modèle de réseau au lieu de chaîne	X	X	X	X					X		X			X	X	X	X		X	X	X		
Application industrielle	X	X		X	X	X		X	X		X		X	X	X								
International	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X							
Maximisation du bénéfice		X	X	X			X		X	X				X	X	X		X					
Gestion des risques			X			X	X					X						X					

Figure 3.3 – Hypothèses générales des modèles

	[ABHT95]	[Mar05]	[PRI06]	[SSP08]	[FFH06]	[DBX06]	[Hic99]	[YYEC03]	[WLR+05]	[KR00]	[LHHA06]	[SB00]	[KS99]	[VMB06]	[HFHA08]	[FS04]	[TBP08]	[CFL09]	[MNSdG06]	[CPS06]	[PMD04]	[JJCP02]	[JP01]
Approvisionnement																							
Dotation aux amortissements des investissements fournisseur								X		X							X			X		X	
Coût d'achat		X	X		X	X		X	X	X		X	X	X		X	X		X	X		X	X
Coût de transport amont	X	X	X		X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Production																							
Dotation aux amortissements des d'investissement en usine	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	X			
Dotation aux amortissements des investissements en ressource	X	X	X		X		X		X		X			X	X						X		
Coût fixe de fonctionnement d'une usine	X	X	X			X	X		X	X	X	X		X		X	X		X	X	X	X	X
Coût fixe de possession d'une ressource	X	X	X				X		X		X			X	X						X		
Coût variable de production	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X
Coût du stock de cycle		X	X			X						X		X			X	X					
Distribution																							
Dotation aux amortissements d'investissement d'un entrepôt		X		X		X	X	X	X					X		X	X		X				
Coût fixe de fonctionnement d'entrepôt		X				X	X		X			X		X		X	X		X			X	X
Coût variable du stock saisonnier	X	X		X		X	X		X		X			X		X	X		X			X	
Coût de rupture de stock		X					X								X		X	X		X			
Coût transport aval	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Transversal																							
Coût de douane	X	X		X	X		X		X	X			X	X	X	X							
Effets de change explicite							X			X				X	X	X							
Impôts et taxes			X	X	X		X		X	X			X	X	X	X							
Coût de l'encours de transport	X						X				X		X										
Coût du stock de sécurité		X	X				X	X			X		X		X			X	X				

Figure 3.4 – Les critères quantitatifs des modèles

	[ABHT95]	[Mar05]	[PRI06]	[SSP08]	[FFH06]	[DBX06]	[Hic99]	[YYEC03]	[WLR+05]	[KR00]	[LHHA06]	[SB00]	[KS99]	[VMB06]	[HFHA08]	[FS04]	[TBP08]	[CFL09]	[MNSdG06]	[CPS06]	[PMD04]	[JJCP02]	[JP01]
Approvisionnement																							
Capacité des fournisseurs		X	X				X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mono-sourcing approvisionnement							X									X							
Production																							
Capacité de production	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
Dépassement de capacité nominale				X	X		X																
Technologie de production	X	X	X		X		X		X		X			X	X			X	X		X		X
Contraintes de layout		X		X	X		X							X			X		X		X		
Distribution																							
Capacité d'entreposage	X	X		X		X	X	X	X	X		X		X	X	X	X		X		X	X	X
Mono-sourcing distribution												X											X
Transversal																							
Incoterms									X						X								
Duty drawback	X												X										
Budget investissement	X			X	X		X		X	X									X		X	X	
Amortissement des investissements				X	X						X				X								
Contraintes d'ouverture/fermeture	X		X	X	X		X			X			X				X		X				X
Capacité de transport	X					X	X		X						X					X			
Multi-organisation de transport						X	X																
Plusieurs modes de transport	X					X	X		X											X			

Figure 3.5 – Les hypothèses prises en compte dans les modèles

3.3.3 Méthodes d'optimisation

Différentes méthodes d'optimisation sont utilisées dans les modèles de la littérature :

- La programmation linéaire (PL) et la programmation linéaire en nombres entiers généralement (PLNE) via un modeleur algébrique et un solveur commercial,
- La programmation linéaire en nombres entiers avec des techniques d'accélération (méthodes de décomposition...),
- Les métaheuristiques (Recuit simulé, recherche tabu, algorithmes génétiques...),
- Les heuristiques,
- La simulation à évènements discrets,
- La programmation non linéaire.

Le tableau (figure 3.6) présente l'utilisation de ces méthodes dans les modèles sélectionnés. Si plusieurs méthodes sont cochées, cela signifie la mise en place d'un couplage entre ces méthodes.

Les méthodes de résolution sont majoritairement des méthodes exactes (75% des articles), c'est-à-dire de la PL ou de la PLNE souvent implémentée avec un solveur commercial (CPLEX, LINGO, X-PRESS...). Des méthodes d'accélération sont mises en place pour les problèmes de grande taille notamment la décomposition de benders [CPS06] [PMD04] ou une heuristique lagrangienne [JP01]... Des méthodes de résolution non-linéaires sont parfois rencontrées, par exemple la méthode 'Epsilon-constraint' [SB00] ou la programmation DC [TBP08]. L'utilisation des métaheuristiques comme le recuit simulé [JJCP02] ou les algorithmes génétiques [DBX06] sont apparues plus récemment.

L'article [ABHT95] motive le recours à des méthodes exactes dans l'importance notamment financière des décisions stratégiques. Cet argument est valable tant que les modèles mathématiques permettant la résolution exacte restent pertinents face à la réalité industrielle. Cela demande donc souvent de s'appuyer sur des techniques d'accélération car les modèles deviennent rapidement grande taille.

Une autre approche aidant à gérer la complexité est le couplage de modèles. Les couplages sont généralement réalisés entre une méthode d'optimisation et la simulation à évènements discrets. Le modèle [DBX06] utilise un algorihtme génétique, celui de [PRI06] une heuristique sur un MILP. Un des modèles les plus complets est celui de [Hic99] dont la solution commerciale intègre à la fois une modélisation MILP (non publié) et un modèle de simulation. Un couplage entre un modèle stratégique et un modèle opérationnel est proposé par [SB00].

Au final, les techniques utilisées sont beaucoup dépendantes de la modélisation choisie (et des propriétés des méthodes alors obtenus). De plus, la complexité (cas industriel...) des problèmes à résoudre ont un impact majeur sur ce choix de la méthode d'optimisation.

	[ABHT95]	[Mar05]	[PRI06]	[SSP08]	[FFH06]	[DBX06]	[Hic99]	[YYEC03]	[WLR+05]	[KR00]	[LHHA06]	[SB00]	[KS99]	[VMB06]	[HFHA08]	[FS04]	[TBP08]	[CFL09]	[MNSdG06]	[CPS06]	[PMD04]	[JJCP02]	[JP01]
PNE, PLNE		X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	?	X	X	X				X
PLNE + technique accélération	X																			X	X		
Meta-heuristique (SA,GA, TS)						X												X				X	
Heuristique												X						X					X
Simulation à évènements discrets			X			X	X																
Autres (PNL,...)												X					X						
SLP		X																					

Figure 3.6 – Les méthodes de résolution utilisées par les modèles

Les méthodes basées sur la programmation linéaire et ses extensions (PLNE, méthodes d'accélération/de décomposition...) restent majoritairement utilisées notamment pour la facilité de mise en œuvre et la puissance des solveurs commerciaux. Cet aspect historique avait déjà été pointé par [GP95]. Pour les modèles les plus difficiles à résoudre des approches heuristiques ou meta heuristiques sont aussi développées. Cette tendance est appuyée dans [Lou01]. Notons que des couplages avec des modèles de simulation à évènements discrets ont été réalisés pour évaluer des niveaux de stocks, des taux de service et étudier certaines dynamiques au sein d'une chaîne logistique. L'intégration de la simulation dans ce type de modèle est en plein essor [TTB09]. Enfin, dans les cas de problèmes non-linéaires, des méthodes de programmation non-linéaire sont aussi rencontrées.

Par la suite, nous détaillons l'offre logicielle commerciale actuellement disponible.

3.3.4 Offre logicielle

Les premiers logiciels d'aide à la décision pour le Supply Chain Design sont apparus dans les années 1970 avec l'essor de l'informatique et de la Recherche Opérationnelle. Actuellement, l'offre logicielle est mature avec plus d'une dizaine de logiciels aidant à prendre des décisions de Supply Chain Design. Généralement intégré aux suites APS, les applications de Network Design restent à part des applications de planification classique notamment par le niveau de détails et l'horizon de travail utilisé. Ainsi, la mise en place d'une suite APS en général pour les prévisions de ventes et la planification/l'ordonnancement de la production n'est pas forcément synonyme de la mise en oeuvre d'un module de Network Design [GLFBGC09].

Nous avons donc étudié l'offre d'outils logiciels de Network Design à la fois au sein des suites APS classiques et proposées de manière indépendante. Cette offre logicielle est détaillée dans le tableau 3.7.

	Nom de l'éditeur	*Nom de la suite logicielle*	*Reference*
1	JDA SOFTWARE	Network & Inventory Optimization	[JDA09]
2	IBM/ILOG	LogicNet Plus XE	[IBM09]
3	I2 Technologies	Supply Chain Strategist	[I209]
4	Axxom Software AG	ORion-PI	[AXX09]
5	MODELLIUM inc	SC-STUDIO	[Mod09]
6	Optiant	Power chain	[Opt09]
7	LLamasoft	Supply Chain Guru	[Lla09]
8	Oracle	Strategic Network Optmization	[Ora09]
9	INSIGHT	SAILS (Strategic Analysis of Integrated Logistics Systems)	[Ins09]
10	QUINTIQ Technology	QUINTIQ Strategic Planner	[Qui09]
11	Eurodécision	LP-Supply Chain	[Eur09]
12	ProfitPoint	ProfitNetwork	[Poi09]
13	SolveIT Software Pty	Supply Chain Network Optimisation (SCNO)	[Sol09]

Figure 3.7 – Liste de l'offre logicielle en Network Design

Une étude sur l'offre APS est réalisée par Supply Chain Magazine [Mag09]. Cette étude européenne a été complétée par des solutions commerciales disponibles aux Etats-Unis.

Nous avons comparé les différentes solutions en utilisant différents critères. Ces critères qui nous permettent de comparer ces solutions sont classés selon trois catégories distinctes : les critères de modélisation, les critères d'optimisation et les critères d'intégration.

3.3.4.1 Critères de modélisation

Les critères de modélisation suivants sont étudiés :

Modélisation du réseau logistique L'application modélise les différents site du réseau comme les fournisseurs, les usines, les centres de distribution et les magasins ainsi que le transport possible entre ces sites.

Evaluation du coût total Le coût total intègre l'ensemble des coûts des processus d'achat, de transport, de production et d'entreposage.

Modélisation du transport Le réseau de transport est détaillé avec des hubs, cross-docks... Les tournées de livraison sont calculées pour avoir une estimation précise des coûts de transport correspondants.

Modélisation du stockage Le stockage est modélisé de manière détaillée (capacités d'entrepôt, stocks de sécurité, stocks de cycle...). Les indicateurs liés au taux de service sont alors aussi détaillés.

Bilan carbone Un calcul des émissions de carbone (CO2) est réalisé. Des possibilités d'intégration de contraintes voire d'optimisation multi-objectifs sont intégrées. Parfois, ce modèle peut intégrer le principe du 'Cap-and-Trade'.

Simulation dynamique des stocks Les logiciels suivent le stockage à la référence pièce('SKU' ou 'stock-keeping unit' en anglais) et simulent dynamiquement les niveaux de stock pour déterminer les éventuelles ruptures et/ou retard.

Modèle international Le modèle est applicable aux multinationales avec différentes monnaies, différentes taxes nationales et les droits de douane.

Calcul des prix de cession Le modèle évalue le prix de cession des produits finis à chaque noeud du réseau.

3.3.4.2 Critères d'intégration

Excel et bases de données Tous les logiciels acceptent d'importer et d'exporter les informations avec Excel et des bases de données.

Lien avec autres modules APS Le module s'intègre dans une suite APS.

Lien avec ERP L'application est intégrée dans une suite ERP.

Génération de scénarii Des routines paramétrables génèrent différents scénarii d'études pour une étude de sensibilité.

3.3.4.3 Critère d'optimisation

Définition des investissements L'outil propose des décisions telles que créer une nouvelle usine, vendre à un nouveau marché, ajouter un centre de distribution...

Planification multipériodes Les logiciels affectent les productions et les approvisionnements sur les sites disponibles sur un horizon de plusieurs périodes.

Optimisation des stocks Le logiciel minimise le coût de stock en conservant un niveau de service cible.

Moteur d'optimisation spécifique Le logiciel utilise une méthode d'optimisation dédiée.

3.3.4.4 Tableau de synthèse

L'offre logicielle est étudiée à la vue des critères définis précédement dans le tableau figure 3.8.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Modéliser	Réseau logistique	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Evaluation du coût total	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Modélisation détaillée du transport	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X
	Modélisation détaillée du stockage	X			X	X		X			X	X		X
	Bilan carbone	X	X					X			X		X	
	Simulation							X						
	International	X	X			X				X			X	X
	Calcul des prix de cession													
Intégrer	Lien Excel et base de données	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Génération de scénarios	X	X		X	X	X			X				
	Lien autres modules APS		X	X			X				X			
	Lien autres modules ERP	X	X				X							
Optimiser	Définition des investissements	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Planification multipériodes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Moteur d'optimisation spécifique		X		X					X				X

Figure 3.8 – Comparatif de l'offre logicielle

Notre étude des outils commerciaux de Supply Chain Design nous a permis de définir, pour les outils existants, leurs fonctionnalités communes et leurs fonctionnalités différencientes.

L'ensemble des logiciels propose de modéliser un réseau logistique et d'évaluer un coût total. De plus, ils s'interfacent tous avec Excel et une base de donnée (par exemple, MS Access). La fonctionnalité principale est d'étudier l'impact de l'ouverture/fermeture d'un site dans le réseau modélisé et de planifier la circulation des flux sur le réseau ainsi construit.

Au niveau de la modélisation, les principales fonctionnalités distinctives sont :

- La modélisation fine du transport notamment dans la prise en compte de diverses tarifications (messagerie, lot complet...).
- La modélisation fine du stockage notamment des stocks de sécurité en lien avec les taux de service cible (simulation des stocks ou optimisation des stocks de sécurité).
- La modélisation d'un bilan carbone pour avoir une approche multicritère coût/impact environnemental de chaque solution.

Au-delà des trois fonctionnalités, il est important d'étudier aussi en détails la facilité d'intégration de l'outil dans le système d'information existant, la puissance et l'évolutivité du solveur sous-jacent et, bien-sûr, le prix des différentes solutions logicielles.

Nous notons cependant qu'aucun des logiciels rencontrés n'intégrait un calcul du prix de cession.

3.3.4.5 Conclusion de l'état de l'art

Les modèles d'aide à la décision pour la planification stratégique des chaînes logistiques intègrent de plus en plus de facteurs pour affiner les compromis entre l'approvisionnement, la production et la distribution. Dans le cadre d'une planification hiérarchique, la cohérence entre les décisions des différents horizons de planification est critique. Notre analyse montre que, souvent, les modèles théoriques de la littérature ne sont pas réalistes industriellement car ils n'anticipent pas suffisamment les décisions postérieures pour s'intégrer dans un processus de planification hiérarchique. De plus, l'étude de l'offre logicielle disponible commercialement nous a montré que les modèles sont généralement limités par les méthodes de résolution employées car ils ne peuvent calculer les prix de cessions. Le réalisme des modèles reste donc, encore aujourd'hui, une difficulté majeure dans la conception d'outils d'aide à la décision au service de la planification stratégique de la chaîne logistique. Ainsi de nombreuses techniques de simulation et d'optimisation peuvent être utilisées dans ce contexte. Du point de vue de la modélisation, notre modèle inclut les prix de cession qui ont été relevés comme des éléments différenciants de la littérature.

Du point de vue des méthodes d'optimisation, la section suivante présente des démarches de résolution proposéees.

3.4 Formalisation mathématique

Dans cette partie, nous formalisons mathématiquement le modèle de planification stratégique. Par la suite, nous présentons les ensembles, les paramètres, les variables, la fonction objectif et les contraintes du modèle mathématique.

3.4.1 Ensembles

Description des ensembles	Ensemble	Indice
Ensemble des zones de commercialisation	ZC	v
Ensemble des zones de production	ZP	u
Ensemble des zones d'approvisionnement	ZA	s
Ensemble des familles de pièces	FP	p
Ensemble des familles de véhicules	FV	i
Ensemble des technologies de production	TP	t
Ensemble des périodes	H	h
Ensemble des routes d'approvisionnement	RA	j
Ensemble des routes de distribution	RD	k

3.4.2 Paramètres

3.4.2.1 Approvisionnement

$pfa_{i,j,p}/i \in FV, j \in RA, p \in FP$	Coût rendu d'approvisionnement (hors amortissements) par la route d'approvisionnement j de la famille de pièces p assemblée sur la famille de véhicules i
$a_{j,s}/j \in RA, s \in ZA$	$= 1$ si la zone d'approvisionnement s est l'origine de la route d'approvisionnement j, $= 0$ sinon
$b_{j,u}/j \in RA, u \in ZP$	$= 1$ si la zone de production u est la destination de la route d'approvisionnement j, $= 0$ sinon
$app^{max}_{h,p,s}/h \in H, p \in FP, s \in ZA$	Approvisionnement existant maximal (pc) en famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s à la période h
$app^{min}_{h,p,s}/h \in H, p \in FP, s \in ZA$	Approvisionnement existant minimal (pc) en famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s à la période h
$app^{max}_{p,s}/p \in FP, s \in ZA$	Approvisionnement potentiel maximal (pc) en famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s
$app^{min}_{p,s}/p \in FP, s \in ZA$	Approvisionnement potentiel minimal (pc) en famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s
$fia_{p,s}/p \in FP, s \in ZA$	Frais d'investissement pour ouvrir la zone d'approvisionnement s pour la famille de pièces p sur l'horizon
das	Durée d'amortissement des sources d'approvisionnement
$asr_{h,p,s}/p \in FP, s \in ZA, h \in H$	Frais d'investissement restant à amortir sur la zone d'approvisionnement s pour la famille de pièces p à la période h
$sync_p/p \in FP$	$= 1$ si la famille de pièce p est synchrone, $= 0$ sinon

3.4.2.2 Production

$ff_{t,u}/t \in TP, u \in ZP$	Frais fixes (€/période) de la ressource de production de la zone de production u utilisant la technologie de production t
$fv_{t,u}/t \in TP, u \in ZP$	Frais variables (€/vhl) de la ressource de production de la zone de production u utilisant la technologie de production t
$cap^{max}_{h,t,u}/h \in H, t \in TP, u \in ZP$	Capacité existante maximale par période (vhl) en technologie de production t sur la zone de production u à la période h
$cap^{min}_{h,t,u}/h \in H, t \in TP, u \in ZP$	Capacité existante minimum par période (vhl) en technologie de production t sur la zone de production u à la période h
$cap^{max}_{t,u}/t \in TP, u \in ZP$	Capacité potentielle maximale par période (vhl) en technologie de production t sur la zone de production u
$cap^{min}_{t,u}/t \in TP, u \in ZP$	Capacité potentielle minimum par période (vhl) en technologie de production t sur la zone de production u
$xc_{i,t}/i \in FV, t \in TP$	Coefficient de charge (/) pour la fabrication de la famille de véhicules i avec la technologie t
$xn_{i,p}/i \in FV, p \in FP$	Coefficient de nomenclature (pc/vhl) entre la famille de véhicule i et la famille de pièce p (nombre de pièces p par véhicule i)
$fir_{t,u}/t \in TP, u \in ZP$	Frais d'investissement pour ouvrir la technologie de production t sur la zone de production u sur l'horizon
dar	Durée d'amortissement des ressources de production
$arr_{h,t,u}/t \in TP, u \in ZP, h \in H$	Frais d'investissement restant à amortir de la technologie de production t sur la zone de production u à la période h
$locale_{s,u}/s \in ZA, u \in ZP$	$= 1$ si la zone d'approvisionnement s est locale à la zone de production u, $= 0$ sinon
$specifique_{i,t}/i \in FV, t \in TP$	$= 1$ si la famille de véhicule est spécifique à la technologie de production t, $= 0$ sinon

3.4.2.3 Distribution

$pfd_{i,k}/i \in FV, k \in RD$	Frais de distribution (indépendant du prix de cession) de la famille de véhicule i sur le route de distribution k
$xfd_{i,k}/i \in FV, k \in RD$	Coefficient de frais de distribution (dépendant du prix de cession) de la famille de véhicule i sur le route de distribution k
$pv_{h,i,v}/h \in H, i \in FV, v \in ZC$	Prévision de vente (vhl) sur la zone de commercialisation v pour la famille de véhicules i à la période h
$c_{k,u}/k \in RD, u \in ZP$	$= 1$ si la zone de production u est l'origine de la route de distribution k, $= 0$ sinon
$d_{k,v}/k \in RD, v \in ZC$	$= 1$ si la zone de commercialisation v est la destination de la route de distribution k, $= 0$ sinon

3.4.2.4 Divers

$xd_h/h \in H$	Taux de dépréciation monétaire (%) à la période h
h^{max}	Dernière période de l'horizon d'étude

3.4.3 Variables

$IR_{h,t,u}/h \in H, t \in TP, u \in ZP$	=1 si on investit la technologie de production t sur la zone de production u à la période h, =0 sinon
$IA_{h,p,s}/h \in H, p \in FP, s \in ZA$	=1 si on investit la source d'approvisionnement de la pièce p sur la zone d'approvisionnement s à la période h, =0 sinon
$Y_{h,i,k}/h \in H, i \in FV, k \in RD$	Quantité de véhicules de la famille de véhicules i transportée sur la route de distribution k à la période h
$X_{h,i,j,p}/h \in H, i \in FV, j \in RA, p \in FP$	Quantité de familles de pièces de type p à transporter sur la route d'approvisionnement j à destination de la famille de véhicules i à la période h

3.4.4 Fonction objectif

L'objectif est de minimiser la valeur actualisé nette du coût total d'exploitation. Elle permet d'avoir un compromis entre les frais d'investissements et les coûts d'exploitation.

$$Minimiser f(X, Y, IA, IR) = \sum_{h \in H} xd_h.(\sum_{i \in FV} \sum_{k \in RD} Y_{h,i,k}.(pfd_{i,k} + \sum_{u \in ZP} c_{k,u}.pc_{h,i,u}.xfd_{i,k})) \tag{3.44}$$

avec le prix de cession $pc_{h,i,u}$ tel que :

$$pc_{h,i,u} = xcs_{i,u}.(\sum_{p \in FP} (\sum_{j \in RA} b_{j,u}.\frac{xn_{i,p}.X_{h,i,j,p}.pfa_{j,p}}{\sum_{k' \in RD} c_{k',u}.Y_{h,i,k'} + \delta_0(\sum_{k' \in RD} c_{k',u}.Y_{h,i,k'})}$$
$$+X_{h,i,j,p}.\sum_{s \in ZA} a_{j,s}.(\frac{fia_{ps}/das.\sum_{h' \in H/h' \geq h-das+1} IA_{h',p,s} + asr_{h,p,s}}{\sum_{i' \in FV/xn_{i'p}>0} (\sum_{j' \in RA} a_{j's}.X_{hi'j'p}) + \delta_0(\sum_{i' \in FV/xn_{i'p}>0} (\sum_{j' \in RA} a_{j's}.X_{hi'j'p}))}$$
$$+\sum_{t \in TP/xc_{i,t}>0} (\frac{fir_{tu}/dar.\sum_{h' \in h/h' \geq h-dar+1 \ et \ h' \leq h} IR_{h',t,u} + arr_{h,t,u} + ff_{t,u}.\sum_{h' \in H/h' \leq h} IR_{h',t,u}}{\sum_{i' \in FV/xc_{i't}>0} \sum_{k' \in RD} c_{k'u}.Y_{hi'k} + \delta_0(\sum_{i' \in FV/xc_{i't}>0} \sum_{k' \in RD} c_{k'u}.Y_{hi'k})}$$
$$+xc_{i,t}.fv_{t,u}))))) \tag{3.45}$$

3.4.5 Contraintes

$$\sum_{k \in RD} d_{k,v}.Y_{h,i,k} = pv_{h,i,k}$$
$$\forall i \in FV, v \in ZC, h \in H \tag{3.46}$$

$$xn_{i,p}.\sum_{k \in RD} c_{k,u}.Y_{h,i,k} = \sum_{j \in RA} b_{j,u}.X_{h,i,j,p}$$
$$\forall p \in FP, \forall u \in ZP, \forall i \in FV, h \in H \tag{3.47}$$

$$\sum_{k\in RD} c_{k,u}.(\sum_{i\in FV} Y_{h,i,k}.xc_{i,t}) \geq cap^{min}_{h,t,u}.\sum_{h'\in H/h'\leq h} IR_{h',t,u}$$
$$\forall t \in TP, u \in ZP, h \in H \tag{3.48}$$

$$\sum_{k\in RD} c_{k,u}.(\sum_{i\in FV} Y_{h,i,k}.xc_{i,t}) \leq cap^{max}_{h,t,u}.\sum_{h'\in H/h'\leq h} IR_{h',t,u}$$
$$\forall t \in TP, u \in ZP, h \in H \tag{3.49}$$

$$\sum_{j\in RA} a_{j,s}.(\sum_{i\in FV} X_{h,i,j,p}) \geq app^{min}_{h,p,s}.\sum_{h'\in H/h'\leq h} IA_{h',p,s}$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, h \in H \tag{3.50}$$

$$\sum_{j\in RA} a_{j,s}.(\sum_{i\in FV} X_{h,i,j,p}) \leq app^{max}_{p,s}.\sum_{h'\in H/h'\leq h} IA_{h',p,s}$$
$$\forall p \in FP, s \in ZA, h \in H \tag{3.51}$$

$$IA_{h,p,s} \geq IR_{h,t,u}, \forall h \in H, t \in TP, i \in FV/specifique_{i,t} = 1,$$
$$u \in ZP, p \in FP/sync_p = 1, s \in ZA/local_{s,u} = 1 \tag{3.52}$$

$$\sum_{h\in H} IR_{h,t,u} \leq 1, \forall t \in TP, u \in ZP \tag{3.53}$$

$$\sum_{h\in H} IA_{h,p,s} \leq 1, \forall p \in FP, s \in ZA \tag{3.54}$$

$$IR_{h,t,u} = 0, \forall h \in H/h > h^{max} - das + 1, t \in TP, u \in ZP \tag{3.55}$$

$$IA_{h,p,s} = 0, \forall h \in H/h > h^{max} - dar + 1, p \in FP, s \in ZA \tag{3.56}$$

$$Y_{h,i,k} \geq 0, \forall i \in FV, k \in RD, h \in H \tag{3.57}$$

$$X_{h,i,j,p} \geq 0, \forall i \in FV, p \in FP, j \in RA, h \in H \tag{3.58}$$

$$IR_{h,t,u} \in \{0,1\}, \forall t \in TP, u \in ZP, h \in H \tag{3.59}$$

$$IA_{h,p,s} \in \{0,1\}, \forall p \in FP, s \in ZA, h \in H \tag{3.60}$$

Les contraintes (3.46) vérifient que la demande est entièrement satisfaite à toutes les périodes. Les contraintes (3.47) assurent que l'équilibre des flux est respecté. Les contraintes (3.50) et (3.51) assurent le respect des capacités minimum et maximum d'approvisionnement sur les sources d'approvisionnement. Les contraintes (3.48) et (3.49) assurent le respect des capacités minimales et maximales des ressources de production. Les ressources de production et les sources d'approvisionnement ne peuvent être investies qu'une seule fois sur l'horizon (3.53) et (3.54) et les contraintes (3.55) et (3.56) assurent que les investissements soient réalisés suffisamment tôt pour pouvoir amortir complétement les frais d'investissement sur l'horizon. Les variables de flux sont positives (3.57) et (3.58). Les variables d'investissements sont booléennes (3.59) et (3.60).

3.4.6 Modélisation des investissements

Pour différentier les investissements existants et potentiels, les premiers sont considérés avec leurs variables correspondantes ($IA_{h,p,s}$ et $IR_{h,t,u}$) à 1 en première période, des frais d'investissements $fia_{p,s}$ et $fir_{t,u}$ nuls mais avec des frais d'amortissement restants $asr_{h,p,s}$ et $arr_{h,t,u}$ non nuls pour les périodes de fin de l'amortissement.

Les investissements potentiels ont leurs variables libres, des frais d'investissements non nuls et un amortissement restant nul.

L'amortissement restant des ressources de production $arr_{h,t,u}$ est calculé comme suit :

$$arr_{h,t,u} = \begin{cases} frais_amortissement_restant_ressource_{t,u}/duree_amortissement_restante_ressource_{t,u} \\ \text{si } duree_amortissement_restante_ressource_{t,u} > 0 \\ \text{et } h < min(H) + duree_amortissement_restante_ressource_{t,u}, \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$
$$\forall h \in H, t \in TP, u \in ZP \tag{3.61}$$

L'amortissement restant des sources d'approvisionnement $asr_{h,p,s}$ est calculé comme suit :

$$asr_{h,p,s} = \begin{cases} frais_amortissement_restant_source_{p,s}/duree_amortissement_restante_source_{p,s} \\ \text{si } duree_amortissement_restante_source_{p,s} > 0 \\ \text{et } h < min(H) + duree_amortissement_restante_source_{p,s}, \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$
$$\forall h \in H, p \in FP, s \in ZA \tag{3.62}$$

3.5 Méthodes de résolution

Nous présentons une heuristique basée sur la programmation linéaire mixte successive et une métaheuristique.

3.5.1 Heuristique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers successive

Dans cette méthode de résolution, nous linéarisons la fonction objectif pour revenir à un problème d'optimisation linéaire mixte. Pour cela, nous prenons les hypothèses suivantes :

- nous estimons la masse achat d'un véhicule pour calculer a priori un prix de cession,
- nous différentions les frais d'investissement et les frais d'exploitation,
- nous variabilisons avec une quantité de production standard les frais fixes de production qui sont alors inclus dans les frais variables.

3.5.1.1 Estimation de la masse achat

La masse achat d'un véhicule est estimée a priori : la somme des coûts rendu de tous les flux d'approvisionnement est estimée a priori (par exemple, avec les valeurs d'un projet véhicule similaire ou à l'aide des prix objectifs des projets). Cela permet de calculer une masse achat $ma_{i,u}(i \in FV, u \in ZP)$ qui servira au calcul de la douane de distribution. Cette estimation sera mise à jour avec un calcul précis à partir des quantités réellement transportées dans le fonctionnement itératif de l'algorithme.

3.5.1.2 Différentiation des frais d'investissement et d'exploitation

Les frais d'investissements sont calculés séparément de la valeur des flux, c'est à dire de la masse achat (pour l'investissement des sources d'approvisionnement) et des prix de revient (pour l'investissement des ressources de production). Ainsi on sous-estime la valeur des stocks d'approvisionnement et les coûts de douane et la valeur des stocks de distribution.

3.5.1.3 Variabilisation des frais fixes

Enfin, les frais fixes de production sont variabilisés (amortis sur la quantité empirique d'utilisation des capacités de production pour obtenir une part de ce coût fixe au véhicule) et intégrés aux frais variables de production. On divise les frais fixes de production par la capacité de production pour obtenir un coût unitaire des frais fixes de production.

La fonction objectif 3.44 est alors remplacée par la fonction objectif 3.63.

$$
\begin{aligned}
& Minimiser f(X,Y,IA,IR) = \\
& \sum_{h\in H} xd_h.\Big(\sum_{i\in FV}\sum_{k\in RD} Y_{h,i,k}.(pfd_{i,k} + xcs_{i,u}.(xfd_{i,k}.(\sum_{t\in TP} xc_{i,t}.fv_{t,u}) + ma_{iu}.(xfd_{i,k}-1))) \\
& \qquad + \sum_{i\in FV}\sum_{j\in RA}\sum_{p\in FP}(X_{h,i,j,p}.pfa_{j,p}) \\
& \qquad + \sum_{p\in FP}\sum_{s\in ZA}(fia_{p,s}.\sum_{h'\in H/h'\geq h-das+1 \ et \ h'\leq h} IA_{h',p,s}/das + asr_{h,p,s}) \\
& \qquad + \sum_{t\in TP}\sum_{u\in ZP}(fir_{t,u,s}.\sum_{h'\in H/h'\geq h-dar+1 \ et \ h'\leq h} IR_{h',t,u}/dar + arr_{h,t,u})\Big) \qquad (3.63)
\end{aligned}
$$

avec pour variables les flux d'approvisionnement X, les flux de distribution Y, les investissements des sources d'approvisionnement IA et les investissements des ressouces de production IR.

sous contraintes 3.46 à 3.60

La fonction objectif fait donc la somme entre les coûts d'exploitation comprenant les frais de distribution calculés notamment à partir de la masse achat, les frais de production ainsi que les frais d'approvisionnement. De plus, les frais des investissements en sources d'approvisionnement (potentielles et existantes) et en ressources de production (potentielles et existantes) sont ajoutés. Les contraintes sont identiques à celle du problème de planification stratégique défini en 3.4.

Cette méthode utilise successivement ce modèle linéaire mixte. L'idée est de mettre à jour sucessivement l'estimation de la masse achat jusqu'à obtenir un minimum local : à chaque itération, on modifie cette estimation de la masse achat avec la valeur réelle de masse achat calculée à partir des flux d'approvisionnement. A partir de ces valeurs de masse achat, on utilise le MILP pour optimiser à la fois les investissements en source d'approvisionnement et en ressources de production ainsi que les

quantités de flux d'approvisionnement et de distribution. Cette nouvelle solution pourra être évaluée pour calculer une nouvelle valeur de masse achat. On itère ainsi jusqu'à convergence de l'algorithme, c'est-à-dire jusqu'à ce que les masses d'achat n'évoluent plus en deux itérations (critère d'arrêt).

La figure 3.9 présente un schéma de l'algorithme proposé.

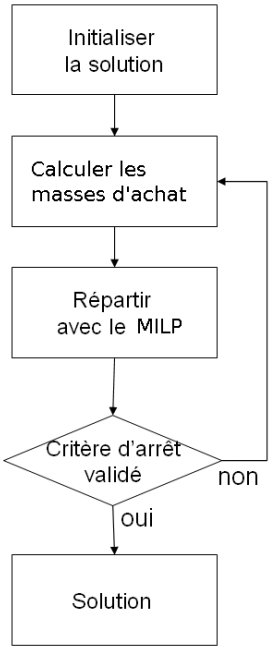


Figure 3.9 – Synopsis de la méthode de programmation linéaire en nombres entiers successive

3.5.2 Métaheuristique

Nous proposons une métaheuristique pour résoudre le problème sans prendre d'hypothèses simplificatrices dans sa formulation. Il s'agit d'un chaînage entre une recherche locale utilisant plusieurs voisinages pour modifier les investissements et la résolution successive des problèmes de répartition (à partir des investissements définis et pour chaque période). Nous présentons le codage des solutions, les systèmes de voisinage et l'algorithme de principe.

3.5.2.1 Codage des solutions

Les solutions sont codées en deux parties : une partie représentant les flux de distribution et une seconde partie représentant les investissements. La première partie est une matrice $(Y_{h,i,k})_{h\in H,i\in FV,k\in K}$ correspondant aux quantités sur les flux de distribution de la famille de véhicules i transportée sur la route de distribution k à la période h. Les flux impossibles sont valorisés à -1.

La seconde partie est composée d'une première matrice $(HR_{h,t,u})_{h\in H,t\in TP,u\in ZP}$ où $HR_{t,u}$ correspond à la décision d'investissement à la période h de la ressource de production de la technologie de production t sur la zone de production u. Nous avons aussi une seconde matrice $(HS_{h,p,s})_{h\in H,p\in FP,s\in ZA}$ où $HS_{h,p,s}$ correspond à la décision d'investissement à la période h de la source d'approvisionnement de la famille de pièces p sur la zone d'approvisionnement s. Pour ces deux matrices, la valeur 0 indique qu'il n'y a pas d'investissement et la valeur 1 indique qu'un investissement est réalisé.

3.5.2.2 Systèmes de voisinage

Deux ensembles de systèmes de voisinage sont utilisés. Un premier ensemble de systèmes de voisinage va modifier les investissements à la fois en ressources de production et en sources d'aprovisionnement. Ces voisinages sont classiquement utilisés pour les problèmes de Facility Location [AMZM09].

Les sytèmes de voisinage sur les investissements sont les suivants :

- ADD source : On ouvre au hasard une source à une période au hasard.
- DROP source : On annule l'ouverture d'une source.
- SHIFT source : On décale l'ouverture d'une source dans le temps.
- SWITCH source : Pour une famille de pièces donnée, on ferme une source ouverte et on ouvre une source fermée d'une autre zone d'approvisionnement.
- ADD ressource : On ouvre une ressource au hasard à une période au hasard.
- DROP ressource : On annule l'ouverture d'une ressource.
- SHIFT ressource : On déplace dans le temps l'ouverture d'une ressource.
- SWITCH ressource : Pour une technologie de production donnée, on ferme un ressource de production ouverte et on ouvre une ressource fermée sur une autre zone d'approvisionnement.

La figure 3.10 donne un exemple des différents voisinages sur les sources d'approvisionnement. La figure 3.11 donne un exemple des différents voisinages sur les ressources de production.

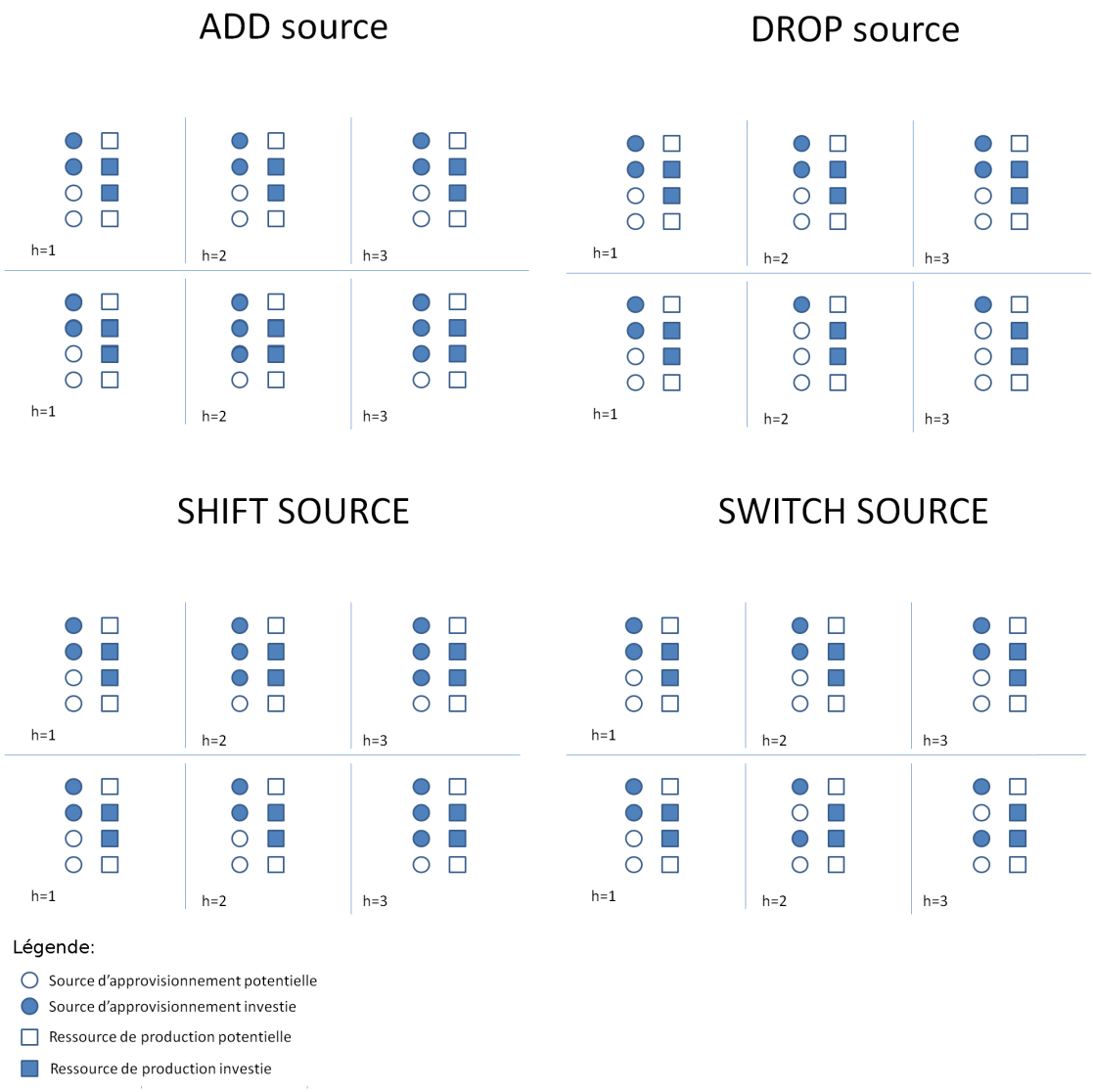


Figure 3.10 – Schéma des voisinages sur les sources

Le second ensemble de voisinages comprend un unique voisinage sur les flux de distribution (cf. 2.3.5.3).

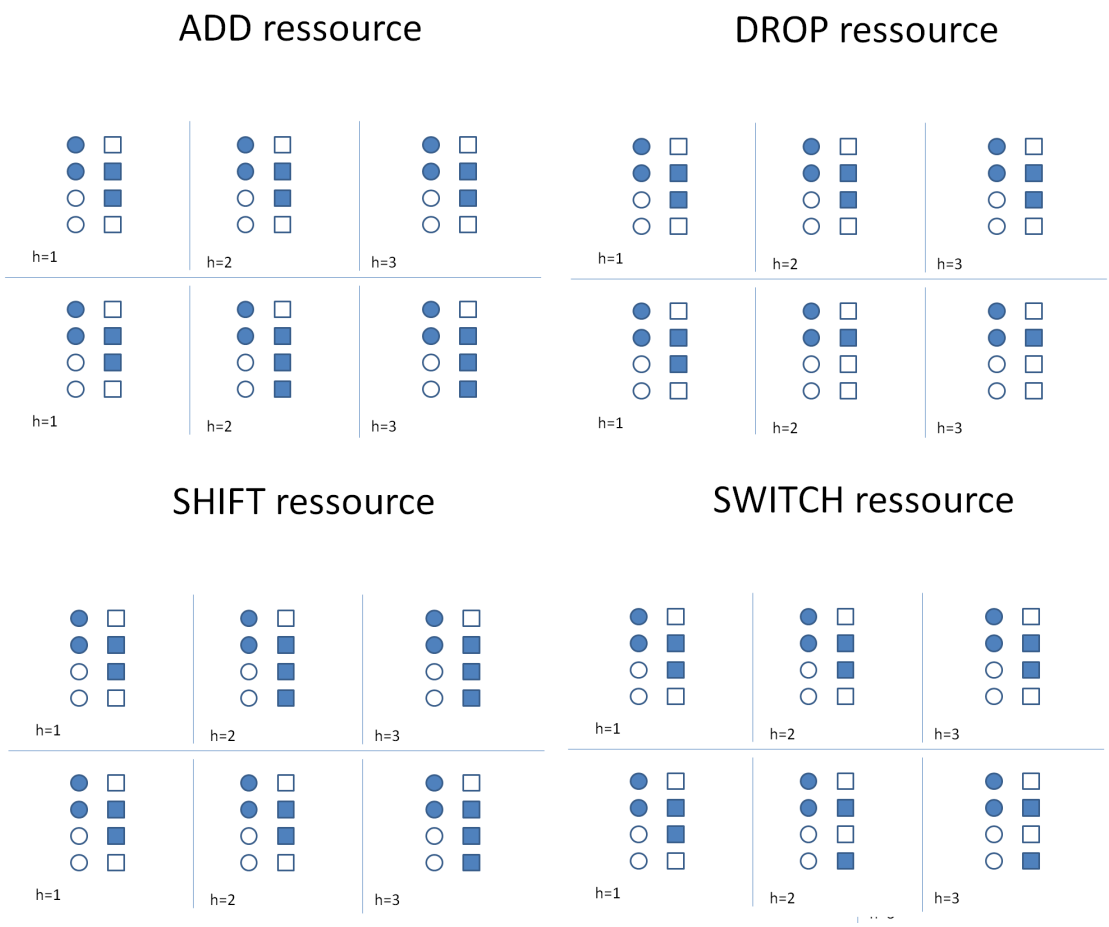


Figure 3.11 – Schémas des voisinages sur les ressources

3.5.2.3 Algorithme de principe

L'algorithme 12 présente le couplage entre les différentes métaheuristiques.

La vérification de la faisabilité après l'application des voisinages sur les investissement et l'initialisation est réalisée avec le programme linéaire avec des prix de cession estimés. Cela pourrait aussi être réalisé avec l'heuristique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers successive présentée précédement (3.5.1).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini le problème de planification stratégique de la chaîne logistique de PSA au travers d'un modèle de connaissance. Nous avons vu au cours d'un état de l'art que ce problème est très étudié mais reste difficile à résoudre notamment dans les cas d'un environnement international (avec des prix de cession) et avec des économies d'échelles. De plus, de nombreuses applications commerciales proposent d'optimiser des réseaux logistiques. Cependant, aucune application commercialle ne prend en compte le calcul des prix de cession. Ce dernier a un impact majeur sur l'évaluation de la fonction objectif. Nous avons ensuite proposé une formulation mathématique du problème. Enfin, nous avons présenté deux méthodes de résolution, une heuristique et une métaheuristique.

Il existe de nombreuses perspectives d'amélioration des modèles d'aide à la décision pour la planification stratégique. A la fois en termes de modélisation et de résolution :

– concernant la modélisation, l'intégration de la notion environnementale devient critique quand

Algorithme 12 Algorithme de principe de la planification stratégique

1: Initialiser la solution courante S_0 .
2: Soit S_best la meilleure solution connue.
3: **répéter**
4: Sélectionner aléatoirement un voisinage sur les investissements et l'appliquer.
5: Déterminer une solution initiale de répartition sur toutes en estimant les prix de cession et en utilisant le modèle linaire.
6: **si** une solution initiale admissible est trouvée **alors**
7: **pour** chaque période h dans H **faire**
8: Appliquer une métaheuristique hybride de répartition stratégique en partant de la solution initiale.
9: Calculer les nouveaux prix de cession pc à partir de la fonction 3.44 .
10: **fin pour**
11: **si** $f(S_k) < f(S_best)$ **alors**
12: $S_best := S_k$
13: **fin si**
14: $k := k + 1$
15: **fin si**
16: **jusqu'à** $k = k_max$

les entreprises intègrent le développement durable dans leur stratégie. De plus, la prise en compte des risques, des incertitudes et des variabilités dans le modèle offrirait des solutions robustes.

- concernant l'optimisation, l'hybridation de méthodes exactes, heuristiques et méthaheuristiques semble offrir encore des possibilités d'amélioration notamment si des critères multiobjectifs (coût/taux de service/empreinte environnementale...) ou robustes (vis à vis d'un ensemble de scénarios économiques alternatifs) sont considérés.

Dans [MG05], des perspectives de recherche portent sur l'optimisation conjointes de la planification industrielle et des prix de cession (notamment au niveau des incoterms). De plus, seuls 22% des modèles étudiés intègrent la notion de risques. La gestion de ces risques est pourtant primordiale dans l'approche stratégique.

Le chapitre suivant présente l'application industrielle de la problématique au travers d'une application d'aide à la décision et d'un cas d'étude industriel.

Conclusion

La coordination des diverses activités au sein d'une chaîne logistique est actuellement un enjeu majeur de la performance économique des entreprises industrielles. Cette coordination se concrétise par l'existence d'un système de planification hiérarchique permettant de planifier sur le long terme et de réagir à court terme dans une recherche constante de l'optimisation des ressources limitées de l'entreprise.

La planification stratégique du réseau logistique est une des activités fortement structurante de cette planification hiérarchique. Elle définit et planifie le réseau logistique à long terme (dans l'automobile, cela correspond à près de 10 ans). Ce réseau logistique ainsi organisé sera le support aux activités opérationnelles créatrices de valeur pour l'entreprise. Cependant la complexité opérationnelle est un frein à une optimisation globale notamment par un partage partiel des informations et des prévisions de tous types (commerciales, économiques, technologiques...) qui peuvent s'avérer erronées.

Les décideurs responsables de la planification stratégique de la chaîne logistique font donc de plus en plus appel à des outils d'aide à la décision pour les assister dans cette démarche d'optimisation. Ces outils ont pour but de modéliser le réel dans un modèle numérique qui pourra facilement évaluer des scénarios industriels et proposer des solutions.

La problématique de cette thèse CIFRE au sein d'un constructeur automobile a donc été de réfléchir à quel modèle stratégique utiliser pour représenter l'environnement économique et industriel de l'entreprise pour la planification stratégique de son réseau logistique.

Ensuite, face à la complexité du problème posé, une décomposition du problème a été défini pour le résoudre progressivement ; définissant trois problèmes distincts :

- La répartition stratégique sans contrainte de sourcing,
- La répartition stratégique avec contraintes de souring,
- La planificiation stratégique avec investissements.

Pour chaque problème de répartition stratégique, une formalisation mathématique a été proposée et différents algorithmes d'optimisation de ce modèle ont été proposés et appliqués.

Concernant la planification stratégique, une formalisation a été proposée et des algorithmes d'optimisation ont été proposés.

Cette démarche a donné lieu à la définition d'un prototype d'un outil d'aide à la décision utilisable par les décideurs et à un cas d'étude industriel représentatif de la complexité industrielle rencontrée par l'entreprise. L'application industrielle a démontré l'intérêt pratique et économique d'une approche globale du problème épaulée par un système d'aide à la décision.

Le travail d'analyse de l'existant industriel et organisationnel de l'entreprise a permis de définir un modèle à horizon stratégique intégrant à la fois les contraintes industrielles correspondantes à cet horizon et un modèle d'évaluation économique correspondant. Ce modèle a l'intérêt de prendre en compte l'aspect international de la chaîne logistique de l'entreprise notamment dans les activités logistiques modélisées (transport multimodal, fret maritime, douanes...) et dans l'évaluation économique de la chaîne de valeur, notamment dans la prise en compte des prix de cession.

Le travail d'optimisation du modèle numérique précédemment défini s'est avéré difficile à cause de la propriété de non-convexité des différents problèmes d'optimisation étudiés. Ainsi des approches de résolution basées sur une linéarisation ou sur une approche directement non-linéaire (optimisation convexe et métaheuristiques) ont été testées. De nombreux tests sur des instances générées ont été

réalisés pour valider les approches d'optimisation stochastiques.

Le travail de prototypage et d'application du modèle et des méthodes d'optimisation ont mené à la réalisation d'une application Java baptisée LogNet avec une interface Excel. Un cas d'étude a été réalisé à partir d'un projet industriel mondial. Il a démontré l'intérêt industriel d'un outil d'aide à la décision offrant une synthèse économique et de nombreux indicateurs économiques. Il a aussi montré les limites d'utilisation d'un tel outil notamment en termes de disponibilité des données et de fiabilité des informations nécessaires à l'utilisation fiable d'une telle application. De nombreux modèles d'agrégation de données ont donc été définis pour définir rapidement et à l'aide de peu d'inducteurs les nombreuses données nécessaires.

De nombreuses perspectives existent suite à ce travail.

D'un point de vue scientifique, la définition de modèles économico-industriels réalistes est un domaine de recherche. Les aspects internationaux (meilleure prise en compte des douanes, optimisation des prix de cession...) et les liens avec les modèles financiers (besoins en fond de roulement, coût du financement...) restent encore rarement modélisés. De plus, la gestion des risques ou, plus généralement, des incertitudes est une tendance très forte dans l'environnement volatile actuel. La mondialisation a accéléré les échanges de biens et d'information mais aussi la propagation des crises. L'utilisation d'indicateurs de robustesse ou de flexibilité des solutions est encore balbutiante. Enfin, l'intégration des préoccupations environnementales (bilan CO_2), soit directement valorisées économiquement, soit intégrées comme un second objectif, est une évolution majeure des modèles industriels actuels.

Ces modèles de plus en plus complexes sont naturellement de plus en plus difficiles à résoudre notamment si les propriétés de linéarité ou même de convexité ne sont pas validées. Le compromis entre réalisme et rapidité de résolution reste d'actualité malgré un coût de la puissance de calcul toujours plus faible. Le travail sur les reformulations convexes ou même linéaires de ces problèmes sont des approches très prometteuses. Les difficultés d'optimisation avec les méthodes exactes (généralement basées sur la programmation linéaire) offre une opportunité aux méthodes d'optimisation approchées (notamment les metaheuristiques) encore peu utilisées pour ce type de problèmes. Ces métaheuristiques peuvent encore être accélérées à la fois dans leur algorithmique et dans leur implémentation. L'utilisation de moyens de calcul comme des grilles ou architecture multi-cœur offre par ailleurs des perspectives intéressantes si les méthodes d'optimisation sont conçues pour favoriser le parallélisme.

Une réflexion sur les outils d'aide à la décision et leur intégration dans le système d'information d'une entreprise a aussi été esquissée. Les approches de gestion des connaissances notamment à base d'ontologie peuvent apporter beaucoup à la structuration des données nécessaire au bon fonctionnement des outils d'aide à la décision stratégique. De plus, l'agrégation des données pose la question de l'entreposage des données et de l'utilisation de la fouille de données pour obtenir à chaque fois la bonne information décisionnelle à partir des données opérationnelles. Enfin, la flexibilité et l'évolutivité des modèles stratégiques sont primordiales. Ainsi, des environnements de développement rapide et des langages de modélisation proches du métier (et indépendants des méthodes d'optimisation) sont aussi des perspectives dignes d'intérêt.

Au final, la planification stratégique du réseau logistique d'un constructeur automobile est un enjeu majeur de la pérennité de l'entreprise. L'extension des organisations et la mondialisation rendent toujours plus complexe cette planification. Nous proposons, dans le secteur de la construction automobile, un outil d'aide à la décision modélisant au plus juste les activités industrielles, implémentant des méthodes d'optimisation innovantes et s'intégrant au mieux dans le système d'information existant.

ANNEXE 1 - Procédure de génération des instances de test

Pour valider les différentes méthodes d'optimisation, nous avons généré différents jeux d'essais pour les problèmes monopériode. Cette génération est difficile pour deux raisons : il faut générer des instances réalistes et réalisables. Le réalisme des jeux d'essais doit assurer que les méthodes sont applicables sur des instances industrielles. La réalisabilité assure qu'il existe des solutions au cas posé. Nous présentons d'abord un générateur pour des problèmes de planifications stratégiques et précédemment réalisé dans le cadre des travaux de [TBP08] puis nous présentons la définition des instances générées dans notre cas. Enfin, le processus de génération des données sera présenté.

Générateur d'instance de [TBP08]

Un générateur de données pour des modèles de planification stratégique avec investissement a été présenté dans [TBP08]. Dans ce qui suit, nous allons présenter plus en détails les données générées, la procédure de génération et les paramètres de génération. Nous concluons par les similitudes avec le problème de planification approvisionnement, production et distribution et les éléments pouvant être repris de ces travaux.

Données générées

Les instances générées correspondent à des problèmes de planification multipériodes d'un réseau logistique avec 4 niveaux (fournisseurs, usines, plateformes et clients) avec une nomenclature multi-niveaux. Des ouvertures ou fermetures au niveau des fournisseurs, des usines et des plateformes sont proposés ainsi que des options de capacités de production (au niveau des usines) et des options de capacités de stockage (au niveau des plateformes). Des niveaux maximum d'utilisation des sites sont considérés pour modéliser les phases de transition (lors d'une ouverture ou d'une fermeture).

Les coûts considérés sont à la fois des coûts fixes et des coûts variables :

- Les coûts fixes correspondent aux coûts d'ouverture, de maintien en fonctionnement ou de fermeture des sites et des options de capacité.
- Les coûts variables correspondent aux opérations de production, de stockage, de production en sous-traitance et de transport.

[TBP08] propose une procédure de génération assez générique reprenant en partie des travaux précédemment réalisés. La procédure proposée génère les données dans l'ordre suivant :

1. Demande des clients : une distinction est faite entre des clients standards et des clients importants, ces derniers ayant une demande plus forte. La demande est générée pour plusieurs périodes avec une hypothèse de croissance. Cette seconde partie est identique à [MNSdG06].
2. Nomenclature : La nomenclature multiniveaux est définie en générant les coefficients de nomenclature et de manière à ce que chaque produit fini et chaque produit semi-fini ait bien un composant et que chaque matière première et chaque produit entre bien dans la nomenclature d'un composé.

3. Données concernant les possibilités : Toutes les possibilités d'achat, de production, de stockage sont générées en définissant des seuils minimaux de possibilité au niveau de chaque site concerné (par exemple, pour chaque usine, une matière première est disponible au niveau de 75% de ses fournisseurs). Une procédure similaire est présentée dans [CPS06].
4. Matrice d'incidence entre les nœuds : Toutes les liaisons entre les différents sites sont générées entre les niveaux successifs (entre les fournisseurs et les usines, les usines et les plateformes...) et sans transport direct. Puis entre 2 niveaux, 10% des arcs sont supprimés.
5. Charge unitaire de production, de traitement et de stockage : Ces charges sont générées aléatoirement entre des bornes.
6. Capacités des sites et options de capacités : Les capacités disponibles en première période sont calculées à partir de la demande totale pour chaque type de capacité nécessaires. Ce travail est adapaté de [MD01]. Les capacités des nouveaux sites sont le double de la capacité moyenne des sites existants (cf hypothèse de demande croissante). Les options de capacités sont des fractions de la capacité du site où elles sont disponibles.
7. Evolution du pourcentage d'utilisation maximal des sites : La règle, inspirée de [MM00], est de 50% la première année, 70% la seconde année et 90% (maximum) la dernière année.
8. Coûts fixes : La génération est inspirée de [CC03]. De manière générale, les coûts fixes sont composés d'une partie fixes et d'une partie fonction de la valeur de capacité correspondante.
9. Coût variables : La génération des coûts de production et de stockage est inspirée de [MM00] avec des générations aléatoires. Les coûts de transport sont générés en positionnant les sites sur une grille et en calculant une distance euclidienne comme dans [MD01]. Des tests de réalisabilité sont définis pour s'assurer de la réalisabilité des instances générées. Un test automatique est réalisé pour la cohérence entre la charge et la capacité au niveau des usines et des fournisseurs : des charges sont surestimées et affectées pour vérifier qu'elles ne dépassent pas les capacités disponibles dans le problème. En cas d'échec, une nouvelle instance est générée.

Cette méthode de génération se veut générique et paramétrable en fonction du réseau.

Paramètres de génération

Trois familles d'instances sont déterminées : petite, moyenne et grande. Chaque famille contient 5 instances. Ces trois familles proposent des tailles de problèmes différents avec notamment :

- 5 périodes
- De 15 à 27 fournisseurs, de 10 à 22 usines, de 5 à 13 plateformes et de 100 à 260 clients
- De 10 à 18 produits

Par ailleurs, le ratio charge/capacité est aussi un facteur de difficulté. Trois niveaux sont définis : 1/3, entre 1/4 et 1/7 et entre 1/8 et 1/11. Cela forme des sous-familles.

Au final, 450 instances ont été générées à partir des 15 types d'instances classées dans les 3 familles de ratio charge/capacité (donc 45 sous-familles) avec 10 générations aléatoires par sous-familles.

Conclusion sur le générateur de données de [TBP08]

Notre problème est relativement différent. Tout d'abord, il est multipériodes. Ensuite le réseau logistique considéré ne prend pas en compte les plateformes logistiques. De plus, les investissements ne sont pas tout le temps pris en compte. Enfin, au niveau des coûts et en dehors de l'aspect stockage non traité, nous prenons en compte la douane de manière plus réaliste avec l'application d'un véritable taux de douane sur le prix de cession. Cependant des éléments peuvent être repris :

- La distinction des types de clients pour la génération des demandes,
- L'utilisation de seuils pour s'assurer la diversité de possibilités d'achat et de production.
- La méthode d'obtention des réseaux avec une certaine densité,
- L'utilisation des demandes pour générer les capacités de production,
- Le calcul des coûts de transport à partir d'une grille,

– L'utilisation d'un test de réalisabilité pour valider la génération.

Définition des instances du problème repartition

Les différents coûts sont générés à partir des données d'entrée suivantes :
– Taux de douane approvisionnement minimum et maximum,
– Prix d'achat par famille de pièce minimum et maximum,
– Coût moyen de transport d'approvisionnement minimum et maximum ;
– Amortissement moyen minimum et maximum,
– Frais variables moyens de production minimum et maximum,
– Coût moyen de transport de distribution minimum et maximum,
– Taux de douanes de distribution minimum et maximum.

Ainsi, à partir de ces valeurs minimum et maximum, on définit les intervalles de génération des coûts pour les différentes structures de coûts.

Processus de génération des données

Nous allons maintenant décrire le processus de génération des données. Ce processus est progressif pour assurer la cohérence de chaîne logistique générée.

Etape 1 Définition du réseau

En fonction de la taille du problème, on définit les ZoneApprovisionnement, ZoneProduction et de ZoneCommercialisation, Pour la génération des RouteApprovisionnement et des RouteDistribution, on construit le réseau complet entre les ZA et les ZP et, respectivement, entre les ZP et les ZC. Puis, en fonction de la densité voulue, on supprime aléatoirement différentes des routes d'approvisionnement et des routes de distribution.

Etape 2 Familles de véhicules, de pièce et nomenclature

En fonction de la taille du problème, on définit les FamilleVehicule et FamillePiece. Une plateforme est attribuée aux familles de véhicules et aux familles de pièces en les répartissant de manière équilibrée.

Etape 3 Technologie de production et coefficient de charge

On définit les TechnologieProduction telles que : Peinture, Assemblage pour les différentes plateformes, Ferrage pour les différentes familles de véhicules. La génération des $coeff_charge$ va mettre à 1, pour chaque famille de véhicule, les coefficients correspondant à la peinture, à l'assemblage de la plateforme de la famille de véhicules considérée et le ferrage de la famille de véhicule considérée.

Etape 4 Prévision de ventes

Par famille de véhicule et en fonction de la taille du réseau, on génère une prévision de ventes globale initiale (PVGI). De plus, on différencie les zones de commercialisation en trois types de demandes : importante, standard et mineures ; puis on calcule les $prevision_vente$ selon le type de demande :
– importantes, entre 1 et 3 zones de commercialisation ayant de 15% à 25% de la PVGI,
– standards, 20% des zones de commercialisation avec une demande ayant de 3% à 8% de la PVGI,
– mineures, les autres sites non sélectionnés avec des niveaux de demandes différents ayant de 1% à 3% de la PVGI.

La somme des différentes demandes pour une famille de véhicule formera les prévisions de ventes globales finales (PVGF).

Etape 5 Détermination des productions

Pour définir les possibilités de production, on classe les familles de véhicules par PVGF décroissante. Puis on décide que les premiers 5% de ces familles de véhicules seront en tri-sourcing c'est-à-dire que toutes les distributions de ces familles pourront être satisfaites à partir de 3 zones de production. Ensuite, les 50% des familles de véhicules suivantes seront en bi-sourcing (les distributions de ces familles de véhicules auront deux zones de production capable de les satisfaire). Enfin, les familles de véhicules restantes auront des distributions nécessitant une seule zone de production pouvant les servir. La répartition des productions privilégie les zones qui n'ont aucune production puis répartie aléatoirement les productions.

Etape 6 Ressource et capacités de production

Une fois les productions définies, on sait, à partir des activités de production, quelles technologies de production sont nécessaires sur les différentes zones de production. Pour chaque technologie de production, en fonction des productions de la zone de production, on crée une RessourceProduction si elle n'existe pas déjà. Les diverses capacités cap_min et cap_max (6) sont calculées à partir de la demande prévisionnelle. On fait la somme de la charge par technologie de production avec les $coeff_charge$ de chaque activité de production et les PVGF. On divise cette charge par le nombre de ressource de production pour obtenir une charge moyenne par ressource. Les capacités de production sont calculées comme suit : $cap_max = a * \beta$ avec β tiré aléatoirement dans l'intervalle $[1; 1, 5]$ et $cap_min = a * \alpha$ avec α tiré aléatoirement dans l'intervalle $[0, 5; 1]$. Note : Avec la génération aléatoire des capacités de production et l'inexistence possible des routes, on peut générer des solutions non réalisables. Elles seront détectées avec le programme linéaire de la borne inférieure 2.3.4.

Etape 7 Source et capacité d'approvisionnement

Possibilité des sources d'achat : pour chaque famille de pièce, on sélectionne, sur les zones d'approvisionnement possible (selon les routes et approvisionnant les productions définies), $[2, card(ZA)]$ zones d'approvisionnement pour créer ces sources d'approvisionnement. Par famille de pièces, on calcule les capacités d'approvisionnement à partir de la somme totale des approvisionnements (STA_p) nécessaires, calculée à l'aide des $coeff_nomenclature$. Puis on divise cela par le nombre de source d'approvisionnement possibles. Les capacités d'approvisionnement sont donc $app_max = STA_p/card(SA) * \beta$ avec β tiré aléatoirement dans l'intervalle $[1; 1, 5]$ et $app_min = STAp/|SA| * alpha$ avec α tiré aléatoirement dans l'intervalle $[0, 5; 1]$. Note : Avec la génération aléatoire des capacités d'approvisionnement et l'inexistence possible des routes, on peut générer des solutions non réalisables. Elles seront détectées avec le programme linéaire de la borne inférieure 2.3.4.

Etape 8 Détermination des prix

Localisation et estimation des distances

On génère enfin les prix de transport en localisant les différentes zones sur une grille de 1000x1000. Cela donnera une distance Euclidienne D entre deux zones d'approvisionnement et de production et D' entre deux zones de production et de commercialisation. On définit un coût moyen entre 0,015 et 0,040€/km/pc pour l'approvisionnement et entre 0,08 et 0,12€/km/vhl pour la distribution.

Prix flux d'approvisionnement

La génération des prix des flux d'approvisionnement est réalisée en distinguant trois sous-composantes :

1. la part transport,
2. la part achat,
3. la part douane.

La part transport est défini à l'aide de la distance entre la ZA et ZP considérée corrigée d'un coefficient correspondant au transport d'approvisionnement (cf 6.3.9.1). La part achat est calculée à partir d'un prix d'achat standard global par pièce ($PASG_p$). Celui ci est défini en le générant dans l'intervalle $[0,05 - 600]$. Ce coefficient correspond à l'écart moyen de coût d'achat entre la zone d'approvisionnement d'Europe occidentale et une zone d'approvisionnement étudiée. Puis, selon la zone d'approvisionnement, on génère un coefficient de performance achat XPA générée entre $[0,5 - 1,5]$. On obtient la part achat en calculant $PASG_p * XPA$. La part douane est définie aléatoirement : Pour chaque famille de pièce et chaque route d'approvisionnement, on génère un $Taux_douanes_appro$ compris dans l'intervalle $[0;35]\%$ qui est appliqué à la part achat et à la part transport.

Frais fixes et variables de production

Par ressource de production, les prix de $Frais_fixes$ sont définis en utilisant un amortissement moyen entre 100 et 200€multiplié par la cap_max de la ressource de production. Les $Frais_variables$ sont alors générés par ressource entre 50 et 300€/vhl.

Douanes de distribution et Coeff flux de distribution

Pour chaque famille de véhicule et chaque route de distribution, on génère un $Taux_douanes_distri$ compris dans l'intervalle $[0;90]\%$.

Prix flux distribution

On génère les coûts logistiques de distribution en reprenant la distance D entre les zones de production et de commercialisation et en calculant un $prix_flux_distribution$ (€/vhl) égal à $D' * Cout_moyen_distribution * (1 + taux_douanes_distri)$.

Références bibliographiques

[ABH+04] C. Audet, J. Brimberg, P. Hansen, S. Le Digabel, and N. Mladenović. Pooling problem : Alternate formulations and solution methods. *Management science*, 50 :761–776, 2004.

[ABHT95] B.C. Arntzen, G.G. Brown, T.P. Harrison, and L.L. Trafton. Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces*, 25 :69–93, 1995.

[AE09] H. Almutairi and S. Elhedhli. A new Lagrangean approach to the pooling problem. *Journal of Global Optimization*, 45 :237–257, 2009.

[AGIS03] H. Arsham, M. Gradisar, and M. Indihar Stemberger. Linearly constrained global optimization : a general solution algorithm with applications. *Applied Mathematics and Computation*, 134(2-3) :345–361, 2003.

[AMZM09] H. Amrani, A. Martel, N. Zufferey, and P. Makeeva. A variable neighborhood search heuristic for the design of multicommodity production–distribution networks with alternative facility configurations. *OR Spectrum*, Online First :1–19, 2009.

[Ant65] R.N. Anthony. *Planning and control systems : a framework for analysis.* Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University, 1965.

[AXX09] AXXOM. Orion-pi. Technical report, http ://www.axxom.com, 2009.

[Bal04] R.H. Ballou. *Business logistics/supply chain management : planning, organizing, and controlling the supply chain.* Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004.

[BC05] J.H. Blackstone and JF Cox. *APICS dictionary.* APICS, 2005.

[BCC02] D.J. Bowersox, D.J. Closs, and M.B. Cooper. *Supply chain logistics management.* McGraw-Hill/Irwin, 2002.

[BL85] T.E. Baker and L.S. Lasdon. Successive linear programming at Exxon. *Management science*, 30 :264–274, 1985.

[BNW06] R.H. Byrd, J. Nocedal, and R.A. Waltz. KNITRO : An integrated package for nonlinear optimization. *Large-scale nonlinear optimization*, 83 :35–59, 2006.

[CC03] M.J. Cortinhal and M.E. Captivo. Upper and lower bounds for the single source capacitated location problem. *European Journal of Operational Research*, 151(2) :333–351, 2003.

[CCW05] F.T.S. Chan, SH Chung, and S. Wadhwa. A hybrid genetic algorithm for production and distribution. *Omega*, 33(4) :345–355, 2005.

[CFL09] S.S. Chauhan, J.M. Frayret, and L. LeBel. Multi-commodity supply network planning in the forest supply chain. *European Journal of Operational Research*, 196(2) :688–696, 2009.

[CG07] C. Chandra and J. Grabis. *Supply chain configuration : concepts, solutions, and applications.* Springer, 2007.

[Chr05] M. Christopher. *Logistics and supply chain management : creating value-added networks.* Financial Times/Prentice Hall, 2005.

[CM91] M. Cohen and S. Moon. An integrated plant loading model with economies of scale and scope. *European Journal of Operational Research*, 50(3) :266–279, 1991.

[CM01] S. Chopra and P. Meindl. *Supply Chain Management : Strategy, Planning, and Operation*. Prentice-Hall, 2001.

[CN96] J. Castro and N. Nabona. An implementation of linear and nonlinear multicommodity network flows. *European Journal of Operational Research*, 92(1) :37–53, 1996.

[Coo64] L. Cooper. Heuristic methods for location-allocation problems. *Siam Review*, 6(1) :37–53, 1964.

[CP03] S.S. Chauhan and J.M. Proth. The concave cost supply problem. *European Journal of Operational Research*, 148(2) :374–383, 2003.

[CPS06] J.F. Cordeau, F. Pasin, and M.M. Solomon. An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144(1) :59–82, 2006.

[Cro99] K.L. Croxton. *Modeling and solving network flow problems with piecewise linear costs, with applications in supply chain management*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[CW95] B. Coriat and O. Weistein. Herbert Simon et la rationalité limitée, in Les nouvelles théories économiques. *Cahiers Français*, 272 :16, 1995.

[DBG+07] W. Dullaert, O. Braysy, M. Goetschalckx, B. Raa, and A. Center. Supply chain (re) design : Support for managerial and policy decisions. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 7(2) :73–92, 2007.

[DBX06] H. Ding, L. Benyoucef, and X. Xie. A simulation-based multi-objective genetic algorithm approach for networked enterprises optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(6) :609–623, 2006.

[DF07] PP Dornier and M. Fender. *La logistique globale et le Supply Chain Management*. Edition d'organisation, 2007.

[EGG+99] LF Escudero, E. Galindo, G. Garcia, E. Gomez, and V. Sabau. Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 119(1) :14–34, 1999.

[Eur09] Eurodécision. Lp-supplychain. Technical report, http ://www.eurodecision.com, 2009.

[FFH06] B. Fleischmann, S. Ferber, and P. Henrich. Strategic planning of BMW's global production network. *Interfaces*, 36(3) :194–208, 2006.

[FG07] D.B.M.M. Fontes and J.F. Gonçalves. Heuristic solutions for general concave minimum cost network flow problems. *Networks*, 50(1) :67–76, 2007.

[FL06] D.B.M.M. Fontes and L.I.P. LA. On minimum concave cost network flow problems. 2006.

[Fle93] B. Fleischmann. Designing distribution systems with transport economies of scale. *European Journal of Operational Research*, 70(1) :31–42, 1993.

[For61] J.W. Forrester. *Industrial dynamics*. Productivity Press, 1961.

[FS04] G. Fandel and M. Stammen. A general model for extended strategic supply chain management with emphasis on product life cycles including development and recycling. *International journal of production economics*, 89(3) :293–308, 2004.

[GCF98] B. Gendron, T.G. Crainic, and A. Frangioni. *Multicommodity capacitated network design*, volume Telecommunications Network Planning. Springer, 1998.

[GCI00] M. Gen, J. Choi, and K. Ida. Improved genetic algorithm for generalized transportation problem. *Artificial Life and Robotics*, 4(2) :96–102, 2000.

[Gen03] P. Genin. Planification tactique robuste avec usage d'un APS Proposition d'un mode de gestion par plan de référence. *Mémoire de thèse, Ecole des Mines de Paris, France*, 2003.

[GF07] M. Goetschalckx and B. Fleischmann. *Strategic network design*. Springer, 2007.

[GK01] M Gourgand and P Kellert. Conception d'un environnement de modélisation des systèmes de production. *Troisième congrès de international de Génie Industriel, Tours*, 2001.

[GLFBGC09] F.A. Gruat La Forme, V. Botta-Genoulaz, and J.P. Campagne. The role of APS systems in Supply Chain Management : a theoretical and industrial analysis. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5(3) :356–374, 2009.

[GLS93] M. Grotschel, L. Lovasz, and A. Schrijver. *Geometric algorithms and combinatorial optimization*, volume 2. Springer-Verlag, 1993.

[Gol97] E. Goldratt. *Critical Chain : A Business Novel.* Great Barrington, MA : The North River Press, 1997.

[GP90] G.M. Guisewite and P.M. Pardalos. Minimum concave-cost network flow problems : Applications, complexity, and algorithms. *Annals of Operations Research*, 25(1) :75–99, 1990.

[GP95] A.M. Geoffrion and R.F. Powers. Twenty years of strategic distribution system design : An evolutionary perspective. *Interfaces*, 25(5) :105–127, 1995.

[GVD02] M. Goetschalckx, C.J. Vidal, and K. Dogan. Modeling and design of global logistics systems : A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1) :1–18, 2002.

[GW00] S.C. Graves and S.P. Willems. Optimizing strategic safety stock placement in supply chains. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2(1) :68–83, 2000.

[Har03] T. Harrison. *Principles for the strategic design of supply chains in The practice of supply chain management : where theory and application converge*, chapter 1, pages 3 – 12. KLUWER ACADEMIC, 2003.

[Hen99] J.C. Hennet. From the aggregate plan to lot-sizing in multi-level production planning. *Springer-Verlag, Berlin*, pages 5–23, 1999.

[HFHA08] R. Hammami, Y. Frein, and A.B. Hadj-Alouane. Supply chain design in the delocalization context : Relevant features and new modeling tendencies. *International Journal of Production Economics*, 113(2) :641–656, 2008.

[Hic99] D. A. Hicks. A four step methodology for using simulation and optimization technologies in strategic supply chain planning. In *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation : Simulation—a bridge to the future, pp. 1215 - 1220,*, 1999.

[HL09] Chaug-Ing Hsu and Hui-Chieh Li. An integrated plant capacity and production planning model for high-tech manufacturing firms with economies of scale. *International Journal of Production Economics*, 118(2) :486 – 500, 2009.

[HM75] A.C. Hax and H.C. Meal. Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. *Logistics : TIMS Studies in Management Sciences*, 1 :53–60, 1975.

[HPC04] M. Holweg, F.K. Pil, and T. Christiansen. *The second century : reconnecting customer and value chain through build-to-order : moving beyond mass and lean production in the auto industry.* The MIT Press Ltd, 2004.

[I209] I2. Supply chain strategist. Technical report, http ://www.i2.com, 2009.

[IBM09] IBM/ILOG. Logicnet plus xe. Technical report, http ://www.ibm.com/, 2009.

[Ins09] Insight. Sails. Technical report, http ://www.insight-mss.com, 2009.

[IS01] N. Ilich and S.P. Simonovic. An evolution program for non-linear transportation problems. *Journal of Heuristics*, 7(2) :145–168, 2001.

[JB80] P.A. Jensen and J.W. Barnes. *Network flow programming.* John Wiley & Sons, 1980.

[JB09] N. Jawahar and AN Balaji. A genetic algorithm for the two-stage supply chain distribution problem associated with a fixed charge. *European Journal of Operational Research*, 194(2) :496–537, 2009.

[JDA09] JDA. Network & inventory optimization. Technical report, http ://www.jda.com, 2009.

[JFGB04] A. Joly, Y. Frein, D. Gauthier, and V. Bernier. Etude de l'impact des blocages sur le flux de production d'une usine terminale automobile. *Journal européen des systèmes automatisés*, 38(3-4) :291–313, 2004.

[JJCP02] Y.J. Jang, S.Y. Jang, B.M. Chang, and J. Park. A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2) :263–281, 2002.

[JJT06] M. Ji, Z. Jin, and H. Tang. An improved simulated annealing for solving the linear constrained optimization problems. *Applied mathematics and computation*, 183(1) :251–259, 2006.

[JP01] V. Jayaraman and H. Pirkul. Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of Operational Research*, 133(2) :394–408, 2001.

[KK82] D.L. Kelly and B.M. Khumawala. Capacitated warehouse location with concave costs. *Journal of the Operational Research Society*, 33 :817–826, 1982.

[KM99] S. Koziel and Z. Michalewicz. Evolutionary algorithms, homomorphous mappings, and constrained parameter optimization. *Evolutionary computation*, 7(1) :19–44, 1999.

[KM06] J. Kallrath and T.I. Maindl. *Real optimization with SAP APO*. Springer Verlag, 2006.

[KP99] D. Kim and P.M. Pardalos. A solution approach to the fixed charge network flow problem using a dynamic slope scaling procedure. *Operations Research Letters*, 24(4) :195–203, 1999.

[KR00] P. Kouvelis and M. Rosenblatt. A mathematical programming model for global supply chain management : Conceptual approach and managerial insights. *Supply Chain Management : Models, Applications, and Research Directions,(Eds. Geunes et al.), Kluwer Publisher*, 2000.

[KS99] M. Koksalan and H. Sural. Efes Beverage Group makes location and distribution decisions for its malt plants. *Interfaces*, 29(2) :89–103, 1999.

[Lar10] Larousse. *Dictionnaire*. 2010.

[LHHA06] J. Lamothe, K. Hadj-Hamou, and M. Aldanondo. An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. *European Journal of Operational Research*, 169(3) :1030–1047, 2006.

[Lla09] Llamasoft. Supply chain guru. Technical report, http ://www.llamasoft.com, 2009.

[LMR94] T. Larsson, A. Migdalas, and M. Ronnqvist. A Lagrangean heuristic for the capacitated concave minimum cost network flow problem. *European journal of operational research*, 78(1) :116–129, 1994.

[Lou01] H. Lourenco. Supply Chain Management : An Opportunity for Metaheuristics. *Economics Working Papers*, 538, 2001.

[LR05] A. Langevin and D. Riopel. *Logistics systems : design and optimization*. Springer Verlag, 2005.

[LTPD08] H.A. Le Thi and T. Pham Dinh. A continuous approach for the concave cost supply problem via DC programming and DCA. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3) :325–338, 2008.

[Mag09] Supply Chain Magazine. Synthèse de l'offre aps. Technical report, http ://www.supplychainmagazine.fr/TOUTE-INFO/APPELSOFFRE/APS/APS.html., 2009.

[Mar] A. Martel. Conception de réseaux logistiques globaux. *Cours MBA gestion manufacturière et logistique : Conception et Gestion de chaînes logistiques*, pages 287–300.

[Mar05] A. Martel. The design of production-distribution networks : A mathematical programming approach. *APPLIED OPTIMIZATION*, 98 :265, 2005.

[McK75] P. McKeown. A vertex ranking procedure for solving the linear fixed-charge problem. *Operations Research*, 23(6) :1183–1191, 1975.

[MD01] S. Melkote and M.S. Daskin. Capacitated facility location/network design problems. *European Journal of Operational Research*, 129(3) :481–495, 2001.

[Mey04] H. Meyr. Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum*, 26(4) :447–470, 2004.

[MF09] R. Misener and C.A. Floudas. Advancces for the pooling problem - modeling, global optimization and computational studies. *Appl. Comput. Math*, 8(1) :3–22, 2009.

[MG05] M.J. Meixell and V.B. Gargeya. Global supply chain design : A literature review and critique. *Transportation Research Part E*, 41(6) :531–550, 2005.

[MM00] E. Melachrinoudis and H. Min. The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility : A multiple objective approach. *European Journal of Operational Research*, 123(1) :1–15, 2000.

[MM04] A. Muriel and F.N. Munshi. Capacitated multicommodity network flow problems with piecewise linear concave costs. *IIE Transactions*, 36(7) :683–696, 2004.

[MMBDA06] A. Martel, W. M Barek, and S. D Amours. L'influence des facteurs internationaux sur la compétitivité des réseaux de création de valeur multinationaux : le cas des compagnies canadiennes de pâtes et papiers. *GESTION-MONTREAL-*, 31(3) :85, 2006.

[MNSdG06] MT Melo, S. Nickel, and F. Saldanha da Gama. Dynamic multi-commodity capacitated facility location : a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers and Operations Research*, 33(1) :181–208, 2006.

[MNSdG09] MT Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-da Gama. Facility location and supply chain management–A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2) :401–412, 2009.

[Mod09] Modellium. Sc-studio. Technical report, http ://www.modellium.com/, 2009.

[Moo89] S. Moon. Application of generalised benders decomposition to a non linear distribution system design problem. *Naval Research Logistics*, 36 :283–295, 1989.

[Mur68] K.G. Murty. Solving the fixed charge problem by ranking the extreme points. *Operations Research*, 16(2) :268–279, 1968.

[NP08] A. Nahapetyan and P. Pardalos. Adaptive dynamic cost updating procedure for solving fixed charge network flow problems. *Computational Optimization and Applications*, 39(1) :37–50, 2008.

[Opt09] Optiant. Power chain. Technical report, http ://www.optiant.com/solutions/, 2009.

[Ora09] Oracle. Strategic network optimization. Technical report, http ://www.oracle.com/, 2009.

[PHLDM09] S. Perron, P. Hansen, S. Le Digabel, and N. Mladenović. Exact and heuristic solutions of the global supply chain problem with transfer pricing. *European Journal of Operational Research*, 2009.

[Pim01] Y. Pimor. *Logistique, Techniques et mises en ceuvre, 2è.* Ed, 2001.

[PMD04] M. Paquet, A. Martel, and G. Desaulniers. Including technology selection decisions in manufacturing network design models. *International journal of computer integrated manufacturing*, 17(2) :117–125, 2004.

[Poi09] Profit Point. Profitnetwork. Technical report, http ://www.profitpt.com/, 2009.

[Por98] M.E. Porter. *Competitive advantage : Creating and sustaining superior performance.* Free Press, 1998.

[PRI06] F. Pirard, F. Riane, and S. Iassinovski. Une démarche hybride d'aide à la decision pour la reconfiguration et la planification strategique des réseaux logistiques des entreprises multi-sites. In *Conférence MOSIM'06, Rabat, Maroc*, 2006.

[Qui09] Quintiq. Quintiq strategic planner. Technical report, http ://www.quintiq.com/, 2009.

[RLC05] D. Riopel, A. Langevin, and J.F. Campbell. The network of logistics decisions. *Logistical Systems : Design and Optimization*, 2 :1–38, 2005.

[RNP09] S. Rebennack, A. Nahapetyan, and P.M. Pardalos. Bilinear modeling solution approach for fixed charge network flow problems. *Optimization Letters*, 3(3) :347–355, 2009.

[Sah96] N.V. Sahinidis. BARON : A general purpose global optimization software package. *Journal of Global Optimization*, 8(2) :201–205, 1996.

[SB00] E.H. Sabri and B.M. Beamon. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28(5) :581–598, 2000.

[Sch02] A. Schrijver. On the history of the transportation and maximum flow problems. *Mathematical Programming*, 91(3) :437–445, 2002.

[Sch03] C.A. Schneeweiss. *Distributed decision making*. Springer Verlag, 2003.

[SGNG09] M. Suon, N. Grangeon, S. Norre, and O. Gourguechon. Configuration de réseaux logistiques approvisionnement, production et distribution : Etat de l'art. *JDJN MACS, Angers*, 2009.

[SGNG10a] M. Suon, N. Grangeon, S. Norre, and O. Gourguechon. A hybrid metaheuristic for a strategic supply chain planning problem with procurement-production-distribution activities and economy of scale. *Proceedings of the 3rd International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain Creating value through green supply chains ILS 2010, Casablanca (Morocco), April 14-16*, 2010.

[SGNG10b] M. Suon, N. Grangeon, S. Norre, and O. Gourguechon. Une problème de planification stratégique de type production-distribution avec économies d'échelles et technologies de production. *8e Conférence Internationale de MOdélisation et SIMulation, MOSIM10, 10 au 12 mai 2010, Hammamet (Tunisie)*, 2010.

[Sha05] JK Sharma. Extensions and special cases of transportation problem : A survey. *Indian Journal of Pure and Applied Mathematics*, 9(9) :928–940, 2005.

[SK07] H. Stadtler and C. Kilger. *Supply chain management and advanced planning : concepts, models, software, and case studies*. Springer Verlag, 2007.

[SK08] H. Stadtler and C. Kilger. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[SLKSL02] D. Simchi-Levi, P. Kaminsky, and E. Simchi-Levi. *Designing and Managing the Supply Chain*. McGraw-Hill/Irwin, 2002.

[Sol74] R.M. Soland. Optimal facility location with concave costs. *Operations Research*, 22(2) :373–382, 1974.

[Sol09] SolveIT. Supply chain network optimization. Technical report, http ://www.solveitsoftware.com, 2009.

[SP97] E.M.B. Smith and C.C. Pantelides. Global optimisation of nonconvex MINLPs. *Computers and Chemical Engineering*, 21 :791–796, 1997.

[SSP08] R. Sousa, N. Shah, and L.G. Papageorgiou. Supply chain design and multilevel planning - An industrial case. *Computers and Chemical Engineering*, 32(11) :2643–2663, 2008.

[TBP08] P.N. Thanh, N. Bostel, and O. Péton. A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*, 113(2) :678–693, 2008.

[Ter07] K. Terefe. Nonlinear transportation problems. *Master Thesis, Addis Ababa University School of Graduate Studies*, 2007.

[TTB09] C. Thierry, A. Thomas, and G. Bel. *Simulation for Supply Chain Management*. WILEY, 2009.

[VBWJ05] T.E. Vollmann, W.L. Berry, D.C. Whybark, and F.R. Jacobs. *Manufacturing planning and control systems for supply chain management*. McGraw-Hill Companies, 2005.

[VF90] V. Visweswaran and C. Floudas. A Global Optimization Algorithm(GOP) for certain classes of nonconvex NLPs–II. Application of theory and test problems. *Computers & Chemical Engineering*, 14(12) :1419–1434, 1990.

[VG01] Carlos J. Vidal and Marc Goetschalckx. A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. *European Journal of Operational Research*, 129(1) :134 – 158, 2001.

[VMB06] D. Vila, A. Martel, and R. Beauregard. Designing logistics networks in divergent process industries : A methodology and its application to the lumber industry. *International journal of production economics*, 102(2) :358–378, 2006.

[VV09] AIF Vaz and LN Vicente. PSwarm : a hybrid solver for linearly constrained global derivative-free optimization. *Optimization Methods and Software*, 24(4) :669–685, 2009.

[WLR+05] W. Wilhelm, D. Liang, B. Rao, D. Warrier, X. Zhu, and S. Bulusu. Design of international assembly systems and their supply chains under NAFTA. *Transportation Research Part E*, 41(6) :467–493, 2005.

[WN03] R.A. Waltz and J. Nocedal. KNITRO user's manual. Technical report, 2003.

[YH09] M.J. Yao and H.W. Hsu. A new spanning tree-based genetic algorithm for the design of multi-stage supply chain networks with nonlinear transportation costs. *Optimization and Engineering*, 10(2) :219–237, 2009.

[YL99] S. Yan and S.C. Luo. Probabilistic local search algorithms for concave cost transportation network problems. *European Journal of Operational Research*, 117(3) :511–521, 1999.

[YYEC03] H. Yan, Z. Yu, and TC Edwin Cheng. A strategic model for supply chain design with logical constraints : formulation and solution. *Computers and Operations Research*, 30(14) :2135–2155, 2003.

[ZKL85] J. Zhang, N.H. Kim, and L. Lasdon. An improved successive linear programming algorithm. *Management Science*, 31(10) :1312–1331, 1985.

[ZW08] H. Zhang and S. Wang. Linearly constrained global optimization via piecewise-linear approximation. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 214(1) :111–120, 2008.