

Une heuristique hybride pour la reconfiguration des réseaux logistiques dans le cadre d'entreprises multi-sites

Florence Pirard, David Duvivier et Olivier Roux

¹ Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Centre de Recherches et d'Etudes en Gestion Industrielle, 151 chaussée de Binche, B-7000 Mons, Belgique. {pirard, duvivier, roux}@fucam.ac.be

RÉSUMÉ : Nous nous intéressons à la résolution du problème stratégique de reconfiguration des réseaux logistiques dans le cadre d'entreprises multi-sites. Nous avons modélisé ce problème sous la forme d'un programme linéaire mixte multi-période, multi-produit et multi-échelon qui vise à maximiser le profit après taxation de l'entreprise multi-site sous contraintes de satisfaire la demande et de respecter les capacités au niveau de l'approvisionnement, de la production et de la distribution. Pour certains problèmes issus du monde industriel, ce modèle s'avère très difficile à résoudre à l'aide d'une méthode exacte. Dans cet article, nous présentons une heuristique hybride qui décompose le problème de reconfiguration en sous-problèmes et résout ces derniers à l'aide de différentes techniques : recherche dans le voisinage et algorithme du simplexe. Nos résultats numériques montrent que cette approche trouve une configuration du réseau logistique de bonne qualité en un temps raisonnable.

MOTS-CLÉS : Conception et pilotage des chaînes logistiques, entreprise multi-site, programme linéaire mixte, approche heuristique.

1. Introduction

Au cours de ces cinquante dernières années, les pratiques des entreprises en matière de logistique ont considérablement évolué. Le début des années 90 s'est traduit par le passage d'une gestion des flux de l'entreprise à une gestion de l'entreprise par les flux. Aujourd'hui, ce mode de gestion dépasse les frontières de l'entreprise en intégrant les besoins des clients et les exigences des fournisseurs : on parle de gestion de la chaîne logistique.

La gestion globale de la chaîne logistique implique de prendre un nombre important de décisions allant de l'ouverture d'un site à l'ordonnancement d'une tâche sur une machine particulière. Afin de préparer au mieux ces décisions et de les coordonner, différents plannings sont élaborés. Généralement, trois plannings de niveaux différents sont considérés : le planning stratégique, le planning tactique et le planning opérationnel (Ballou, 2003). Ces différents plannings se différencient par le niveau de détail des données utilisées pour leur réalisation, par leur horizon de temps et par l'importance des décisions prises. Ils concernent respectivement la prise de décisions à long, à moyen et à court terme. Ces trois plannings ont des objectifs différents. Ainsi, les décisions associées au niveau stratégique concernent la structure du réseau logistique. Au niveau tactique, la planification cherche à établir, en fonction de la demande prévisionnelle ou réelle et pour satisfaire le client, des plans définissant, de manière globale, les volumes de production, d'approvisionnement et de distribution ainsi que l'utilisation de la capacité des ressources disponibles. Enfin, le niveau opérationnel traite des problèmes d'affectation et de contrôle des flux physiques sur le court terme. Etant donné la multitude des problèmes de décision liés à la planification de la chaîne logistique, cette thématique est un champ de recherches très vaste. Pour notre part, nous nous intéressons au problème d'aide à la décision à long terme et plus particulièrement à la reconfiguration des réseaux logistiques d'entreprises multi-sites.

La résolution du problème de reconfiguration des réseaux logistiques permet de déterminer la structure du réseau qu'il conviendrait qu'une entreprise mette en place afin de développer un avantage concurrentiel. Généralement, trois types de décisions sont associés au problème de reconfiguration : des décisions concernant la localisation des installations de production et de distribution, des décisions concernant les flux de matière et d'information entre ces entités et des décisions concernant les investissements en main d'œuvre et en équipement dans chacun de ces sites. Dans la littérature, ces trois catégories de décisions font référence respectivement aux problèmes de localisation, d'allocation et de capacité (Stadtler, 2002). Les décisions mentionnées ci-dessus sont prises dans le but de satisfaire des objectifs de maximisation de profit et de satisfaction des clients finaux.

Cet article présente une approche hybride de résolution utilisant une heuristique pour le problème de reconfiguration des réseaux logistiques dans le cadre d'entreprises multi-sites. Dans la seconde partie, nous proposons une brève revue de la littérature. Puis, dans la troisième partie, nous décrivons le modèle mathématique que nous avons développé pour le problème étudié. La quatrième partie contient une description de l'approche heuristique. Dans la cinquième partie, nous présentons les résultats numériques obtenus. Enfin, nous terminons cet article en décrivant nos perspectives de travail.

2. Revue de la littérature

La reconfiguration des réseaux logistiques est un problème qui intéresse bon nombre d'industriels et de chercheurs. Plusieurs modèles ont déjà été proposés dans la littérature pour ce problème. Ces modèles sont soit des modèles analytiques, soit des modèles de simulation, soit des modèles hybrides utilisant à la fois les techniques d'optimisation et de simulation. Des revues de la littérature sont disponibles dans les articles de Thomas et Griffin (Thomas *et al.*, 1996), Vidal et Goetschalckx (Vidal *et al.*, 1997), Beamon (Beamon, 1998), Selçuk Erengüç *et al.* (Selçuk Erengüç *et al.*, 1998) et Min et Zhou (Min *et al.*, 2002).

La plupart des modèles développés pour la reconfiguration des réseaux logistiques sont des modèles analytiques et plus précisément des modèles de programmation linéaire mixte. Dans le cadre de cette revue de la littérature, nous nous focalisons sur ce type de modèles. Généralement, ils visent à minimiser le coût total de la chaîne logistique ou à maximiser son profit. Jayaraman et Pirkul (Jayaraman *et al.*, 2001), Yan *et al.* (Yan *et al.*, 2003), Jolayemi et Olorunniwo (Jolayemi *et al.*, 2004) s'intéressent à déterminer l'état (ouvert ou fermé) des sites de production et de distribution ainsi que les flux de matière à l'intérieur et entre les différentes entités composant le réseau logistique. Ces modèles se distinguent par les éléments pris en compte dans la modélisation du problème. Ainsi, le modèle développé par Jayaraman et Pirkul permet de résoudre les problèmes de localisation et d'allocation pour un réseau logistique de structure particulière, celui-ci ne comprenant qu'un seul niveau pour la production et pour la distribution des produits finis. Yan *et al.* incluent un certain nombre d'éléments liés à la sélection des fournisseurs. Jolayemi et Olorunniwo, proposent, quant à eux, un modèle multi-période et considèrent des stocks au niveau des centres de distribution. Pour leur part, Paquet *et al.* (Paquet *et al.*, 2003) s'intéressent, non seulement, à la résolution des problèmes de localisation et d'allocation mais ils tiennent compte, en plus, des investissements et des désinvestissements en ressources humaines et matérielles intervenant dans le processus de fabrication et des aptitudes de celles-ci à réaliser certaines tâches. Le modèle proposé par Paquet *et al.* est un modèle mono-période. Certains auteurs, comme Arntzen *et al.* (Arntzen *et al.*, 1995) et Vidal et Goetschalckx (Vidal *et al.*, 2001), énoncent des modèles qui prennent en considération le caractère international du réseau logistique en

incluant, notamment, un certain nombre d'éléments liés à la taxation, au prix de transfert ou au taux de change.

Lorsque nous examinons ces modélisations du problème de reconfiguration des réseaux logistiques, nous constatons que même si le problème est abondamment traité, il l'est rarement dans sa globalité. De nombreux auteurs limitent leur étude à un ou plusieurs sous-problèmes ou s'intéressent au problème complet pour un réseau logistique de structure particulière. Généralement, les modèles proposés visent à déterminer la localisation des installations de production et de distribution et les flux de matière entre ces entités. La détermination des investissements ou désinvestissements en ressources est rarement traitée. De plus, notons que la majorité des modèles proposés sont mono-périodes ce qui ne permet pas de mesurer l'impact des décisions prises à long terme.

Les modèles mathématiques proposés dans la littérature sont résolus à l'aide de différentes méthodes comme la procédure de séparation et d'évaluation, la décomposition de Benders ou des approches heuristiques. En ce qui concerne ce dernier type d'approches, celles-ci décomposent, en général, le problème en niveau (*i.e.* distribution, production, approvisionnement), ce qui ne permet pas de garder une vision globale de la chaîne logistique. Signalons aussi que la plupart des approches de résolution sont uniquement validées sur des problèmes fictifs de petite taille. Ceci ne garantit pas que ces méthodes soient performantes (*i.e.* elles trouvent la solution optimale ou une solution faisable de bonne qualité en un temps acceptable par le décideur) pour des problèmes réels.

3. Modèle mathématique

Le modèle mathématique développé pour le problème de reconfiguration des réseaux logistiques dans le cadre d'entreprises multi-sites est un modèle de programmation linéaire mixte. Contrairement à la plupart des modèles proposés dans la littérature, il s'agit d'un modèle multi-période, multi-produit et multi-échelon. Il est générique et peut, donc, être utilisé pour résoudre le problème de reconfiguration pour des réseaux de structure variée. Ce programme mathématique détermine l'état des sites, leur ouverture, leur fermeture, les capacités disponibles, les investissements, les désinvestissements, les quantités à produire dans les sites ainsi que les flux de matière entre les différentes entités qui composent le réseau logistique. L'ensemble de ces décisions est pris afin de maximiser le profit après taxation de l'entreprise multi-site sous contraintes de satisfaire la demande et de respecter les capacités au niveau de l'approvisionnement, de la production et de la distribution. Les décisions d'ouverture et de fermeture de sites sont modélisées à l'aide de variables binaires. Des variables entières ont également été introduites pour modéliser les investissements et les désinvestissements en ressources. L'article (Pirard *et al.*, 2004) présente ce modèle en détail.

Nous considérons une entreprise multi-site possédant plusieurs centres de production et de distribution. Au début de la première période, certains de ces sites sont ouverts. Les sites fermés correspondent à des localisations potentielles des activités. En plus de l'état initial, chaque site est caractérisé par une capacité initiale (*i.e.* un nombre d'unités de produits pouvant circuler dans le site), par une liste de composants utilisés, par une liste de composants fabriqués et par une liste de produits finis fabriqués. Au cours du temps, la capacité disponible peut être modifiée dans un certain intervalle. Nous supposons que la capacité s'investit ou se désinvestit par tranche. Nous ne faisons aucune hypothèse sur la structure du réseau logistique étudié et nous autorisons des flux de matière entre les sites d'un même niveau. Les clients (ou plus précisément les zones de demandes) sont prédéterminés. Ceux-ci expriment des besoins en produits finis. La demande est supposée déterministe. Les fournisseurs sont également

prédéterminés. Ils livrent certains composants aux centres de fabrication selon leur besoin. Les fournisseurs sont caractérisés par une liste de composants disponibles. Notons que certains fournisseurs peuvent agir comme des sous-traitants. Nous supposons que la quantité de chaque composant disponible chez les fournisseurs est limitée.

4. Approche de résolution heuristique

Pour résoudre le programme linéaire mixte brièvement décrit dans la section 3, nous avons tout d'abord eu recours à la procédure de séparation et d'évaluation implémentée dans le solveur commercial Lingo (LINDO, 2002). Cette méthode est très efficace pour résoudre certains problèmes de reconfiguration des réseaux logistiques. Toutefois, pour d'autres problèmes, s'inspirant d'un cas industriel, cette méthode a manifesté quelques faiblesses en nous fournissant la configuration optimale du réseau qu'après plusieurs dizaines voire centaines d'heures de calcul. L'observation de ces temps importants nous a poussé à développer une approche de résolution heuristique (Dréo *et al.*, 2002). Cette approche ne garantit pas de trouver la solution optimale mais fournit, en un temps raisonnable, une solution faisable de bonne qualité.

L'approche heuristique développée est une méthode itérative qui décompose le problème de reconfiguration des réseaux logistiques en plusieurs sous-problèmes et résout ces derniers à l'aide de différentes techniques : recherche dans le voisinage et algorithme du simplexe. La figure 1 décrit le fonctionnement de notre algorithme. A chaque itération, celui-ci fixe l'état des sites de production et de distribution, évalue la capacité nécessaire, répartit cette dernière entre les différents sites ouverts et détermine les flux de matière entre les différentes entités du réseau logistique et ce de manière à satisfaire la demande et respecter les capacités disponibles. Cette démarche est non-déterministe. L'approche présente l'avantage de fournir à chaque itération une configuration du réseau logistique réalisable. Soulignons que dans notre algorithme, nous avons décomposé le problème de manière à conserver une vision globale de la chaîne logistique depuis les fournisseurs jusqu'aux clients. Nous détaillons, dans la suite de cette section, les étapes principales de l'algorithme.

4.1 Note

Dans la description des étapes principales de l'algorithme, nous ferons régulièrement référence à deux matrices : la matrice $Etat = (Etat_{jt})$ et la matrice $Capacite = (Capacite_{jt})$. La première contient l'état des sites pour chaque période de temps. L'élément $Etat_{jt}$ indique l'état du site j à la période t , il vaut 1 ou 0 selon que le site soit ouvert ou fermé. La seconde matrice contient, quant à elle, les capacités disponibles dans les différents sites de l'entreprise pour chaque période de temps. L'élément $Capacite_{jt}$ indique la capacité disponible dans le site j à la période t , cette valeur limite les quantités de produits fabriquées ou transitant par le site j au cours la période t .

Nous supposons que l'ensemble des sites peut être décomposé en différents sous-ensembles selon les activités pratiquées. Par exemple, pour certains problèmes, l'ensemble des sites peut être divisé en deux sous-ensembles : l'un contenant les sites de production et l'autre correspondant aux sites de distribution. Dans l'algorithme proposé, nous ne faisons pas de restriction sur le nombre de niveaux constituant la chaîne logistique.

4.2 Test initial (I)

Ce test vise à s'assurer que le problème de reconfiguration traité n'est pas infaisable. Il consiste à vérifier que, pour chaque période de temps et pour chaque niveau de la chaîne logistique, la somme des capacités maximales disponibles est supérieure à la demande.

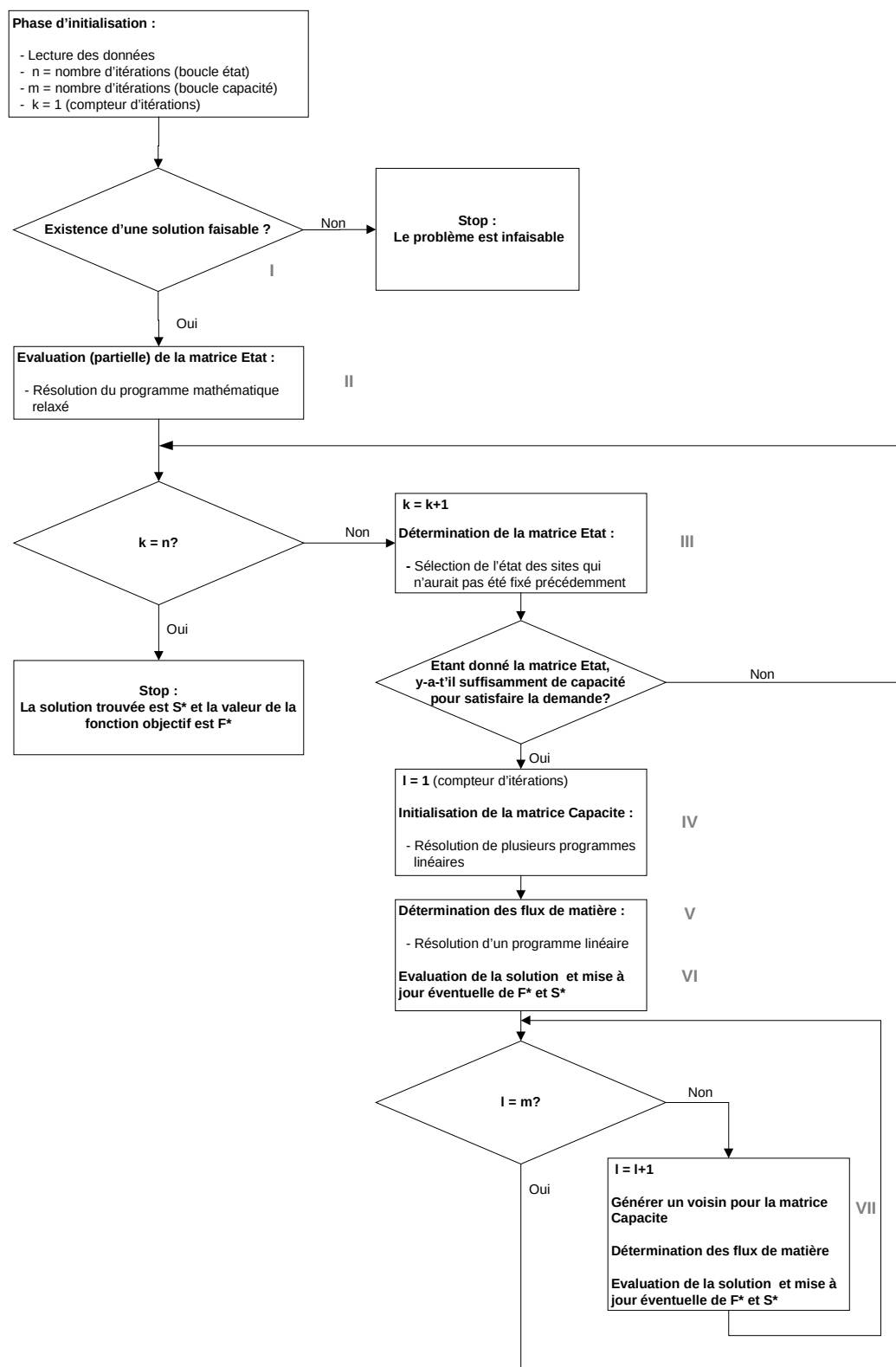


Figure 1. Description du fonctionnement de l'approche heuristique

4.3 Evaluation partielle de la matrice Etat (II)

Cette étape consiste à résoudre le programme linéaire relaxé associé au programme linéaire mixte discuté au point 3 et à fixer les valeurs de la matrice *Etat* en fonction de la solution obtenue. Si nous notons par $site_relax_{jt}$ l'état du site j à la période t obtenu en résolvant le programme relaxé, alors la valeur des éléments de la matrice *Etat* est la suivante :

$$Etat_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{si } site_relax_{jt} > 0.5 + \delta \\ 0 & \text{si } site_relax_{jt} < 0.5 - \delta \\ \text{Indéterminé} & \text{sinon} \end{cases}$$

où δ est un paramètre fixé par l'utilisateur ($0 \leq \delta < 0.5$)

4.4 Détermination de la matrice Etat (III)

Cette étape cherche à affecter une valeur aux éléments de la matrice *Etat* qui n'auraient pas été fixés à l'étape précédente. Pour éviter des situations inintéressantes du point de vue économique, où les ouvertures et les fermetures de sites seraient alternées au cours des différentes périodes de temps considérées, nous avons introduit, dans notre modèle mathématique, un paramètre spécifiant le nombre d'ouvertures et de fermetures autorisées sur l'horizon de planification. Dans notre application, nous avons permis au maximum un seul changement d'état. Afin de tenir compte de ce paramètre, nous avons généré l'ensemble des combinaisons possibles d'états pour les différentes périodes de temps. Par exemple, pour un problème considérant 5 périodes de temps, une de ces combinaisons est (1, 1, 1, 0, 0), elle signifie que le site est ouvert durant les trois premières périodes et qu'il est fermé au cours des deux dernières. A chaque combinaison, nous avons associé un numéro. Dès lors, pour chaque site ayant au moins un état non-fixé sur l'horizon de temps, la détermination des états s'effectue en tirant aléatoirement le numéro d'une combinaison possible et en remplaçant la ligne de la matrice *Etat* correspondant au site par la combinaison sélectionnée.

4.5 Initialisation de la matrice Capacité (IV)

Cette étape vise à initialiser la matrice *Capacité*. Elle consiste, d'une part, à évaluer la capacité nécessaire, à chaque niveau de la chaîne logistique, pour satisfaire la demande des clients finaux et, d'autre part, à affecter cette capacité aux sites ouverts. Connaissant la demande, l'évaluation de la capacité nécessaire est assez simple. Celle-ci consiste à évaluer la demande totale pour chaque période et à arrondir cette valeur de manière à obtenir un multiple de cap^1 . Pour chaque période et pour chaque niveau, la répartition entre les sites de la capacité nécessaire s'obtient en résolvant un problème de détermination de flot borné de coût minimum. A cette étape de l'algorithme, nous disposons d'un certain nombre d'informations. En effet, nous connaissons la capacité initialement disponible dans chaque site, la capacité minimale et la capacité maximale qui peuvent être disponibles dans chacun des sites, la capacité ajoutée ou supprimée par tranche d'investissement ou de désinvestissement ainsi que la capacité nécessaire pour satisfaire la demande. Nous disposons également d'informations sur les coûts de possession, d'investissement et de désinvestissement en capacité. Sur base de l'ensemble de ces informations, la répartition de la capacité peut être évaluée.

Un exemple de modélisation du problème est illustré à la figure 2. Le graphe représenté comporte 4 nœuds et 6 arcs. Les 4 arcs reliant le nœud 1 au nœud 2 correspondent aux 4 sites de l'entreprise appartenant au niveau considéré et les 2 autres arcs sont des arcs fictifs qui permettent de préciser la quantité de flot qui doit circuler sur le réseau (*i.e.* le besoin en capacité). A chaque arc sont associées 6 valeurs représentant respectivement la borne inférieure sur la capacité disponible, la borne supérieure sur la capacité disponible, la capacité initialement disponible, le coût unitaire de possession de capacité, le coût unitaire d'investissement et le coût unitaire de désinvestissement. Déterminer un flot borné sur ce graphe revient à affecter la capacité nécessaire aux différents sites.

¹ La capacité disponible dans un site doit être un multiple de cap puisque nous avons supposé que la capacité s'investissait ou se désinvestissait par tranche de cap unités.

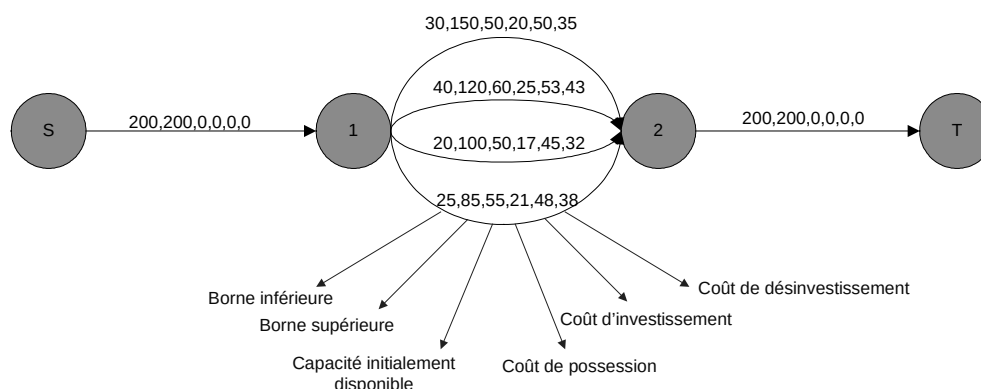


Figure 2. Exemple de modélisation du problème de détermination des capacités sous la forme d'un problème de détermination de flot borné de coût minimum

Pour résoudre ce problème, Ford et Fulkerson ont développé un algorithme (Levy, 1995). Celui-ci comprend une phase de marquage et une phase d'augmentation de flot. La phase de marquage consiste, pour la détermination d'un flot borné de coût minimum, à utiliser la stratégie du chemin amplificateur de flot dont la longueur est évaluée à partir des coûts unitaires sur les arcs. Dans notre application, nous disposons des coûts de possession (*i.e.* coûts unitaires) mais nous souhaitons également tenir compte, dans la détermination des capacités, des coûts d'investissement et de désinvestissement. C'est pourquoi, au lieu d'utiliser cet algorithme, nous avons préféré développer un programme linéaire qui tient compte de l'ensemble des coûts. Ce programme vise à minimiser la somme des coûts liés à la possession, à l'investissement et au désinvestissement en capacité. Les contraintes de ce modèle imposent que la capacité disponible dans un site soit comprise entre les bornes définies pour ce site et que la conservation des flots en tous sommets différents de la source et du puits soit respectée. Le programme est appelé pour tous les niveaux de la chaîne logistique et pour toutes les périodes de temps considérées. Les différentes résolutions permettent d'affecter une valeur aux éléments de la matrice *Capacite*.

4.6 Détermination des flux de matière (V)

La détermination des flux de matière s'effectue en résolvant le programme linéaire découlant du programme linéaire mixte évoqué au point 3. Les matrices *Etat* et *Capacite* préalablement évaluées sont des données d'entrée du programme linéaire.

4.7 Evaluation de la solution et mise à jour éventuelle (VI)

Quand les éléments des matrices *Etat* et *Capacite* sont déterminés, il est aisé d'évaluer, pour les différentes périodes de temps considérées, les ouvertures et les fermetures de sites, les investissements et les désinvestissements en capacité ainsi que les coûts associés. La résolution du programme linéaire associé à la détermination des flux fournit une première estimation du profit de l'entreprise multi-site après taxation. Dès lors, la valeur de la fonction objectif du problème global s'obtient en soustrayant du profit les coûts liés aux sites et aux capacités. Si la valeur obtenue est supérieure à celle de la meilleure solution rencontrée jusqu'à présent, celle-ci est conservée.

4.8 Modification de la matrice *Capacite* (VII)

Une fois que la matrice *Capacite* est initialisée, nous proposons d'explorer le voisinage de cette solution en utilisant une méthode de recherche locale (Dréo *et al.*). Cette exploration se fait en sélectionnant aléatoirement un niveau, deux sites du niveau choisi et une période de temps et en transférant une tranche de capacité d'un site vers l'autre. Cette opération est

réalisée à partir de la période de temps sélectionnée et pour toutes les périodes d'ouverture communes. L'exploration du voisinage se fait toujours à partir de la dernière matrice *Capacite* qui a contribué à augmenter la valeur de la fonction objectif.

5. Résultats numériques

L'approche heuristique est codée en Delphi et fait appel au solveur Lingo (LINDO, 2002) pour la résolution des différents programmes linéaires. Afin d'évaluer son efficacité, cette approche a été appliquée à un problème de reconfiguration des réseaux logistiques s'inspirant d'un cas industriel. L'entreprise multi-site considérée comprend 16 sites répartis à travers l'Europe. Parmi ces sites, 6 assurent la production des produits et 10 réalisent la distribution de ceux-ci auprès des différents clients finaux ou zones de demande. Dans notre application, 20 zones de demande ont été retenues. L'entreprise multi-site propose 20 produits finis (ou familles de produits) aux clients finaux. Ces produits sont fabriqués à partir de 45 composants. Ces derniers sont livrés par 10 fournisseurs aux centres de production de l'entreprise multi-site. Nous cherchons à élaborer le planning stratégique sur 5 périodes.

Le modèle de programmation linéaire mixte relatif au réseau logistique décrit ci-dessus comprend 151681 variables dont 480 entières et 11146 contraintes. Pour ce problème, nous avons généré plusieurs ensembles de données qui se différencient par la distribution de la demande des clients finaux au cours des 5 périodes de temps considérées. Chacun de ces ensembles a la même demande totale. Dans un premier temps, nous avons appliqué la procédure de séparation et d'évaluation à chacun de ces jeux de données. Pour certains, nous avons obtenu la configuration optimale du réseau logistique en un temps raisonnable. Pour d'autres, nous avons dû attendre plusieurs dizaines voire centaines d'heures de calculs pour obtenir la configuration optimale ou pour interrompre le solveur. Afin d'évaluer l'efficacité de notre algorithme, nous avons sélectionné 8 jeux pour lesquels la procédure de séparation et d'évaluation a trouvé la configuration optimale en un temps de calcul supérieur à 13 heures. Nous avons fixé, de manière arbitraire, le nombre d'itérations à réaliser dans les deux boucles de la procédure. Pour un premier ensemble de tests, nous avons choisi $n = 10$ et $m = 50$ et pour une seconde série, nous avons pris $n = 20$ et $m = 100$ ce qui correspond approximativement à 3 et 12 heures de calculs respectivement.

Les tableaux 1 et 2 contiennent les résultats obtenus en utilisant un Pentium IV, 3.2GHz, 512Mo. Pour chacun des jeux de données, nous avons indiqué le temps nécessaire à la procédure de séparation et d'évaluation pour trouver la solution optimale. Nous avons également mentionné la moyenne et l'écart-type² de l'écart³ par rapport à la solution optimale ainsi que le temps moyen nécessaire à l'approche heuristique pour réaliser le nombre d'itérations spécifié.

A la vue des tableaux 1 et 2, nous constatons que l'approche heuristique trouve une solution assez proche de la solution optimale obtenue par la procédure de séparation et d'évaluation. Nous remarquons également que le fait d'augmenter le nombre d'itérations dans l'approche heuristique a un faible impact sur la qualité de la solution trouvée. Nous devons encore réaliser d'autres tests afin d'évaluer le nombre d'itérations qu'il serait souhaitable que

² L'approche heuristique n'étant pas déterministe, nous l'avons lancé plusieurs fois pour chaque problème de reconfiguration de réseaux logistiques. Pour les deux ensembles de tests, nous avons réalisé 20 exécutions.

³ L'écart est évalué de la manière suivante :

$$\text{Ecart} = 100 \frac{\text{Profit}(\text{Solution_optimale}) - \text{Profit}(\text{Solution_trouvée})}{\text{Profit}(\text{Solution_optimale})}$$

	Procédure de séparation et d'évaluation	Approche heuristique		
	Durée	Moyenne (écart) (%)	Ecart-type (écart) (%)	Moyenne (Durée)
DH.1	13 h 57 min 33 sec	0.04	0.02	3 h 02 min 30 sec
DH.2	162 h 32 min 51 sec	0.19	0.03	2 h 59 min 01 sec
DH.3	243 h 18 min 47 sec	0.16	0.02	2 h 56 min 36 sec
DH.4	29 h 55 min 46 sec	0.17	0.02	2 h 57 min 58 sec
DH.5	50 h 34 min 10 sec	0.15	0.03	2 h 55 min 54 sec
DH.6	27 h 14 min 59 sec	0.17	0.03	2 h 58 min 26 sec
DH.7	41 h 21 min 27 sec	0.16	0.03	2 h 58 min 31 sec
DH.8	12 h 58 min 26 sec	0.16	0.03	2 h 56 min 05 sec

Tableau 1. Résultats numériques obtenus par l'approche heuristique (n = 10 et m = 50)

	Procédure de séparation et d'évaluation	Approche heuristique		
	Durée	Moyenne (écart) (%)	Ecart-type (écart) (%)	Moyenne (Durée)
DH.1	13 h 57 min 33 sec	0.01	0.01	12 h 25 min 09 sec
DH.2	162 h 32 min 51 sec	0.12	0.02	11 h 44 min 03 sec
DH.3	243 h 18 min 47 sec	0.11	0.02	11 h 37 min 47 sec
DH.4	29 h 55 min 46 sec	0.10	0.02	11 h 54 min 27 sec
DH.5	50 h 34 min 10 sec	0.11	0.03	11 h 47 min 24 sec
DH.6	27 h 14 min 59 sec	0.11	0.03	11 h 59 min 19 sec
DH.7	41 h 21 min 27 sec	0.10	0.02	11 h 50 min 14 sec
DH.8	12 h 58 min 26 sec	0.11	0.02	11 h 56 min 27 sec

Tableau 2. Résultats numériques obtenus par l'approche heuristique (n = 20 et m = 100)

l'heuristique réalise. Ce nombre doit traduire un bon compromis entre temps d'évaluation et amélioration du profit de l'entreprise multi-site. Des tests supplémentaires sont également nécessaires afin d'évaluer de manière plus approfondie l'efficacité des opérateurs fixant l'état des sites et déterminant la capacité disponible. Des améliorations devront très certainement être apportées à ces derniers pour éviter la situation où aucune amélioration de la fonction objectif n'est observée au cours d'un certain nombre d'itérations.

6. Conclusions

Nous avons modélisé le problème de reconfiguration des réseaux logistiques sous la forme d'un programme linéaire mixte multi-produit, multi-échelon et multi-période. Pour le résoudre, nous disposons de deux approches : une approche exacte (procédure de séparation et d'évaluation) et une approche heuristique hybride combinant plusieurs méthodes de recherche. Le développement de cette dernière trouve sa justification dans le fait que pour certains problèmes, la procédure de séparation et d'évaluation ne parvient pas à trouver la solution optimale en un temps raisonnable. Les résultats obtenus par cette approche montrent qu'elle s'avère être une bonne alternative lorsque la méthode exacte éprouve des difficultés. Un avantage de l'approche heuristique proposée est qu'elle fournit, à chaque itération, une nouvelle solution améliorante. Le nombre d'itérations à réaliser est laissé au libre choix du gestionnaire selon le temps dont il dispose.

Afin d'obtenir une solution de bonne qualité en un temps raisonnable, la procédure de séparation et d'évaluation ainsi que l'approche heuristique pourraient être lancées en parallèle. Dans ce cas, si la procédure de séparation et d'évaluation trouve la solution optimale en un temps acceptable par l'utilisateur, c'est cette configuration optimale du réseau logistique qui sera retournée. Dans le cas contraire, c'est la meilleure configuration rencontrée par l'heuristique dans le temps imparti qui le sera. Nous recherchons une solution de bonne qualité en un temps raisonnable car notre modèle mathématique fait partie d'une démarche itérative d'aide à la décision. Cette démarche fait également appel à un modèle de simulation qui teste la faisabilité de la configuration proposée par le modèle mathématique. La maille de temps du modèle de simulation est plus fine et de nouvelles contraintes sont prises en compte (e.g. transport, stock).

7. Références bibliographiques

Arntzen B.C, Brown G. G., Harrison T. P., Trafton L. L., (1995) « Global supply chain management at Digital Equipment Corporation », *Interfaces*, 25(1) : 69-93.

Ballou R. H., (2003) *Business Logistics Management*, Prentice-Hall, fifth edition, 2003.

Beamon B. M., (1998) « Supply chain design and analysis: Models and methods », *International Journal of Production Economics*, 55 : 281-294.

Dréo J., Pétrowski A., Siarry P., Taillard E., (2002) *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Eyrolles, Paris.

Jayaraman V., H. Pirkul H., (2001) « Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities », *European Journal of Operational research*, 133 : 394-408.

Jolayemi J. K., Olorunniwo F. O., (2004) « A deterministic model for planning production quantities in a multi-plant, multi-warehouse environment with extensible capacities », *International Journal of Production Economics*, 87 : 99-113.

Levy G., (1995) *Algorithmique combinatoire*, Dunod, Paris.

LINDO Systems Inc. (2002) *Lingo user's guide*.

Min H., Zhou G., (2002) « Supply chain modelling: past, present and future », *Computer & Industrial Engineering*, 43:231-249.

Paquet M., Martel A., Montreuil B., (2003) « A manufacturing network design model based on processor and worker capabilities », *Electronic proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Production Management*.

Pirard F., Riane F., Artiba A., Iassinovski S., (2004) « Modélisation et résolution du problème de conception de réseaux logistiques dans le cadre d'entreprises multi-sites », *Actes de la 5^{ème} conférence francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM)*, vol. 1, p. 729-736.

Selçuk Erengüç S., Simpson N.C., Vakharia A.J., (1999) « Integrated production/distribution planning in supply chains : an invited review », *European Journal of Operational research*, 115 : 219-236.

Stadtler H., (2002) « *Supply chain management and advanced planning : Concepts, models, software and case studies* », Springer-Verlag, Berlin, second edition.

Thomas D. J., Griffin P. M., (1996) « Coordinated supply chain management », *European Journal of Operational research*, 94 : 1-15.

Vidal J., M. Goetschalckx M., (1997) « Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models », *European Journal of Operational research*, 98 : 1-18.

Vidal J., M. Goetschalckx M., (2001) « A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation », *European Journal of Operational research*, 129 : 134-158.

Yan H., Yu Z., Cheng E., (2003) « A strategic model for supply chain design with logical constraints : formulation and solution », *Computers & Operations research*, 30 : 2135--2155.