

## L'INTÉGRATION : UNE PROGRESSION NATURELLE POUR LA RÉSOLUTION DE PROBLÈMES COMPLEXES

Géraldine Strack

Louvain School of Management, CORE  
Université Catholique de Louvain  
1, Place des doyens - B 1348 Louvain-la-Neuve  
geraldine.strack@uclouvain.be

Fouad Riane

Louvain School of Management  
Facultés Universitaires Catholiques de Mons  
151, Chaussée de Binche- B 7000 MONS  
fouad.riane@fucam.ac.be

**RÉSUMÉ** : *L'objectif de cet article est de réaliser une analyse des approches de planification intégrée de décisions utilisées dans les domaines d'application de l'ordonnancement de la production, de la gestion du trafic aérien et du transport et de la distribution. Pour ce faire, un exposé de l'approche traditionnelle de planification hiérarchique est réalisé en précisant le but et les limites de cette méthode d'aide à la décision. Ensuite, nous introduirons le concept de planification intégrée en détaillant les différentes caractéristiques de cet outil d'aide à la décision. Un aperçu littéraire des différents types d'approches de planification intégrées de décisions utilisées dans les domaines d'application cités ci-dessus complètera l'analyse. Une critique ainsi que des perspectives conclura l'article .*

**MOTS-CLÉS** : *Intégration, outil d'aide à la décision, hiérarchique, séquentiel, analyse de littérature.*

### 1. INTRODUCTION

La concurrence de plus en plus accrue, le besoin rapide d'information précise et les avancés technologiques poussent les entreprises à une réorganisation interne de leur processus et nécessitent l'élaboration d'outils d'aide à la décision de plus en plus performants pour un pilotage précis de la performance. Les décideurs ont de plus en plus besoin de gérer leurs activités de manière globale afin d'optimiser les systèmes d'approvisionnement, de production et de distribution.

Ces outils d'aide à la décision se basent notamment sur des approches de modélisation, d'optimisation et de simulation de systèmes complexes où l'intégration est devenue une composante nécessaire pour répondre aux besoins des acteurs économiques. En effet, une approche intégrée permet de prendre en compte la globalité du système considéré, les liens entre les différents niveaux de décision et de refléter de façon plus précise et complète le système et les besoins des décideurs.

Lors de l'élaboration de ces outils intégrés d'aide à la décision, les chercheurs se focalisent, en général, sur les décisions à intégrer et précisent peu la méthode qui a été adoptée afin de réaliser une intégration de ces décisions.

En effet, les outils d'aide à la décision basés sur une approche d'intégration se heurtent à des difficultés d'ordre conceptuel et technique. Tout d'abord, du point de vue technique, une communication entre les outils (optimisation ou simulation) présents sur le marché est nécessaire. Du point de vue conceptuel, une modélisation du problème globale (intégré) doit être réalisée ou un couplage entre les modèles actuellement disponibles doit être effectué.

En conséquence, notre contribution est multiple. Tout d'abord, nous proposons une définition de la planification intégrée en précisant les différents types de planification intégrée ainsi que leurs caractéristiques. Deuxièmement, nous proposons une démarche intégrée d'analyse et de structuration des problèmes. A la lumière de cette démarche, nous proposons une classification d'articles dans les domaines d'application de l'ordonnancement de la production, de la gestion aérienne et du transport et de la distribution.

Au travers de cet article, nous allons réaliser une analyse de trois domaines d'application où des outils d'aide à la décision basés sur une planification intégrée ont été définis. Nous avons choisi d'analyser les domaines de l'ordonnancement de la production, de la gestion aérienne et de la distribution. Ces domaines d'application ont été choisis pour diverses

raisons. Tout d'abord, la gestion aérienne est un des domaines précurseurs où une planification intégrée des décisions a été mis en place. Deuxièmement, nous voulions aborder les intégrations réalisées afin d'optimiser la gestion de la chaîne logistique. C'est pourquoi, nous avons analysé le domaine de la production et de la distribution.

La section 2 présente la planification hiérarchique habituellement utilisée dans les entreprises, son but et ses limites. La section 3 expose une proposition de définition de planification intégrée des décisions et ses caractéristiques. Les sections 4 à 6 traitent des domaines d'application citées précédemment où des outils d'aide à la décision intégrée ont été adoptées afin de répondre aux attentes des preneurs de décision. Nous finirons par classer les différents articles par rapport aux types de planification intégrée définis dans la section 3 et conclurons l'article en proposant des pistes de réflexion.

## 2. PLANIFICATION HIÉRARCHIQUE DES DÉCISIONS

La gestion de la chaîne logistique implique la prise de décisions sur des horizons de temps différents (stratégique-tactique-opérationnelle-réalisationnelle) et à des niveaux de détail divers (Dempster, Fisher, Jansen, Lageweg, Lenstra & Kan 1981). Par exemple, au niveau de la gestion des opérations de production journalière (niveau opérationnel), un ordonnancement détaillé de la production doit être élaboré. Des réponses aux questions du type : quand va-t-on produire ? par qui ? et sur quelle machine ? doivent être évaluées. Au niveau supérieur, des décisions agrégées de planification sont traitées. On y retrouve des décisions portant sur le niveau de production par famille de produits, le niveau de stock par famille de produits, l'engagement/licenciement de personnel, l'achat de matières premières ... À ce niveau supérieur (tactique), des décisions de type agrégées sont prises car des informations sont incertaines (par exemple, la disponibilité des ressources humaines) ou des informations ne sont délibérément pas prises en compte à cause de la complexité de la décision (comme l'absence de considération du coût de changement d'outillage lors de l'élaboration du planning agrégé).

Dans cette perspective de décisions multi-niveaux, une approche de planification hiérarchique est souvent adoptée (Hax & Meal 1975). Aux différents niveaux de décision, des modèles mathématiques sont développés et les décisions prises à un niveau supérieur vont orienter celles prises aux niveaux inférieurs. Par exemple, lors de l'élaboration du planning de production agrégé, les variables de décisions principales sont le niveau de production et de stock par famille de produits. La valeur locale

optimisée de ces variables de décision du planning agrégé vont servir de données d'entrée au planning détaillé d'ordonnancement.

Cette approche hiérarchique a été adoptée pour diverses raisons (Dempster et al. 1981). Tout d'abord, la complexité du problème encourage les chercheurs à le décomposer en sous-problème afin de faciliter la procédure de résolution (Vidal & Goetschalckx 2001). Deuxièmement, la gestion de la chaîne logistique implique la prise de décisions sur des horizons de temps différents où le niveau d'incertitude diminue au fur et à mesure où la prise de décision coïncide avec l'exécution de celle-ci. Par exemple, au niveau du planning agrégé, on peut déterminer les plans d'acquisition de matières premières cependant la décision de l'exécution de la production sur une machine va être postposée le plus tard possible afin de limiter les incertitudes (par exemple, l'incertitude concernant l'état (en fonction-en panne-en maintenance) d'une machine).

Les difficultés liées à cette approche hiérarchique sont diverses. Premièrement, lors de la résolution séquentielle des sous-problèmes, certaines données sont agrégées au niveau supérieur et ensuite désagrégées au niveau inférieur. Il se peut que les méthodes d'agrégation fournissent des solutions à un certain niveau de décision qui sont infaisables au niveau inférieur. Par exemple, le planning de production agrégé développé doit prendre en compte la capacité disponible dans l'entreprise sinon la détermination de l'ordonnancement de la production peut être infaisable. La question est de savoir comment représenter cette capacité au moment du planning de production agrégé ? En effet, celui-ci ne prend pas en compte les temps de changement d'outillage (pris en compte au niveau des décisions d'ordonnancement de la production) or cette activité consomme de la capacité. Une capacité agrégée (moins précise) va être prise en compte et donnera lieu à des niveaux de production par famille de produits qui risquent d'être infaisables.

Deuxièmement, la décomposition du problème en sous-problèmes implique que les sous-modèles résultant de ces sous-problèmes vont être résolus indépendamment. Cette résolution va conduire à une optimisation locale plutôt qu'à une optimisation globale du problème. La question est de savoir si cette optimisation locale est satisfaisante dans le contexte actuel de concurrence accrue, de rationalisation des besoins et de demande croissante.

## 3. PLANIFICATION INTÉGRÉE DES DÉCISIONS

Afin d'élaborer des outils d'aide à la décision répondant aux exigences du gestionnaire, une démarche structurant les problèmes, les méthodes et les outils

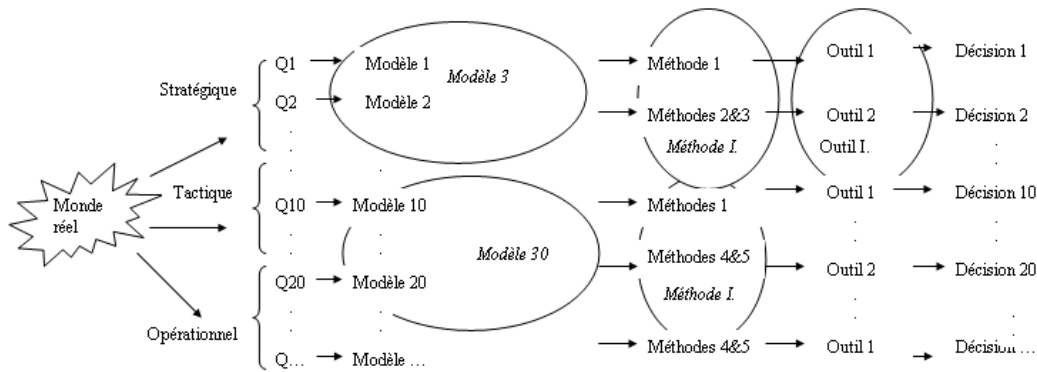


Figure 1 – planification intégrée des décisions

est nécessaire. Cette démarche peut être articulée selon la logique décrite dans la figure 1 et se résume donc comme suit : tout d’abord la situation réelle est abordée selon différents points de vue amenant les acteurs de décisions à se poser une série de questions traduisant leur compréhension de systèmes étudié et amenant à une première formulation des problèmes sous forme de questions : de quoi s’agit-il ? Où localiser les installations de production ? Quelles ressources engager ? Quel investissement consentir ? Etc. Une fois les questions délimitées, une seconde formulation formelle et structurée prend la forme de modèles mathématiques qui sont élaborés : Modèle Localisation, Modèle « Lot Sizing », Modèle « Line Balancing » etc. Des méthodes de résolution adéquates doivent être utilisées pour chaque modèle afin d’arriver à une solution appropriée et de bonne qualité : méthode de séparation et évaluation, Décomposition de Benders, Colonies de Fourmies, Algorithmes génétiques, Simulation etc. Enfin, ces méthodes doivent être codées ou exécutées à l’aide d’outils (Cplex, Arena..), sur des calculateurs, pour apporter des réponses aux questions soulevées au départ.

Comme exposé dans la section précédente, en général, cette démarche traditionnelle de résolution a recourt au principe de la décomposition. Afin de réduire leurs complexités inhérentes, les problèmes initiaux sont décomposés en sous-problèmes. De nos jours, cette approche ne peut plus convenir aux besoins d’une gestion globale de la chaîne logistique où l’intégration est de plus en plus souhaitée.

En conséquence, nous définissons trois types d’intégration afin de contrer cette insuffisance.

Premièrement, plusieurs auteurs prônent l’intégration dans la manière d’aborder les questions. Il en résulte un modèle global (intégré) reprenant plusieurs questions simultanément.

Une autre tendance d’intégration repose sur la méthodologie appliquée pour exploiter les modèles du planning hiérarchique. Cette intégration au niveau

méthodologique propose la résolution des modèles de décision disponibles en intégrant approches exactes et approches heuristiques, optimisation et simulation dans une démarche itérative plutôt que de manière séquentielle.

Le dernier type d’intégration repose sur une intégration de techniques. Cette intégration concerne donc l’interopérabilité des outils de résolution.

Cette approche nous a servi dans des domaines d’application variés. (Riane, Artiba & Iassinovski 2001) propose d’intégrer les décisions de planification et d’ordonnancement de la production. La démarche adoptée repose sur une intégration de méthodes où un modèle mathématique (planification de la production) et un modèle de simulation (ordonnancement de la production) sont résolus de manière itérative. (Pirard 2005) propose un outil intégré d’aide à la décision pour la reconfiguration et la planification des réseaux logistiques dans le cas d’entreprises multi-sites en s’inspirant de la même méthodologie que celle de (Riane et al. 2001). (Strack & Pochet 2007) développent un outil intégré d’aide à la décision basé sur une intégration de modèles. Un modèle global qui intègre les décisions de gestion des stock et de gestion des entrepôts est formulé et résolu à l’aide d’une heuristique de résolution.

#### 4. L’ORDONNANCEMENT DE LA PRODUCTION

Les problèmes de planification et d’ordonnancement de la production sont en général résolus par une méthode hiérarchique. Nous allons reprendre dans la suite de cette section, l’approche de planification hiérarchique développée par (Hax & Meal 1975) et nous allons ensuite exposé les approches d’intégration présentes dans la littérature.

Au niveau stratégique, des prévisions de demande (long terme) par famille de produits par région d’usine vont être établies. Cette information combinée au coût d’investissement en capital par produit

par usine et au coût de transport entre usines va permettre d'allouer de manière optimale les familles de produits aux usines. Cette décision sera réoptimisée sur le long terme par exemple annuellement (la durée exacte dépend du secteur d'activité).

Au niveau tactique, une fois que les familles de produits ont été allouées à chaque usine, la planification de la production pour chaque famille de produits est déterminée. En conséquence, des prévisions de demande (moyen terme) par famille de produits sont calculées. Cette information combinée avec la capacité disponible à chaque usine va déterminer le planning de production ainsi que le stock pour chaque famille de produits. Ce planning est réoptimisé sur le moyen terme par exemple mensuellement (dépend du secteur d'activité) afin de prendre en compte le niveau de stock réel ainsi que les modifications dans les prévisions.

Au niveau opérationnel, les décisions tactiques portant sur la planification de la production vont être détaillées. En effet, les problèmes d'ordonnement de la production déterminent l'ordre dans lequel les tâches doivent être réalisées sur chaque machine, par qui et quand de manière à optimiser la performance du système (minimiser les temps total de changement des outils, les encours et l'échéance de livraison) tout en respectant le planning de production (les dates de livraison, le niveau de production ...) ainsi que les limites de stockage (Daniels & Mazzola 1994). Ces décisions sont prises sur le court terme par exemple mensuellement (dépend du secteur d'activité) dès que les décisions au niveau de la planification de la production sont arrêtées.

Au moment de la planification de la production, les décisions prises sont de type agrégées et aucune information précise n'est connue (Dempster et al. 1981). En effet, les produits sont agrégés en famille de produits en fonction des caractéristiques de ceux-ci. Par exemple, les produits ayant une fonction de distribution de demande semblable vont être regroupés en une famille. De plus, la capacité de production des

machines par usine est agrégée en une seule capacité par usine ou encore la demande totale de l'ensemble des familles de produits par usine est prise en compte. Ces décisions (planification de la production) optimales agrégées vont contraindre les décisions prises au niveau inférieur (l'ordonnement de la production). Au niveau opérationnel, ces données agrégées de planification de la production vont être désagrégées (les capacités de production par machine vont être détaillées, les demandes par famille de produits vont être considérées...).

En conséquence, les décisions prises au niveau de la planification de la production ignorent les contraintes liées à l'ordonnement de la production (les temps de changement d'outillage par exemple). Dès lors, la solution du modèle d'ordonnement de la production peut être infaisable (due à un manque de capacité par exemple). Habituellement, dans ce cas, le planning de production va être modifié de manière ad-hoc.

(Lassere 1992) propose un modèle qui intègre les décisions de planification et d'ordonnement de la production dans le cas d'un job shop. L'auteur développe un modèle global composé d'une fonction objectif où les coûts de production (coûts de stockage et coûts de production) ainsi que les coûts d'ordonnement (coûts de changement d'outillage) sont pris en compte. De plus, ce modèle est composé des contraintes traditionnelles liés au planning de production et à l'ordonnement de la production où le calcul de la capacité est détaillé (et non agrégées). La méthode de résolution de ce modèle global est basée sur la décomposition. En conséquence, le modèle global va générer deux sous modèles : un modèle de planification et un modèle d'ordonnement. Le modèle de planification de la production a été obtenu en fixant les variables de décision liées à l'ordonnement de la production tandis que le modèle d'ordonnement de la production a été obtenu en fixant les variables liées au problème de planification de production. Ces deux sous modèles sont résolus de manière itérative.

(Riane et al. 2001) proposent un outil d'aide à la décision qui intègre la résolution du modèle de planification et d'ordonnement de la production dans le cas d'un flowshop hybride. Les auteurs définissent à partir de la structure hiérarchique du modèle de planification de la production et d'ordonnement de la production, une méthodologie de résolution qui permet d'éviter les problèmes de faisabilité pouvant survenir d'une telle procédure de résolution. En effet, les auteurs proposent un processus de feed-back (réalisé au moyen de la simulation) entre le modèle d'ordonnement et le modèle de planification. Par ce mécanisme de feed-back, la contrainte de capacité agrégée au niveau du modèle de planification de la produc-

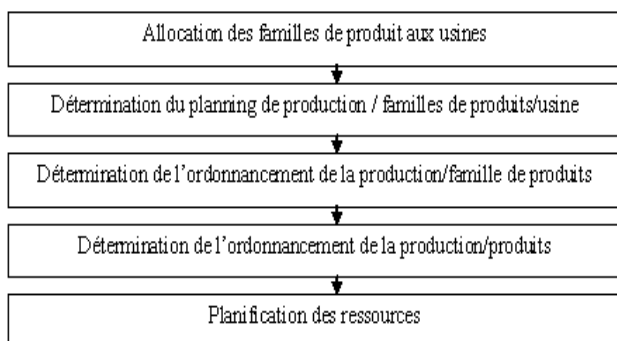


Figure 2 – Structure hiérarchique des décisions dans le domaine de l'ordonnement de la production

tion va être ajustée en fonction des besoins obtenus lors de la simulation du système globale de production qui prend en compte toutes les caractéristiques du système.

Un autre domaine d'intégration qui a été exploré dans la littérature est celui de l'ordonnancement de la production et de l'allocation des ressources humaines. Dans les problèmes d'ordonnancement, l'hypothèse principale est que les ressources humaines nécessaires à la production sont disponibles en quantité adéquate au moment où la machine le nécessite. En réalité, l'ordonnancement de la production nécessite de coordonner les tâches d'une part et les ressources humaines nécessaires à la réalisation de cette tâche d'autre part.

(Daniels & Mazzola 1994) proposent un modèle global qui détermine de manière simultanée l'ordonnancement de la production et l'allocation de ressources flexibles et renouvelables (ouvriers polyvalents) sur les machines dans un flow shop. La flexibilité des ressources est caractérisée par l'habilité de déplacer des ressources d'une machine à une autre en fonction des goulots d'étranglement. Pour ce faire, les auteurs développent un modèle global d'ordonnancement de la production avec comme objectif la minimisation de la durée total d'ordonnancement et dont les contraintes définissent la durée total d'ordonnancement tout en prenant en compte que le temps d'exécution d'une tâche est proportionnel au nombre d'ouvriers affectés à celle-ci. Le modèle développé est un modèle NP complet. Les auteurs développent une méthode de résolution exacte pour la résolution de problème de petite taille et une méthode heuristique pour des problèmes de plus grandes tailles. La méthode heuristique est basée sur la décomposition où les modèles d'ordonnancement de la production et d'allocation des ressources sont résolus de manière hiérarchique avec une boucle itérative. A chaque itération, les temps d'exécution des tâches sont mis à jour jusqu'au moment où la performance du système n'est plus améliorée.

Les auteurs poursuivent leur recherche dans ce domaine en 2004 (Daniels, Mazzola & Shi 2004) en proposant un modèle traitant de ressources (ouvriers) partiellement flexibles dans le cas d'un flow shop. Le but des auteurs à travers cet article est d'analyser le lien entre la performance (la minimisation de la durée total d'ordonnancement) du système et le degré de flexibilité des ressources. Pour ce faire, les auteurs développent un modèle global qui ressemble étroitement au modèle développé en 1994 (Daniels & Mazzola 1994) mais avec comme particularité que l'allocation des ouvriers sur les machines doit respecter la matrice des aptitudes de chaque ouvrier. Cette matrice des aptitudes dépend des formations réalisées par les ouvriers et du nombre d'ouvriers

formés à chaque unité de temps. Les auteurs identifient des ensembles de compétences qui améliorent la performance du système. Les analyses numériques prouvent que la performance du système peut être améliorée par un faible investissement dans la formation des ouvriers et que la manière d'allouer la flexibilité aux différents ouvriers peut avoir un impact important sur la performance du système.

L'analyse de la modélisation simultanée de l'ordonnancement de la production et des effectifs requis a été également étudiée par (Giard, Lagroue, Noiset, Cataldi & Barbieri 1996). Les auteurs analysent le cas d'un centre de tri postal où les machines peuvent être considérées comme travaillant selon un système de flow shop et dont la capacité de chaque machine dépend du nombre de travailleurs affectés à celle-ci. Il définit un modèle global où le niveau de production est variable en fonction du nombre d'effectifs affectés au processeur et ayant comme objectif la minimisation des variations des effectifs sur chaque processeur. Ils proposent un Système Interactif d'Aide à la Décision (méthode basée sur l'intelligence artificielle) pour résoudre leur problème. (Chen 2004) analyse l'intégration des décisions d'ordonnancement de la production avec l'allocation des ressources dans le cas de machines parallèles. L'auteur présente deux modèles globaux qui diffèrent par le critère de performance de l'ordonnancement de la production. La fonction objectif du premier modèle est constituée de la durée total d'achèvement des tâches et du coût des ressources allouées tandis que la fonction objectif du second modèle est composée du nombre de tâche achevée en retard et du coût total des ressources allouées. La méthode de résolution de ces modèles globaux est basée sur un algorithme par séparation et évaluation où la relaxation linéaire du modèle global obtenu à chaque noeud est résolu par la méthode de génération de colonnes. Par sa méthodologie, l'auteur a su résoudre des problèmes de taille moyenne.

(Benbouzid-Sitayeb, Varnier & Zerhouni 2006) développent un modèle qui prend en compte la résolution simultanée du problème d'ordonnancement de la production et de la maintenance. Leur modèle intégré prend en compte ces deux décisions au travers d'une fonction objectif qui contient les critères de maintenance et de production. Ce modèle intégré est résolu à l'aide d'une adaptation de l'algorithme de colonies de fourmis et comparé à la méthode séquentielle traditionnelle de résolution de ces deux modèles.

Une autre extension de l'intégration des décisions d'ordonnancement a été réalisée par (Yanasse & Lamosa 2007). Les auteurs analysent l'intégration des décisions d'ordonnancement de patron et du problème de découpe. Habituellement, ces deux décisions sont prises de manière successive : d'abord

le problème de découpe est résolu et ensuite le problème d'ordonnement des patrons est traité. Les auteurs formulent un modèle global où le lien entre les deux problèmes est perceptible à travers la fonction objectif et les contraintes. Ce modèle global est formulé comme un modèle linéaire en nombres entiers et les auteurs le résolvent à l'aide d'une méthode de décomposition. D'abord, une relaxation lagrangienne est opérée et les contraintes liants le modèle de découpe et le modèle d'ordonnement de la production sont relaxées. Cette relaxation permet de décomposer le modèle en deux sous-modèles : un modèle de découpe et un modèle d'ordonnement où les contraintes liants les deux sous modèles sont représentés par les facteurs de lagrange. Les deux sous modèles sont résolus par une méthode itérative.

## 5. GESTION DU TRAFIC AÉRIEN

Depuis 1950 (Klabjan 2005), la gestion logistique dans le domaine aérien fait l'objet d'études approfondies. On peut constater, de nos jours, que les problèmes mathématiques liés à cette gestion logistique deviennent de plus en plus complexes. Cette complexification peut être attribuée à la taille de plus en plus importante des compagnies aériennes, l'accroissement de la demande ainsi qu'à la pression constante d'améliorer la rentabilité de celles-ci. Ces deux courants ont poussé des chercheurs à s'intéresser de plus en plus aux dépendances qui peuvent exister entre les décisions de niveaux hiérarchiques différents.

Dans le domaine aérien, les décisions stratégiques portent sur la taille de la flotte et le type d'avion qui la compose. Les décisions tactiques sont nombreuses et peuvent se répartir en plusieurs classes ( Voir figure 3). Au début, ces décisions étaient traitées de manière indépendante et séquentielle due à la complexité combinatoire des problèmes (Klabjan, Johnson, Nemhauser, Gelman & Ramaswamy 2002). Ces décisions sont prises 12 mois avant la date opérationnelle et servent à planifier un horizon de temps de 9 mois à partir du jour d'exécution.

Au niveau tactique (Klabjan et al. 2002);(Guo, Melouli, Suhl & Thiel 2006), la planification permet de déterminer les paires origines/destinations ainsi que les heures de départ et d'arrivée pour chaque escale. La réalisation du planning se fait sur une durée de 3 mois. Une fois la planification établie, l'affectation, pour chaque segment de vol, d'un type d'avion est réalisée de manière à maximiser les revenus. Ensuite pour chaque type d'avion, l'itinéraire est établi (la suite de vol à réaliser par le même type d'avion) en prenant en compte les périodes de maintenance. Le problème de détermination d'un itinéraire se limite en général à un problème de faisabilité.

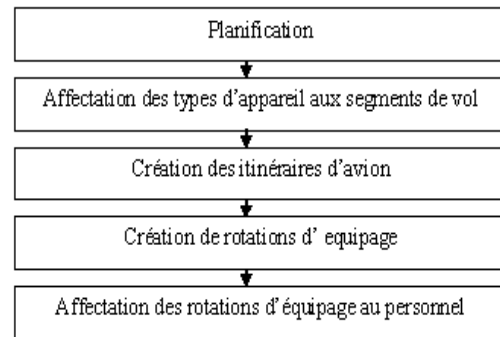


Figure 3 – Structure hiérarchique des décisions dans le domaine de la gestion du trafic aérien

Pour finir, pour chaque route, un problème de création de rotations d'équipage est résolu. Ceci va permettre de déterminer les séquences de période de vol et de période de repos. Cette séquence dure en général de 2 à 5 jours et commence et fini au même point de départ. La résolution du problème de rotation d'équipage permet d'allouer à chaque vol un équipage qualifié tout en minimisant les coûts liés aux personnels et en respectant la législation du travail (le temps et la quantité de repos, le temps de connexion entre deux vols successifs...). Ensuite, chaque séquence de période de vol et de période de repos va être combinée afin de créer des horaires mensuels pour le personnel qui vont satisfaire au mieux leurs exigences personnelles, la planification des formations. ...

Des modèles individuels ont été développés pour chacun de ces niveaux. Une revue de la littérature a été faite en 2005 par (Klabjan 2005) sur l'ensemble des modèles disponibles pour le problème d'affectation des types d'avion aux segments de vol et pour le problème de création d'itinéraires d'avion. En 2003, (Barnhart, Cohn, Johnson & Klabjan 2003) fournit une revue de la littérature pour le problème de rotations d'équipage et un exemple d'article traitant du problème de création d'horaires mensuels personnalisés est donné par (Gamache & Soumis 1998).

La planification établie au niveau tactique pourra être modifiée/adaptée le jour même de son exécution (décisions opérationnelles) pour prendre en compte les aléas climatiques, les embouteillages aériens, les maintenances non prévues ...

Au niveau tactique, on peut trouver dans la littérature des procédures de résolution qui tentent d'intégrer des décisions prises habituellement de manière séquentielles et indépendantes. La procédure séquentielle peut être très désavantageuse car peut donner des solutions fortement sous optimales. De plus, cette résolution séquentielle peut entraîner des problèmes de faisabilité due à un manque de flexibilité (Cordeau, G.Stojkovic; Soumis & Desrosiers 2001) .

(Lohatepanont & Barnhart 2004) proposent un mo-

dèle journalier qui intègre les décisions tactiques de planification et d'affectation des types d'appareil aux segments de vol. Les auteurs développent un modèle global intégrant ces deux décisions. La procédure de résolution proposée se base sur une combinaison de méthode dont la génération de colonnes et/ou de ligne et la méthode de séparation et évaluation. Des résultats préliminaires sont fournis et montrent les gains pouvant être réalisés.

La résolution simultanée des décisions de routage d'avion et d'affectation des types d'avion aux segments de vol a été étudiée par (Barnhart, Boland, Clarke, Johnson, Nemhauser & Shenoï 1998). Les auteurs proposent un « string-based » modèle où un string représente une séquence de vol qui commence et finit à une station de maintenance, qui satisfait les contraintes de flux et qui respecte les périodes de maintenance. Ils proposent de résoudre leur modèle par une combinaison de méthode de séparation et évaluation et de génération de colonnes.

Dans le domaine du trafic aérien, les coûts principaux sont les coûts opératoires liés à la flotte c'est-à-dire le fuel et l'équipage. On retrouve dès lors dans la littérature des articles traitant de l'intégration des décisions de création d'itinéraires d'avion et de création de rotations d'équipage car une meilleure gestion de ces décisions apporte une plus grande profitabilité (Cordeau et al. 2001). L'intégration des décisions de création d'itinéraires d'avion et de création de rotations d'équipage se justifie par la présence dans les deux modèles de variable de temps de connexion entre les vols. En effet, le temps entre deux vols réalisés par le même équipage est minimisé si le même avion est utilisé. Par conséquent, le nombre de rotations d'équipage faisables dépend des décisions de création d'itinéraires d'avion.

Une première tentative d'intégration fut réalisée par (Klabjan et al. 2002). Leur but est de résoudre le problème de rotations d'équipage sans que les décisions prises lors de la résolution du problème de création d'itinéraires d'avion n'agissent comme contrainte. Pour ce faire, les auteurs développent un modèle de rotations d'équipage qui prend en compte des contraintes de faisabilité du modèle de création d'itinéraires (le nombre d'avions disponibles). Ils prennent également en compte des fenêtres de temps pour le départ et l'arrivée des avions ce qui permet d'améliorer d'avantage la rentabilité de l'entreprise. Leur méthodologie repose sur la résolution de leur modèle de rotations d'équipage avant de résoudre le modèle de création d'itinéraire d'avion (inversion de la procédure séquentielle présentée dans la figure 3). Dans cette proposition d'intégration, les auteurs ne garantissent pas de trouver une solution faisable pour le problème de création d'itinéraires d'avion en terme des maintenances à réaliser.

(Cordeau et al. 2001) propose un modèle qui prend en compte de manière simultanée les décisions de création d'itinéraires et de création de rotations d'équipage. Ce modèle global contient des contraintes ne s'adressant que au problème de création d'itinéraires et que au problème de création de rotations d'équipage ainsi que des contraintes liants les deux problèmes comme celles concernant les temps de connexion entre deux vols. Ils proposent de résoudre ce modèle global par la méthode de décomposition de Benders où chacun des sous-problèmes (le problème maître est le problème de création d'itinéraires d'avion et le problème esclave le problème de création de rotations d'équipage) est résolu par la méthode de génération de colonnes. Des solutions entières sont obtenues au moyen d'une heuristique. Ils arrivent à résoudre des problèmes provenant de cas concret pouvant contenir jusqu'à 500 segments de vol.

(Cohn & Barnhart 2003) développent un modèle de création de rotations d'équipage qui prend en compte les contraintes de création des itinéraires d'avion. Ils proposent une procédure de résolution exacte (par la méthode de séparation et évaluation combinée avec la méthode de génération de colonnes) et une heuristique (méthode de décomposition où le modèle de création de rotations d'équipage et le modèle de création d'itinéraires sont résolus de manière itérative) qui offre des solutions de qualité en un temps raisonnable. Ils démontrent également que seul certaines des contraintes de maintenance ont un impact sur le modèle de création de rotations d'équipage.

L'intégration des décisions de création de rotations d'équipage et d'affectation des rotations d'équipage au personnel a été étudiée par (Guo et al. 2006). L'étude en séquence de ces deux problèmes est délicate car les rotations d'équipage formées peuvent être irréalisables si on prend en compte les activités individuelles déjà planifiées. En conséquence, les auteurs proposent de prendre en compte au niveau de la constitution des rotations d'équipage, les activités individuelles pré planifiées sans attribuer déjà personnellement un horaire (ce qui sera fait au niveau du problème d'affectation des rotations d'équipage). Ils développent un modèle de flux afin de générer ces rotations d'équipage modifiée (c'est à dire prenant en compte les activités individuelles pré planifiées). De plus, ce modèle prend en compte les différents lieux de départ des différents membres du personnel ainsi que l'état des membres du personnel (en vol, à la base, en repos, en formation...).

(Medard & Sawhney 2007) veulent résoudre de manière simultanée les problèmes de création de rotations d'équipage et d'affectation des rotations d'équipage au personnel afin que la gestion opérationnelle de ces modèles soit meilleure. L'intégration de ces deux problèmes est rendue faisable grâce aux objectifs

poursuivis par les auteurs. En effet, ceux-ci veulent obtenir des solutions au niveau opérationnel donc rapidement. Cette limitation du temps de reoptimisation réduit fortement la taille du modèle. En conséquence, ils proposent un modèle qui intègre complètement les deux problèmes avec un horizon de temps glissant.

(Dandhu & Klabjan 2007) proposent un modèle qui intègre trois phases de décision tactique : l'affectation des types d'appareil aux segments de vol, la création des itinéraires d'avion et la création de rotations d'équipage. Leur modèle global intègre de manière complète les décisions d'affectation de type d'appareil et de création des rotations d'équipage tout en garantissant la faisabilité du problème de création d'itinéraires d'avion. Par contre les périodes de maintenance ne sont pas prises en compte. Le modèle global étant de taille conséquente, les auteurs proposent deux méthodologies de résolution. La première méthode de résolution est basée sur la méthode de décomposition de Benders. La relaxation linéaire du modèle de rotations d'équipage est résolu et les informations relatifs ou dual de ce problème sont utilisées pour former des coupes de Benders. Ces coupes sont ensuite ajoutées au modèle d'affectation des types d'appareil aux segments de vol. La deuxième méthode résout le modèle intégré que pour un sous ensemble des rotations d'équipage à la fois.

## 6. DISTRIBUTION ET TRANSPORT

Dans cette section, nous allons considérer les différentes planification intégrées, proposées dans la littérature, considérant comme une des décisions intégrées, le problème de tournées de véhicule (VRP). Le VRP classique concerne la détermination optimale de tournées de véhicule partant d'un ou plusieurs dépôts afin de servir des clients. L'objectif est de minimiser les coûts de transport pour une demande par client connue. Plusieurs extensions de ce modèle de base peuvent être trouvées dans la littérature (VRP à capacité limitée, VRP avec des fenêtres de temps...). Ce problème donne lieu à une formulation en nombres entiers dont la complexité combinatoire est NP difficile.

Une revue de la littérature effectuée par (Sarmiento & Nagi 1999) expose les différentes études réalisées dans le domaine de l'intégration des décisions de création des tournées de véhicule et de planification de la production (détermination des lots de production et de l'ordonnancement de la production).

Récemment, (Chen & Vairaktarakis 2005) étudient l'intégration des décisions d'ordonnancement de la production avec les décisions de création des tournées de véhicule. Les auteurs analysent la situation particulière de production à la commande (pas de stock de

produit fini). Le taux de service clientèle va dépendre du temps d'attente subit par celui-ci. Ce taux sera d'autant plus grand que le nombre de véhicules utilisés pour la distribution augmente. Cependant cette augmentation de la flotte va engendrer une augmentation des coûts de distribution. Il existe donc un compromis entre le taux de service réalisé et les coûts de distribution engendrés (vont être repris dans la fonction objectif). Les auteurs proposent un modèle qui intègre les décisions d'ordonnancement de la production avec les décisions d'ordonnancement de la flotte et de création d'itinéraires pour les véhicules. Les auteurs prennent en compte deux mesures du taux de services : le temps de livraison moyen et le temps de livraison maximal ainsi que deux types de configuration pour la production : une seule machine et des machines travaillant en parallèles. La résolution de ce modèle global est basée sur une heuristique.

(Haase, Desaulniers & Desrosiers 2001) élaborent un modèle qui détermine de manière simultanée les véhicules à utiliser et les conducteurs à requérir en fonction d'un horaire prédéfini. Le modèle est basé sur le cas d'un seul dépôt composé d'un stock de véhicules homogènes. Le personnel dispose également de caractéristiques semblables mais varie en nombre en fonction de leurs disponibilités. De plus, la durée du trajet est connue. L'auteur développe un modèle de planification des horaires du personnel contenant des contraintes au niveau des véhicules disponibles. Ces contraintes sur les véhicules disponibles sont nécessaires afin d'obtenir une solution faisable lors de la résolution du modèle d'allocation des véhicules. Cette méthode de résolution ressemble étroitement à la méthode utilisée par (Klabjan et al. 2002) afin de résoudre le problème de création d'itinéraires d'avion et de création d'horaires du personnel.

(Freling, Huisman & Wagelmans 2003) proposent un nouveau modèle d'intégration des décisions de planification des véhicules et du personnel dans le cas d'un seul dépôt avec des véhicules homogènes. Leur modèle global prend en compte aussi bien dans la fonction objectif que dans les contraintes le lien qui existe entre ces deux modèles. Leur modèle est résolu à l'aide d'une combinaison de méthodes dont la relaxation lagrangienne et la méthode de génération de colonnes. Ils testent leur modèle et leur méthode de résolution sur une base de données réelles. Par rapport à Hasse et al (2001), les auteurs proposent un modèle et une méthodologie applicable dans des cas réels.

(Hollis, Forbes & Doublas 2006) proposent un modèle qui détermine de manière simultanée les véhicules et le personnel à assigner à des itinéraires. Leur étude se base sur le cas de la gestion de la poste en Australie. Dans ce contexte, on a des dépôts multiples avec des types de véhicule différents ainsi que des chauffeurs polyvalents. Pour prendre au mieux en compte

le compromis à réaliser, les auteurs développent un modèle global où ils prennent en compte dans leur fonction objectif les coûts variables et fixes du personnel ainsi que ceux des véhicules. Ce modèle est également composé des contraintes traditionnelles des modèles d'allocation des véhicules et d'allocation des conducteurs ainsi que de contraintes additionnelles exprimant les relations liants les deux modèles. Leur méthodologie de résolution repose sur la combinaison d'une heuristique et de la méthode de génération de colonnes, l'heuristique permettant de trouver une solution initiale.

(Chiang & Russell 2004) développent un modèle global qui intègre les décisions d'achat de gaz propane et de création d'itinéraires de véhicule pour se rendre des entrepôts régionaux vers les clients. L'importance de cette intégration repose sur la variation de prix d'achat du gaz propane entre les différents entrepôts régionaux. Dès lors, il existe un compromis entre le prix d'achat du gaz propane dans les différents entrepôts régionaux, la distance à parcourir pour atteindre ces entrepôts, les coûts de transport et les réglementations concernant les kilomètres parcourus par les chauffeurs et le temps de parcours maximal. Les auteurs testent leur modèle global sur une base de données réelles et montre que des économies de coûts peuvent se chiffrer jusqu'à des millions de dollars pour certains grands distributeurs. Leur méthodologie et modèle sont également adaptables au transport d'autres sources d'énergie.

(Erkut & Alp 2007) analysent la situation particulière du transport de marchandises dangereuses. Afin de réduire les risques d'accidents, les auteurs veulent prendre simultanément en compte les décisions de création d'itinéraires de véhicule et la planification des périodes de parcours. En effet, la probabilité d'avoir un accident dépend du moment de la journée où le trajet est réalisé (la nuit, la probabilité d'avoir un accident est plus grande que pendant la journée). Les auteurs proposent quatre modèles globaux qui contiennent des contraintes de plus en plus réalistes. Les auteurs vont modéliser la probabilité d'avoir un accident comme une fonction du temps afin d'intégrer les décisions de création d'itinéraires de véhicule et périodes de parcours. Ces modèles sont résolus à l'aide d'algorithme pseudo dynamique.

(Cordeau et al. 2001) analysent la prise en compte simultané des décisions d'allocation des voitures et des locomotives à un train. En général, ces problèmes sont résolus de manière séquentielle : d'abord le nombre de voitures à allouer à un train est déterminé ensuite la locomotive adéquate (suffisamment de puissance) est sélectionnée. Cette procédure séquentielle est due d'une part à la taille importante du

modèle global et à la variabilité de la demande d'autre part. Les auteurs traitent de ce problème dans trois articles (Cordeau et al. (2000) et (2001)). Le premier article proposait une application dans le cas de VIA Rail Canada où des contraintes spécifiques ont été ajoutées afin de prendre en compte la réalité du terrain. Ce problème a été résolu à l'aide d'une heuristique mais le temps de résolution croit énormément avec la taille du problème. Le deuxième modèle développé par les auteurs est un modèle plus général qui peut s'adapter à plusieurs situations. La méthodologie de résolution est basée sur la méthode de décomposition de Benders. Dans ce dernier article, les auteurs proposent des extensions par rapport au modèle de base cité précédemment. Ils développent une nouvelle méthodologie de résolution et rendent le problème solvable pour des situations de taille réelle.

## 7. CRITIQUES ET PERSPECTIVES

Une proposition de classification des différents articles par rapport aux différentes approches de planification intégrée introduites en section 3 est réalisée dans le graphique 4.

Plusieurs remarques peuvent être formulées concernant cette classification. Tout d'abord, la plupart des outils intégrés d'aide à la décision développés dans les articles analysés reposent sur une intégration de modèles. Deux approches de modélisation globale ont pu être observées. Soit, le modèle traditionnel individuel est modifié de manière à représenter mieux la réalité (Klabjan et al. 2002) et la procédure séquentielle/hierarchique est conservée. Soit, le modèle global découle d'une association brute des modèles individuels traditionnels. En terme de temps calcul, la résolution du modèle global (intégré) des décisions sera toujours plus coûteuse que la résolution décomposée et séquentielle des modèles individuels traditionnels. En conséquence, les auteurs proposent souvent des méthodes heuristiques de résolution plutôt que des méthodes de résolution optimales. Certaines des heuristiques proposées par les auteurs sont basées sur une méthode de décomposition (décomposition de Benders, relaxation Lagrangienne). Dès lors, dans ce cas, la distinction entre l'intégration de modèles et l'intégration de méthodes devient délicate. Les auteurs auraient pu proposer une reformulation du modèle global afin de gagner en temps calcul. Une reformulation aurait pu permettre de développer des modèles globaux plus pertinents, représentant mieux la réalité et les besoins des acteurs économiques (de taille plus grande). Cette option n'a pas été envisagée dans les articles traités.

Deuxièmement, aucune intégration de techniques n'était présente dans les articles étudiés pourtant cet aspect est fondamental. En effet, pour créer des outils d'aide à la décision applicables dans

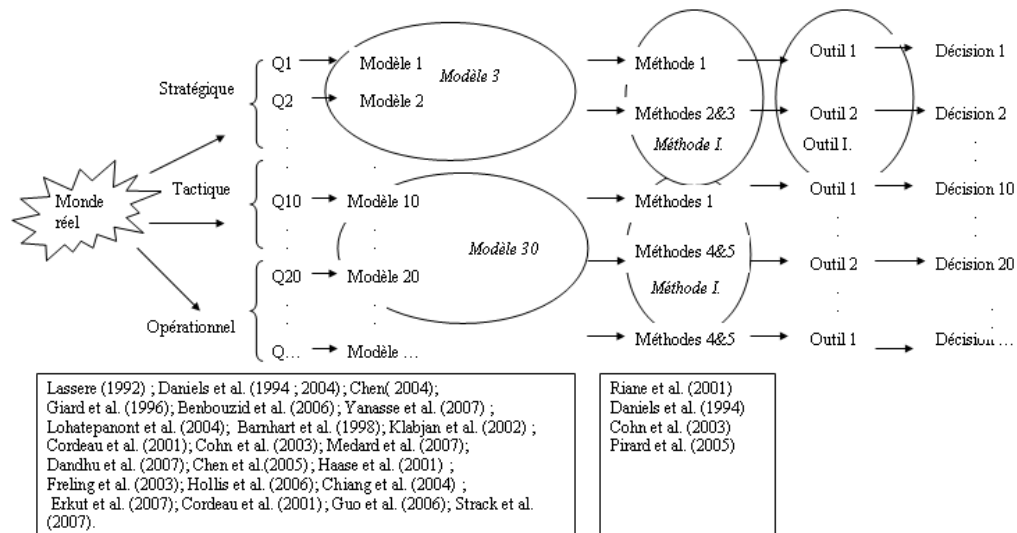


Figure 4 – Mise en parallèle des articles étudiés et des types d'intégration de décisions

les industries, des méthodes d'interopérabilité des techniques doivent être proposées.

Troisièmement, dans les articles cités, les auteurs ont comparé leur type de planification intégrée à la méthode séquentielle habituellement utilisée. Il aurait été intéressant d'analyser les gains économiques pouvant être obtenus sur le même problème mais avec des techniques d'intégration différentes (intégration de modèles et intégration de méthodes par exemple).

## CONCLUSIONS

Dans cet article, des outils d'aide à la décision reposants sur une intégration de problématique, de méthodologie et de technique ont été analysés dans les domaines de l'ordonnancement de la production, de la gestion aérienne et des tournées de véhicules.

Traditionnellement, une approche de planification hiérarchique et séquentielle était adoptée dans ces domaines d'application afin de répondre aux demandes des preneurs de décision. L'avantage principal d'une telle approche de planification était la réduction de la complexité du problème globale. De nos jours, les avancés technologiques et algorithmiques permettent de résoudre des modèles de tailles de plus en plus conséquentes. Il devient dès lors intéressant de se diriger vers une planification intégrée des décisions.

La planification intégrée apporte de nombreux avantages dont l'élimination de problèmes de faisabilité résultant d'une procédure séquentielle et des gains économiques plus élevés. Ces gains économiques seront d'autant plus élevés que le lien entre les niveaux de décision est important. Ce lien sera exprimé par les contraintes et données présentes dans un modèle et qui résultent de la solution du modèle précédent.

Dans cette analyse, trois approches de planification intégrées ont été définies. La première approche repose sur la formalisation d'un modèle mathématique intégrant des questions à des mêmes niveaux décisionnels ou à des niveaux décisionnels différents. La deuxième approche repose sur une méthodologie itérative intégrant des modèles de décision de niveau différent ou de même niveau. La dernière approche repose sur l'interopérabilité des techniques de résolution.

Dans les articles analysés, l'intégration de modèles a été souvent utilisée alors que l'intégration de méthodes peu. La difficulté de l'intégration de techniques n'a jamais été traitée.

## RÉFÉRENCES

- Barnhart, C., Boland, N., Clarke, L., Johnson, E., Nemhauser, G. & Shenoi, R. (1998). Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing, *Transportation Science* **32** : 208–220.
- Barnhart, C., Cohn, A., Johnson, E. & Klabjan, D. (2003). Crew scheduling, *R.Hall, ed. Handbook of Transportation Science* **Kluwer Scientific Publishers** : 517–560.
- Benbouzid-Sitayeb, F., Varnier, C. & Zerhouni, N. (2006). Résolution du problème de l'ordonnancement conjoint production/maintenance par colonies de fourmis, in M. Gourgand & F. Riane (eds), *Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités*, Lavoisier.
- Chen, Z.-L. (2004). Simultaneous Job Scheduling and Resource Allocation on Parallel Machines, *Annals of Operations Research* **129** : 135–153.

- Chen, Z.-L. & Vairaktarakis, G. L. (2005). Integrated Scheduling of Production and Distribution Operations, *Management Science* **51** : 614–628.
- Chiang, W.-C. & Russell, R. (2004). Integrating purchasing and routing in a propane gas supply chain, *European Journal of Operational Research* **154** : 710–729.
- Cohn, A. & Barnhart, C. (2003). Improving crew scheduling by incorporating key maintenance routing decisions, *Operations Research* **51** : 387–396.
- Cordeau, J.-F., G. Stojkovic, Soumis, F. & Desrosiers, J. (2001). Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling, *Transportation Science* **35** : 375–388.
- Dandhu, R. & Klabjan, D. (2007). Integrated Airline Fleeting and Crew-Pairing Decisions, *Operations Research* **55** : 439–456.
- Daniels, R. & Mazzola, J. (1994). Flow shop scheduling with resource flexibility, *Operations Research* **42** : 504–522.
- Daniels, R., Mazzola, J. & Shi, D. (2004). Flow Shop Scheduling with Partial Resource Flexibility, *Management Science* **50** : 658–669.
- Dempster, M., Fisher, M., Jansen, L., Lageweg, B., Lenstra, J. & Kan, A. R. (1981). Analytical Evaluation of Hierarchical Planning Systems, *Operations Research* **29** : 707–716.
- Erkut, E. & Alp, O. (2007). Integrated Routing and Scheduling of Hazmat Trucks with Stops En Route, *Transportation Science* **41** : 107–122.
- Freling, R., Huisman, D. & Wagelmans, A. (2003). Models and Algorithms for Integration of Vehicle and Crew Scheduling, *Journal of Scheduling* **6** : 63–85.
- Gamache, M. & Soumis, F. (1998). A method for optimally solving the rostering problem, *Operation Research in the Airline Industry* **Kluwer Academic Publishers** : 124–157.
- Giard, V., Lagroue, P.-Y., Noiset, P., Cataldi, M. & Barbieri, J. (1996). Siad permettant la définition simultanée d'un ordonnancement de la production d'un centre de tri postal et des effectifs requis, *Technical report*, GREGOR, Université Paris 1, Panthéon-Sorbonne.
- Guo, Y., Mellouli, T., Suhl, L. & Thiel, M. (2006). A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases, *European Journal of Operational Research* **171** : 1169–1181.
- Haase, K., Desaulniers, G. & Desrosiers, J. (2001). Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling in Urban Mass Transit Systems, *Transportation Science* **35** : 286–303.
- Hax, A. & Meal, H. (1975). *Hierarchical integration of production planning and scheduling*, Geisler, M.A. (Eds), Studies in Management Science, Logistics, North Holland-American, Elsevier, New York, NY.
- Hollis, B., Forbes, M. & Doublas, B. (2006). Vehicle routing and crew scheduling for metropolitan mail distribution at Australia Post, *European Journal of Operational Research* **173** : 133–150.
- Klabjan, D. (2005). Large scale models in the airline industry, in G. Desaulniers, J. Desrosiers & M.M. Solomon (eds), *Column Generation*, Kluwer Academic Publishers, pp. 163–197.
- Klabjan, D., Johnson, E., Nemhauser, G., Gelman, E. & Ramaswamy, S. (2002). Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints, *Transportation Science* **36** : 337–348.
- Lassere, J. (1992). An Integrated Model for Job-Shop Planning and Scheduling, *Management Science* **38** : 1201–1211.
- Lohatepanont, M. & Barnhart, C. (2004). Airline Schedule Planning : Integrated Model and Algorithms for Schedule Design and Fleet Assignment, *Transportation Science* **38** : 19–32.
- Medard, C. & Sawhney, N. (2007). Airline crew scheduling from planning to operations, *European Journal of Operational Research* **183** : 1013–1027.
- Pirard, F. (2005). *Une démarche hybride d'aide à la décision pour la reconfiguration et la planification stratégique des réseaux logistiques des entreprises mult-sites*, PhD thesis, Facultés Universitaires Catholiques de Mons.
- Riane, F., Artiba, A. & Iassinovski, S. (2001). An integrated production planning and scheduling system for hybrid flowshop organizations, *International Journal of Production Economics* **74** : 33–48.
- Sarmiento, A. & Nagi, R. (1999). A review of integrated analysis of production-distribution, *IIE Transactions* **31** : 1061–1074.
- Strack, G. & Pochet, Y. (2007). An integrated model for warehouse and inventory planning, *Technical report*, Louvain School of Management, Core, Université Catholique de Louvain.
- Vidal, C. & Goetschalckx, M. (2001). A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation, *European Journal of Operational Research* **129** : 134–158.
- Yanasse, H. H. & Lamosa, M. J. P. (2007). An integrated cutting stock and sequencing problem, *European Journal of Operational Research* **183** : 1353–1370.