

APPROCHE A DEUX NIVEAUX POUR LA PLANIFICATION REACTIVE D'UN PARTENAIRE D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE

Hassan GHARBI^{1,4}, Gérard FONTAN^{1,2}

Colette MERCE^{1,3}, Mohamed MOALLA⁴

¹ : Université de Toulouse –LAAS-CNRS
7 avenue du Colonel Roche – 31 077

Toulouse cedex - France

² : Université de Toulouse – INP

hgharbi@laas.fr, fontan@laas.fr

³ : Université de Toulouse - INSA

⁴ : Laboratoire d'Informatique, de Parallélisme et de
Productique de Tunis

merce@laas.fr, mohamed.moalla@fst.rnu.tn

RESUME : Ce travail propose une approche permettant d'élaborer une planification tactique optimale et réactive d'un maillon d'une chaîne logistique en présence de paramètres incertains. Notre approche se fonde sur une structure à deux niveaux décisionnels. Le premier niveau effectue une planification agrégée en minimisant le coût global de production. Il établit ensuite « un plan de guidage » qui est transmis au niveau détaillé. Ce dernier effectue sa planification en suivant « au mieux » le plan de guidage et en prenant en compte les contraintes et données détaillées ignorées au niveau supérieur. Le niveau détaillé adopte un processus dynamique de planification à horizon glissant qui lui permet de réactualiser ses données à chaque étape de planification afin d'assurer la réactivité du processus décisionnel face à des perturbations ou des incertitudes sur les données ou sur l'état du système de production.

MOTS-CLES : Planification tactique, Incertitude, Approche multiniveau, Guidage, Réactivité, Programmation mathématique

1. INTRODUCTION

Depuis la fin des années 80, on assiste à des mutations importantes dans les modes de relations interentreprises dues essentiellement aux évolutions progressives de l'environnement économique et aux progrès technologiques accrus dans les domaines de la communication et du traitement de l'information. Dans cette conjoncture, les tensions concurrentielles entre entreprises s'accroissent et l'enjeu principal des industriels est d'accroître leur compétitivité afin d'assurer leur développement. Encouragées par le développement des nouvelles technologies de l'information, les entreprises se recentrent sur leur savoir-faire, externalisent les activités jugées secondaires et se réorganisent en réseaux d'entreprises-partenaires qui coopèrent dans le but de fournir une meilleure qualité de service à leurs clients. Une nouvelle structure industrielle - la chaîne logistique - est ainsi apparue. De nombreuses définitions de la chaîne logistique sont disponibles dans la littérature (Tayur et Ganeshan, 2002), (Telle, 2003), (Thierry, 2003). Ces définitions mettent généralement en évidence l'aspect structurel d'une chaîne logistique en spécifiant les acteurs qui la composent, les flux de matières et d'informations qui circulent entre eux et l'objectif global qui est la satisfaction du client. La gestion de la chaîne logistique est un champ d'étude important qui a

donné lieu à une littérature très abondante dans ce domaine. (Croom et al., 2000), (Tan, 2001) fournissent un état de l'art dans ce domaine. La littérature distingue deux grandes tendances pour la gestion des chaînes logistiques (François et al., 2005). La première vise une gestion centralisée de l'ensemble de la chaîne ; la deuxième s'oriente vers une gestion décentralisée qui exploite les relations client/fournisseur existant entre les différents partenaires de la chaîne et s'efforce d'intégrer un ensemble de centres de décisions distribués. Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans ce deuxième type d'approche et s'intéresse plus particulièrement à la planification d'un maillon d'une chaîne logistique en interaction avec ses partenaires (clients, fournisseurs, sous-traitants).

1.1 Incertitude et réactivité au sein d'une chaîne logistique

Un élément fondamental dans la gestion de chaînes logistiques est la prise en compte de l'incertitude qui caractérise certaines données (capacités, délais, demandes). De nombreux aléas viennent également perturber ces systèmes de production rendant parfois inapplicables ou inappropriées les décisions planifiées. Le processus de planification doit donc garantir une certaine réactivité permettant d'adapter dynamiquement les décisions aux incertitudes et aux aléas. (Galasso, 2007)

identifie différentes approches pour prendre en compte l'incertitude sur la demande. L'utilisation de modèles stochastiques constitue un champ important de recherche (Escudero et al., 1999), (Leung et al., 2005) ainsi que la modélisation de l'incertitude par la logique floue (Grabot et al., 2005), (Fargier et Thierry, 2000). L'approche la plus fréquemment rencontrée, tant dans la littérature que dans le contexte industriel, se base sur un processus de planification périodique à horizon glissant qui intègre la demande ferme connue à court terme et des prévisions pour la demande à moyen terme (Zhao et Xie, 1998), (Telle, 2003), (Galasso et al., 2006). La mise en œuvre de ce type de planification entraîne des problèmes de « nervosité » et de stabilité des décisions, déjà identifiés dans le cadre d'approches MRP (Ho et al., 1995) et souvent résolus par l'introduction d'horizons gelés (Genin, 2003), (Lamouri, 2006). Récemment, (Genin et al., 2007) ont proposé et comparé différentes approches pour assurer la robustesse et la stabilité des décisions en présence d'incertitude sur la demande. Les résultats obtenus par simulation montrent l'intérêt d'une planification par « plan de référence » qui permet d'obtenir un bon compromis entre besoin de réactivité et stabilité des décisions. Il est important de noter que l'incertitude est souvent associée à la notion de risque (Mahmoudi, 2006). Tous ces travaux sont basés sur un niveau décisionnel unique. Dans ce cadre, il est difficile de concilier la robustesse vis à vis de paramètres incertains et la stabilité des décisions. Face à cette limitation, les approches multiniveau (Merce et Fontan, 2001) constituent une voie intéressante : souvent liées à des mécanismes d'agrégation/désagrégation, elles permettent de combiner la robustesse à moyen terme de décisions agrégées et la réactivité détaillée indispensable à court terme.

1.2 Objet du travail présenté

Ainsi, le travail présenté dans cet article s'intéresse à la planification tactique et opérationnelle d'un maillon d'une chaîne et propose une approche à deux niveaux décisionnels. D'une part, cette structure permet d'établir une planification à moyen terme de l'entité (plans de production interne ou sous-traitée, ajustements de capacités, approvisionnements en composants) pour satisfaire à moindre coût les demandes prévisionnelles connues sur cet horizon. D'autre part, elle assure une certaine réactivité au processus de planification face à des perturbations ou à l'incertitude qui caractérise différents paramètres. En plus des contraintes locales du maillon considéré, la planification proposée intègre aussi certaines contraintes externes imposées par les partenaires de l'entité. L'article est structuré en six paragraphes. Après avoir introduit le contexte dans le premier paragraphe, nous détaillons la problématique de notre étude dans le deuxième. Nous y expliquons l'approche que nous proposons qui se fonde sur une structure à deux niveaux décisionnels. Le troisième paragraphe est consacré au premier niveau de la structure. Nous présentons ses caractéristiques, ses objectifs, sa modélisa-

tion sous la forme d'un programme mathématique et son interaction avec le niveau inférieur. Pour ce dernier point, nous mettons en relief la notion de « plan de guidage » (PG). Le quatrième paragraphe détaille le niveau inférieur en présentant ses caractéristiques, ses objectifs et la modélisation mathématique du processus dynamique de planification par un programme linéaire. Le cinquième paragraphe présente un squelette de simulation de toute la structure et l'expérimentation numérique envisagée. Enfin, la conclusion met en évidence les perspectives de recherche qui peuvent être données à ce travail. L'originalité de l'approche présentée est donc fondée sur l'intégration d'une planification à moyen terme et d'une planification à court terme. La planification optimale sur le moyen terme permet d'élaborer un plan de guidage, consigne pour le court terme, permettant ainsi d'assurer la robustesse des décisions.

2 PLANIFICATION TACTIQUE D'UN MAILLON D'UNE CHAÎNE.

2.1 Caractéristiques du problème

Le problème considéré dans cet article concerne la planification de la production d'une entité d'une chaîne logistique avec pour objectif la satisfaction de la demande client à moindre coût tout en prenant en compte d'une part les contraintes imposées par les différents partenaires de l'entité et d'autre part, le caractère incertain de certaines données. La figure 1 présente la structure de la chaîne logistique de base que nous étudions.

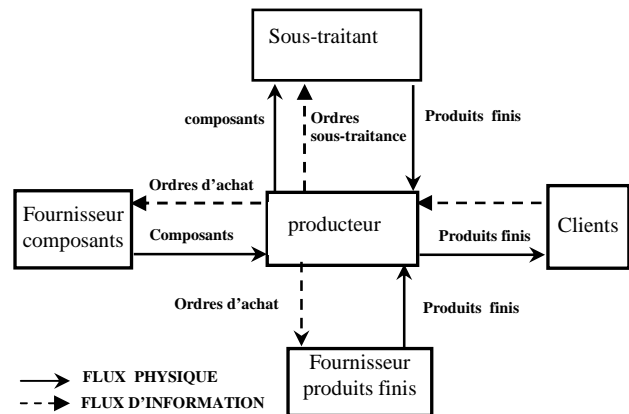


Figure 1. Acteurs de la chaîne logistique étudiée

Cette chaîne logistique se compose de cinq acteurs : un « producteur » de produits finis (entité considérée), un ensemble de clients, un sous-traitant du producteur, un fournisseur direct de produits finis et un fournisseur de composants. Le producteur assure la fabrication d'une variété de produits finis en utilisant différents composants. Il gère ainsi un stock pour chaque produit finis ainsi qu'un stock pour chaque composant. Les capacités de stockage sont considérées infinies. Pour ajuster sa capacité, il a la possibilité de recourir à la sous-traitance et/ou à l'achat direct de produits finis et/ou à l'utilisation d'heures supplémentaires. Dans le cas de la

sous-traitance, le producteur doit fournir à son sous-traitant les composants nécessaires pour la fabrication des unités désirées. Les heures supplémentaires ne peuvent pas dépasser un volume maximum défini pour chaque ressource et pour chaque période. Afin de s'approcher au mieux de la réalité industrielle et de bien matérialiser les liens qui existent entre le producteur et les différents acteurs de la chaîne, le processus de planification doit tenir compte de différents délais qui confèrent une certaine inertie aux systèmes productif et décisionnel et limitent leur réactivité. Dans notre cas, le producteur se trouve ainsi face à quatre types de délais qui sont : le délai de fabrication interne d'un produit, le délai de sous-traitance d'un produit, les délais d'approvisionnement des composants et des produits finis. De plus, certaines décisions telles que l'ajustement de capacités, le recours à la sous-traitance doivent être suffisamment anticipées pour être mises en œuvre à une période donnée. Ces délais d'anticipation incompressibles doivent également être intégrés dans la planification.

2.2 Problématique et approche envisagée

Dans ce travail, nous nous focalisons sur l'entité *Producteur* et nous nous intéressons essentiellement à l'élaboration de sa planification qui doit permettre d'atteindre les deux objectifs suivants :

- a- générer un plan de production optimal par rapport aux différents coûts relatifs au processus de production, permettant de satisfaire les demandes clients connues à moyen terme et d'intégrer les contraintes imposées par les partenaires du producteur définis dans la figure 1 ;
- b- assurer la **réactivité** du processus de planification pour absorber les inévitables perturbations et les incertitudes sur certaines données (demandes clients, capacités disponibles, etc.).

Pour assurer la planification optimale et réactive recherchée, nous proposons de coordonner et de synchroniser une planification *agrégée* à moyen terme et une planification *détaillée* à court terme dans le cadre d'une structure à deux niveaux. La coordination entre niveaux est effectuée à l'aide de la notion de «**Plan de Guidage**». La planification agrégée (à moyen terme) précise les volumes globaux de production interne ou sous-traitée, les ajustements de capacités, les niveaux de stocks sur des macro-périodes pour satisfaire à moindre coût les prévisions de demandes par macro-période connues sur l'horizon considéré. Un plan de guidage peut être défini à l'issue de cette étape : il contient les informations que l'on choisit de transmettre au niveau détaillé et qui seront interprétées par celui-ci comme des contraintes à respecter ou des objectifs à atteindre. Selon la portée temporelle et la nature des informations contenues dans le plan de guidage, on accorde une autonomie plus ou moins grande au niveau détaillé. Une planification détaillée, à plus court terme, est alors effectuée. Elle est basée sur une modélisation plus fine du processus de

production de l'entité et de ses relations avec ses partenaires. Elle doit, dans la mesure du possible

- s'inscrire dans le cadre du plan de guidage,
- prendre en compte les données détaillées réelles au fur et à mesure de leur disponibilité,
- réagir aux divers aléas perturbant la production.

La non-existence d'un tel plan détaillé nécessite la remise en cause du plan à moyen terme.

Cette approche est ainsi mise en œuvre à l'aide d'une structure décisionnelle à deux niveaux basée sur une agrégation temporelle pour le niveau supérieur et un processus de planification dynamique pour le niveau inférieur comme le montre la figure 2. En effet, on peut raisonnablement envisager que des prévisions de demandes (ou de capacités de ressources) soient disponibles à moyen terme sur des macro-périodes avec une fiabilité accrue par le phénomène d'agrégation alors que leur répartition détaillée au sein des macro-périodes n'est connue et donc exploitable qu'à court terme, avec une fiabilité moindre qui exige des re-planifications partielles fréquentes. Dans ce contexte, le plan de guidage est fondamental pour assurer une certaine stabilité agrégée et l'optimalité à moyen terme du processus de planification réactif.

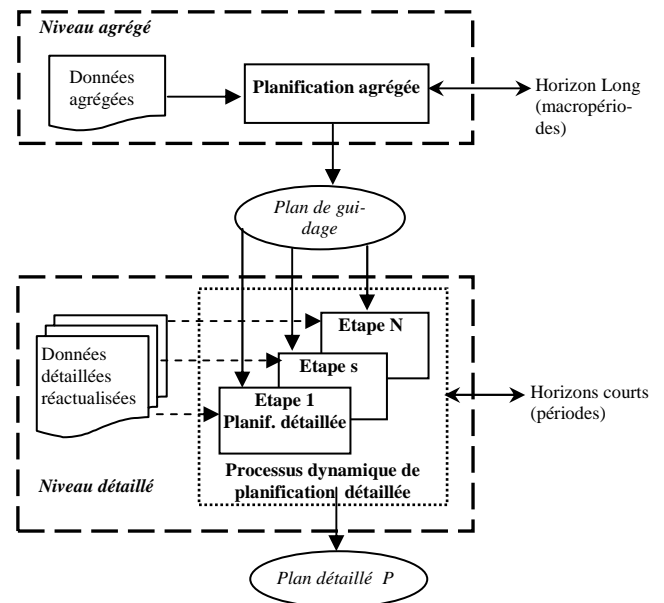


Figure 2. Structure de décision à deux niveaux

3 NIVEAU SUPERIEUR DE DECISION

3.1 Objectifs

Le niveau supérieur, appelé aussi niveau agrégé, se base sur une agrégation temporelle. En effet, ce niveau de décision effectue une planification sur un horizon composé de macro-périodes et définit un plan agrégé qui fixe les volumes de production, les capacités, etc. par macro-période de manière à satisfaire au mieux et à moindre coût, la demande prévisionnelle évaluée globa-

lement sur les macro-périodes. Ce plan s'appuie sur une vision « agrégée » du système de production et ne prend pas en compte la dynamique fine de ce système car les grandeurs temporelles qui caractérisent cette dynamique (délais de production, délais d'anticipation, horizons gelés, etc.) ne sont pas de l'ordre de grandeur des macro-périodes. Il définit des objectifs de production (stocks à atteindre en fin de macro-périodes), des ajustements globaux de capacité (heures supplémentaires allouées par macro-période, volume de production soustraité,...) et fait une évaluation des coûts nécessaires pour atteindre les objectifs fixés.

3.2 Modélisation du niveau supérieur

Le niveau décisionnel supérieur est formalisé par un programme linéaire construit à partir des données et variables suivants :

Indices et dimensions

t, i, r, o : désignent respectivement les indices relatifs à une macro-période ($t=1..T$), un produit fini ($i=1..N$), une ressource ($r=1..R$) et un composant ($o=1..O$).

Données

- D_{it} : Demande en produit i pour la macro-période t .
 CAP_{rt} : Capacité de la ressource r pendant la macro-période t .
 HM_{rt} : Volume max d'heures supplémentaires disponibles pour la ressource r pendant la macro-période t .
 SP_{i0} : Stock initial de produit i
 SC_{o0} : Stock initial de composant o
 α_{oi} : Coefficient technique de nomenclature qui exprime le nombre de composants o nécessaires pour la fabrication d'une unité de produit i .
 ω_{ir} : Quantité de ressource r nécessaire à la fabrication d'une unité de produit i .

Coûts

- $csp_{it}, csc_{ot}, ch_{rt}, cst_{it}, csf_{it}, cx_{it}, ca_{ot}$: Coûts unitaires pour la macro-période t , correspondant respectivement au stockage du produit i , au stockage du composant o , aux heures supplémentaires allouées à la ressource r , à la sous-traitance du produit i , à l'achat direct du produit i , à la fabrication du produit i et à l'achat du composant o .

Variables de décision

- X_{it} : Nombre d'unités de produit i à fabriquer en t .
 A_{ot} : Nombre d'unités du composant o approvisionnées pour livraison en t .

SF_{it} : Nombre d'unités de produit i achetées pour réception en t .

ST_{it} : Nombre d'unités du produit i à lancer en sous-traitance en t .

H_{rt} : Nombre d'heures supplémentaires utilisées sur la ressource r en t .

SP_{it} : Niveau du stock du produit i en fin de t .

SC_{ot} : Niveau du stock du composant o en fin de t .

Contraintes

$$SP_{it} = SP_{it-1} + X_{it} + ST_{it} + SF_{it} - D_{it} \quad \forall i = 1..N, \forall t = 1..T \quad (1)$$

$$SC_{ot} = SC_{ot-1} - \sum_{i=1}^N \alpha_{oi} (X_{it} + ST_{it}) + A_{ot} \quad \forall o = 1..O, \forall t = 1..T \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \omega_{ir} X_{it} \leq CAP_{rt} + H_{rt} \quad \forall r = 1..R, \forall t = 1..T \quad (3)$$

$$H_{rt} \leq HM_{rt} \quad \forall r = 1..R, \forall t = 1..T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{oi} (X_{it} + ST_{it}) \leq SC_{ot-1} \quad \forall o = 1..O, \forall t = 1..T \quad (5)$$

$$X_{it}, SF_{it}, ST_{it}, SP_{it} \geq 0 \quad \forall i = 1..N, \forall t = 1..T \quad (6)$$

$$A_{ot}, SC_{ot}, H_{rt} \geq 0 \quad \forall o = 1..O, \forall t = 1..T \quad (7)$$

Critère

$$\min \left[\sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (csp_{it} \cdot SP_{it} + csf_{it} \cdot SF_{it} + cx_{it} \cdot X_{it} + cst_{it} \cdot ST_{it}) + \sum_{o=1}^O ca_{ot} \cdot A_{ot} + csc_{ot} \cdot SC_{ot} + \sum_{r=1}^R ch_{rt} \cdot H_{rt} \right] \right] \quad (8)$$

Les contraintes (1) et (2) garantissent respectivement la conservation des stocks de produits finis et de composants. La contrainte (3) permet de vérifier que dans chaque macro-période, la capacité disponible de toute ressource augmentée des heures supplémentaires qui lui sont affectées est compatible avec la charge globale de production que doit assurer cette ressource. De même, le volume d'heures supplémentaires affectées à une ressource pendant une macro-période, ne doit pas dépasser la valeur maximale autorisée comme l'exprime la contrainte (4). La contrainte (5) limite le volume de la production interne et externe (sous-traitance) planifié pour une macro-période t en fonction du stock de composant disponible à la fin de la macro-période $t-1$. Le domaine des variables de décision est défini par les contraintes (6) et (7). La fonction objectif (8) formalise les préférences du producteur qui souhaite planifier sa production avec un coût minimal.

3.3 Plan de guidage et interactions entre les deux niveaux décisionnels

Le niveau agrégé établit un plan agrégé qui émane de la résolution du modèle agrégé. Ce plan agrégé doit être suivi par le niveau détaillé. Pour assurer cette action, le niveau agrégé doit transmettre au niveau détaillé un ensemble d'informations. Les informations ainsi transmises constituent ce que nous appelons le **Plan de Guidage (PG)**. Le plan de guidage est défini comme *l'ensemble des informations extraites du plan agrégé (décisions agrégées et/ou grandeurs établies à partir du plan agrégé) concernant la totalité ou une partie de l'horizon agrégé, et considérées comme une «trajectoire» que le niveau détaillé doit suivre au mieux au cours de l'élaboration de sa propre planification.*

Comme déjà indiqué dans le paragraphe 2.2, ce plan peut prendre différentes formes selon la politique de guidage plus ou moins contraignante souhaitée (guidage par les volumes de production, guidage par les stocks, guidage par le coût du plan, guidages combinés, etc.). Dans ce travail, nous proposons un plan de guidage PG restreint à un horizon détaillé constitué de TD macro-périodes. Il est constitué de deux classes d'informations. La première classe à caractère « technique » est constituée par des décisions agrégées qui fixent les niveaux de stocks de produits finis SP_{it} et les volumes d'heures supplémentaires H_{rt} (par macro-périodes), informations directement issues de la planification agrégée. La deuxième classe à caractère « économique » correspond aux coûts du plan agrégé sur chaque macro-période et aux tolérances admises sur ces coûts. Les coûts notés CO_t sont établis à partir des caractéristiques de la planification agrégée. Les grandeurs mc_t fixent l'écart admissible entre les coûts du plan agrégé et du plan détaillé par macro-période (en pourcentage), définissant ainsi une forme d'autonomie pour le niveau détaillé.

$$PG = \{SP_{it}, H_{rt}, CO_t, mc_t \mid i=1..N, r=1..R, t=1..TD\}$$

avec :

$$CO_t = \sum_{i=1}^N (csp_{it} \times SP_{it} + csf_{it} \times SF_{it} + cst_{it} \times ST_{it} + cx_{it} \times X_{it}) + \sum_{o=1}^O (csc_{ot} \times SC_{ot} + ca_{ot} \times A_{ot}) + \sum_{r=1}^R ch_{rt} \times H_{rt}$$

Les informations contenues dans le plan de guidage peuvent être considérées au niveau détaillé comme des *objectifs à atteindre* ou comme *des contraintes* à respecter. Dans le cadre de ce travail, les niveaux de stocks en produits finis sont interprétés comme des objectifs à atteindre. La planification détaillée cherchera donc à minimiser l'écart entre stocks détaillés et stocks agrégés de fin de macro-périodes dans l'horizon de guidage considéré. Les volumes d'heures supplémentaires et les coûts du plan sont des contraintes que le niveau détaillé devra respecter globalement pour chaque macro-période. Une flexibilité supplémentaire est accordée au niveau détaillé par l'intermédiaire de la marge sur les

coûts représentée par m_{ct} . Ainsi, à travers ce type de guidage, le niveau détaillé cherche à suivre au mieux, malgré les perturbations et incertitudes diverses, la « trajectoire » définie à moyen terme en restant dans le cadre des coûts globaux évalués aussi à moyen terme. Cette philosophie de prise en compte du coût d'un plan est proche de celle développée par (Lamour, 2006) et (Genin et al., 2007).

4 NIVEAU INFÉRIEUR DE DECISION

4.1 Objectifs

Le niveau inférieur « affine » le plan agrégé sur un horizon détaillé plus court que l'horizon agrégé en s'appuyant sur une vision plus fine des données. Cependant, la planification détaillée doit se faire en cohérence avec la planification agrégée en assurant le respect des objectifs et des coûts globaux transmis via le plan de guidage. Le niveau détaillé doit de plus, prendre en compte des caractéristiques dynamiques (délais) fondamentales pour une modélisation fine du processus de production. Il doit également prendre en compte les données détaillées au fur et à mesure de leurs disponibilités. Ainsi il peut absorber lorsque c'est possible, les aléas qui perturbent le système ou provoquer une remise en cause de la planification agrégée si les objectifs agrégés ne peuvent être atteints dans les conditions de coûts prévues. Pour cela, le niveau inférieur travaille avec une granularité temporelle plus fine que celle du niveau supérieur. Ainsi, chaque macro-période t est décomposée en k périodes élémentaires τ .

4.2 Caractéristiques dynamiques du niveau détaillé

Le niveau inférieur effectue une planification détaillée selon un processus dynamique qui consiste à réaliser une suite de planifications périodiques de périodicité PR . A chaque étape de planification s , le niveau détaillé planifie sa production sur un horizon $HP^s = [\theta^s, \theta^s]$ qui se rétrécit d'une étape à une autre (la période de début θ^s augmente à chaque étape s alors que la période de fin θ^s est toujours fixe et correspond à la dernière période élémentaire du plan de guidage). Il effectue aussi une réactualisation des informations déjà disponibles lors des planifications précédentes, ce qui permet de réagir à d'éventuelles perturbations. Cependant, à une étape de planification donnée, une décision relative à une période détaillée τ ne peut pas être modifiée de manière instantanée. Il faut que la modification ait été suffisamment anticipée pour qu'elle puisse être applicable à une telle période. Cette notion de délai d'anticipation, noté DA , reflète la réalité industrielle. Ce délai est variable selon la nature de la décision à modifier. Dans notre travail, une décision de peut correspondre à une décision de production, d'approvisionnement en composant, de sous-traitance, de commande directe de produits finis ou d'allocation d'heures supplémentaires. Ainsi, une décision de ayant un délai d'anticipation DA_{de} prévue pour être mise en œuvre dans une période τ ne peut être

modifiée à la période s que si $s \leq \tau - DA_{de}$. La prise en compte de ces délais d'anticipation nous amène à préciser que, à chaque étape de planification s , et pour chaque type de décision de , l'horizon de planification est décomposé en deux sous-horizons:

- Un sous-horizon gelé noté HG_{de}^s dans lequel les décisions de prises à l'étape de planification précédente ne peuvent être modifiées et sont donc reportées sans modification.
- Un sous-horizon libre dans lequel les décisions peuvent être modifiées pour réagir aux perturbations et/ou modification de données.

De plus, le niveau détaillé prend en compte les délais associés au processus de production : délais de fabrication et d'approvisionnement.

En respectant tous les aspects dynamiques déjà mentionnés, le niveau détaillé se base sur les données du plan de guidage afin de réaliser une planification détaillée qui suive au mieux la planification agrégée.

4.3 Modèle de planification M^s

M^s est le modèle de planification utilisé à l'étape de planification s du niveau détaillé.

Indices et dimensions

τ, i, r, o : désignent respectivement les indices relatifs à une période élémentaire ($t=1..k \times TD$), un produit fini ($i=1..N$), une ressource ($r=1..R$) et un composant ($o=1..O$).

Horizons

PR : périodicité de replanification détaillée

HP^s : horizon de planification détaillé à l'étape s

Avec $HP^s = [\theta^s, \theta^f]$

$$\theta^s = 1 + (s-1)PR$$

et $\theta^f = k \times TD$

DA_{de} : délai d'anticipation de la décision de

HG_{de}^s : horizon de planification gelé pour la décision de à l'étape de planification s

$$HG_{de}^s = [\theta^s, \min(\theta^s + (DA_{de} - 1), \theta^f)]$$

Données statiques (indépendantes de l'étape de planification s)

$hm_{r\tau}$: volant max d'heures supplémentaires pour la ressource r pendant la période élémentaire τ

α_{oi} : coefficient technique de nomenclature

$\omega_{r\tau}$: quantité de ressource r consommée pour la fabrication d'une unité du produit i .

df_i, ds_i, dsf_i : délais respectifs de fabrication, de sous-traitance ou d'achat direct d'un produit i .

$csp_{i\tau}, csc_{o\tau}, ch_{r\tau}, cst_{i\tau}, csf_{i\tau}, ca_{io\tau}, cx_{i\tau}$: coûts unitaires en τ correspondant respectivement au stockage du produit i et du composant o , aux heures supplémentaires, à la sous-traitance du produit i , à l'achat du produit i et du composant o et à la fabrication du produit i .
 mc_i : marge de dépassement du coût total de production.

Données dynamiques (actualisées à chaque étape de planification s):

$sp_{i\theta^s-1}^s, sc_{o\theta^s-1}^s$: stocks initiaux de produit i et de composant o à l'étape de planification s .

$d_{i\tau}^s$: demande en produit i pour la période τ

$cap_{r\tau}^s$: capacité de la ressource r en période τ .

$\bar{h}_{r\tau}^s$: heures supplémentaires affectées à la ressource r en période τ par les planifications antérieures à l'étape s . $\bar{h}_{r\tau}^s$ est donc connu pour toutes les périodes $\tau < \theta^s$ (décisions antérieures implémentées).

\overline{co}_{τ}^s : coût des décisions relatives à la période τ ($\tau < \theta^s$) établi lors des planifications antérieures à celle de l'étape s (coût des décisions déjà implémentées)

Données issues du plan de guidage

SP_{it} : stocks de produits i à atteindre en fin de macro-période t

H_{rt} : volant d'heures supplémentaires allouées à la ressource r en macro-période t

CO_t : coût alloué aux décisions de la macro-période t

mc_t : écart autorisé entre le coût des décisions relatives à la macro-période t défini par le niveau supérieur et le coût des décisions relatives à cette même macro-période prises par le niveau inférieur

Variables de décision (définies à l'étape s)

$x_{i\tau}^s$: nombre de produits i à fabriquer en τ

$a_{o\tau}^s$: nombre de composants o commandés pour τ

$st_{i\tau}^s$: nombre de produits i à sous-traiter en τ

$sf_{i\tau}^s$: nombre de produits i à acheter pour réception en τ

$h_{r\tau}^s$: nombre d'heures supplémentaires affectées à la ressource r en τ

$sp_{i\tau}^s(sc_{o\tau})$: niveau du stock du produit i (du composant o) en fin de τ

co_{τ}^s : coût des décisions relatives à la période τ

$\Delta s_{i\tau-k}^+, \Delta s_{i\tau-k}^-$: écarts (surplus ou manque) entre stocks agrégés et stocks détaillés en fin de ma-

cro-période t (ou fin de période élémentaire $t \times k$). Ces variables matérialisent le suivi des objectifs fixés par le plan de guidage.

On peut distinguer dans le modèle détaillé différents groupes de contraintes :

- les contraintes liées à l'évolution des stocks et aux limites de capacités

$$sp_{i\tau}^s = sp_{i\tau-1}^s + x_{i\tau-df_i}^s + st_{i\tau-ds_i}^s + sf_{i\tau-dsf_i}^s - d_{i\tau}^s \quad \forall i = 1..N, \forall \tau \in HP^s \quad (9)$$

$$sc_{o\tau}^s = sc_{o\tau-1}^s - \sum_{i=1}^N \alpha_{oi} (x_{i\tau}^s + st_{i\tau}^s) + a_{o\tau}^s \quad \forall o = 1..O, \forall \tau \in HP^s \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N \omega_{ir} x_{i\tau}^s \leq cap_{r\tau}^s + h_{r\tau}^s \quad \forall i = 1..N, \forall \tau \in HP^s \quad (11)$$

$$h_{r\tau}^s \leq hm_{r\tau} \quad \forall r = 1..R, \forall \tau \in HP^s \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_{oi} (x_{i\tau}^s + st_{i\tau}^s) \leq sc_{o\tau-1}^s \quad \forall o = 1..O, \forall \tau \in HP^s \quad (13)$$

- les contraintes assurant la non-modification des décisions sur leur horizon gelé spécifique

$$x_{i\tau}^s = x_{i\tau-1}^s \quad \forall i = 1..N, \forall \tau \in HG_x^s \quad (14)$$

$$st_{i\tau}^s = st_{i\tau-1}^s \quad \forall i = 1..N, \forall \tau \in HG_{st}^s \quad (15)$$

$$sf_{i\tau}^s = sf_{i\tau-1}^s \quad \forall i = 1..N, \forall \tau \in HG_{sf}^s \quad (16)$$

$$a_{o\tau}^s = a_{o\tau-1}^s \quad \forall o = 1..O, \forall \tau \in HG_a^s \quad (17)$$

$$h_{r\tau}^s = h_{r\tau-1}^s \quad \forall r = 1..R, \forall \tau \in HG_h^s \quad (18)$$

- les contraintes assurant le respect du plan de guidage

* pour $t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil$ (macro-période en cours)

$$\sum_{\tau=\theta^s}^{t \times k} h_{r\tau}^s \leq H_{rt} - \sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{\theta^s - 1} h_{r\tau}^s \quad (19)$$

$$\sum_{\tau=\theta^s}^{t \times k} co_{\tau}^s \leq CO_t \times (1 + mc_t) - \sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{\theta^s - 1} co_{\tau}^s \quad (20)$$

* pour $\forall t = \left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil + 1..TD$ (macro-périodes suivantes)

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{t \times k} h_{r\tau}^s \leq H_{rt} \quad (21)$$

$$\sum_{\tau=(t-1) \times k + 1}^{t \times k} co_{\tau}^s \leq CO_t \times (1 + mc_t) \quad (22)$$

$$co_{\tau}^s = \sum_{i=1}^N \left(csp_{i\tau} \times sp_{i\tau}^s + csf_{i\tau} \times sf_{i\tau}^s + cst_{i\tau} \times st_{i\tau}^s + cx_{i\tau} \times x_{i\tau}^s \right) + \sum_{o=1}^O (csc_{o\tau} \times sc_{o\tau}^s + ca_{o\tau} \times a_{o\tau}^s) + \sum_{r=1}^R ch_{r\tau} \times h_{r\tau}^s \quad (23)$$

- les contraintes permettant de mesurer l'écart par rapport au plan de guidage

$$sp_{i,t,k}^s - SP_{it} = \Delta s_{i,t,k}^{+s} - \Delta s_{i,t,k}^{-s} \quad \forall t = 1..TD \quad (24)$$

- les contraintes de positivité des variables

$$sp_{i\tau}^s, sf_{i\tau}^s, st_{i\tau}^s, sx_{i\tau}, h_{r\tau}, a_{o\tau}, sc_{o\tau} \geq 0 \quad \forall i, \forall o, \forall r, \forall \tau$$

$$\Delta_{i,t,k}^{+s}, \Delta_{i,t,k}^{-s} \geq 0 \quad \forall i, \forall t = 1..TD$$

Le critère retenu se présente comme suit :

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=\left\lceil \frac{\theta^s}{k} \right\rceil}^{TD} (\Delta_{i,t,k}^{+s} + \Delta_{i,t,k}^{-s}) \quad (25)$$

Les contraintes (9) et (10) formalisent respectivement la conservation des stocks de produits finis et de composants. La contrainte (11) permet de vérifier dans chaque période détaillée, qu'on ne dépasse pas la capacité d'une ressource augmentée des heures supplémentaires qui lui sont affectées. Le respect du volume maximal des heures supplémentaires affectées à une ressource, pendant une période détaillée est exprimé par la contrainte (12). La contrainte (13) limite le volume de la production interne et externe (sous-traitance) planifié pour une période τ en fonction du stock de composant disponible à la fin de la période $\tau-1$. Les contraintes (14) à (18) formalisent le respect de l'horizon gelé de chaque type de décision entre deux planifications successives. Les contraintes (19) et (21) examinent si le volume agrégé d'heures supplémentaires prévu pour une macro-période t n'est pas dépassé par la somme des heures supplémentaires utilisées dans les périodes élémentaires qui constituent la période agrégée t . La contrainte (19) relative à la macro-période en cours prend en compte les heures déjà affectées par les planifications précédentes. La contrainte (21) est associée aux autres macro-périodes de l'horizon détaillé. De manière analogue, les contraintes (20) et (22) vérifient le respect du coût global prévu par le niveau agrégé pour chaque macro-période tout en acceptant une marge de dépassement mc_t (contrainte 20 pour la macro-période en cours et contrainte 21 pour les autres macro-périodes). La contrainte (23) permet d'évaluer le coût total des décisions d'une période élémentaire. La contrainte (24) calcule l'écart entre les objectifs de stock fixés par le plan de guidage et les stocks prévus par la planification détaillée. La fonction objectif (25) formalise l'objectif du niveau détaillé qui cherche à minimiser ces écarts.

La figure 3 illustre le processus dynamique de planification sur un horizon agrégé de 2 macro-périodes composées chacune de 3 périodes détaillées. La périodicité de planification détaillée est de 2 périodes. Dans cet exemple volontairement simplifié, les horizons gelés sont de 3 périodes.

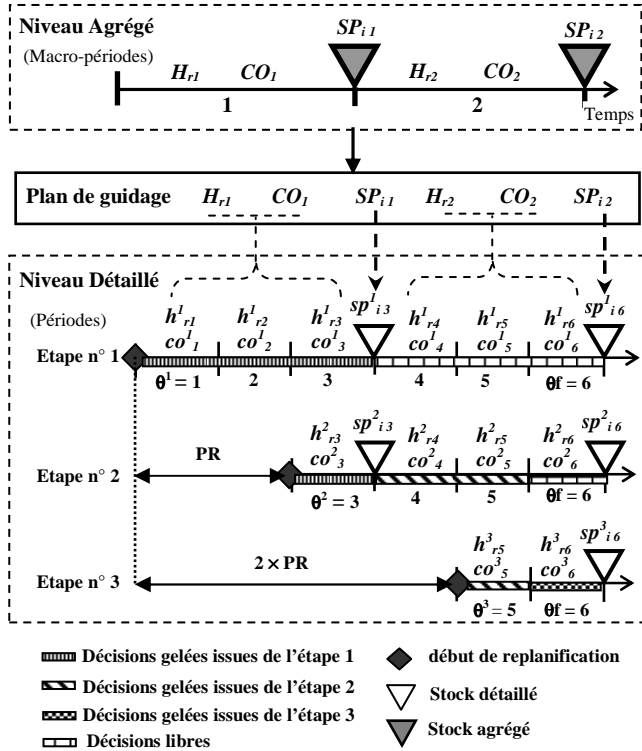


Figure 3. Processus dynamique de planification détaillée

5 SIMULATION ET EXPERIMENTATIONS

La structure de planification à deux niveaux que nous avons présentée, constitue un support intéressant d'aide à la décision pour la planification d'une entité au sein d'une chaîne logistique face à différents types d'incertitudes. Il est donc fondamental d'en simuler le fonctionnement avec différents scénarii de manière à en évaluer les performances.

Principe de la simulation

La simulation s'appuie sur les démarches développées dans (Galasso, 2007) et (Génin et al., 2007). Dans le cadre de cette approche, elle se déroule en deux phases. La première phase consiste à résoudre le problème de planification avec des données agrégées pour obtenir un plan agrégé optimal. A partir de ce plan agrégé, nous construisons le plan de guidage *PG*. La deuxième phase a pour objectif de simuler le comportement dynamique de la planification à horizon glissant et de l'opération de suivi du plan de guidage élaboré au cours de la première phase. Ainsi, les décisions relatives à chaque étape *s* sont obtenues en résolvant le modèle associé M^s . Les

paramètres dynamiques sont actualisés à chaque étape de planification. L'incertitude sur ces paramètres dynamiques (demandes, capacités) est alors simulée par tirages aléatoires de biais qui modifient éventuellement les paramètres utilisés à l'étape précédente (cf. démarche de (Genin et al, 2007)). Le plan qui résulte d'une étape de planification est utilisé pour générer les décisions nécessaires à l'étape de planification suivante. A la fin de la simulation, les décisions réellement implémentées à chaque étape sont collectées dans le but de construire le plan réellement appliqué P^f dont on peut alors apprécier les performances à l'aide de différents indicateurs (suivi du plan de guidage, écarts de coûts, stabilité, etc.). La simulation est en cours de développement. L'implémentation des modèles se fait à l'aide d'un couplage entre le Langage JAVA et les bibliothèques d'optimisation linéaires offertes par le solveur commercial Cplex 9.0 d'ILOG.

Expérimentations

Elles permettent d'analyser le déroulement de tout le processus dynamique de planification avec différents scénarii. L'expérimentation sera menée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les performances de la structure seront étudiées pour différents types de perturbations pouvant agir sur les données (demandes clients, capacités des ressources, délais, coûts ...) ou sur l'état du système (niveau de stocks, ...). On se focalisera d'abord sur l'analyse des aléas de la demande courante et prévisionnelle de manière à situer l'approche par rapport à d'autres études menées dans le domaine. Les aléas sur les autres paramètres seront ensuite mis en œuvre. Dans un deuxième temps, on cherchera à apprécier la réactivité d'une telle structure en fonction de l'autonomie donnée au niveau inférieur et caractérisée par les marges de dépassement de coûts (mc) introduites dans le modèle de planification détaillée. Enfin, il sera particulièrement intéressant d'appréhender l'impact de la constitution du plan de guidage (nature et volume des informations transmises) sur les propriétés de réactivité de la planification détaillée ainsi que sur l'autonomie disponible.

6 CONCLUSION

L'approche proposée dans ce papier permet d'établir la modélisation d'une structure de planification tactique d'une entité d'une chaîne logistique en intégrant les contraintes imposées par les différents partenaires. Notre approche est fondée sur une structure décisionnelle à deux niveaux. Le niveau supérieur, appelé aussi niveau agrégé, se base sur une agrégation temporelle (macro-période) de l'horizon de planification moyen terme. Il définit un plan agrégé qui fixe les différentes décisions relatives à la production et à l'ajustement de la capacité de manière à satisfaire au mieux et à moindre coût la demande prévisionnelle évaluée globalement sur des macro-périodes. Le plan agrégé obtenu doit être affiné par le niveau détaillé sur un horizon détaillé. Cette planification détaillée doit se réaliser en suivant au mieux la planification agrégée et en prenant en compte plus

finement la dynamique de la production. Afin de garantir cette action de suivi de la planification agrégée, nous avons introduit la notion de plan de guidage. Le plan de guidage contient un ensemble d'informations, extraites ou élaborées à partir du plan agrégé, qui sont transmises au niveau détaillé. Le niveau inférieur peut ainsi effectuer le suivi du plan de guidage en minimisant les écarts qui peuvent apparaître entre les objectifs représentés par le plan de guidage et les objectifs associés à sa propre planification. Dans le but de favoriser la réactivité face aux perturbations, nous avons élaboré un processus dynamique de planification détaillée. Ce processus dynamique consiste à réaliser une suite de planifications. A chaque replanification, le niveau détaillé effectue une réactualisation des informations déjà disponibles lors des planifications précédentes et une prise en compte de nouvelles informations au fur et à mesure de leur disponibilité. Ceci permet de détecter d'éventuelles perturbations et de réagir en conséquence. Diverses perspectives de recherches peuvent être envisagées. La principale concerne l'étude de la constitution du plan de guidage par des volumes plus ou moins importants d'informations afin d'étudier les relations : optimisation globale – réactivité - autonomie, notions fondamentales dans le pilotage de chaînes logistiques. Il pourra être également intéressant de modéliser explicitement différentes formes d'incertitude comme par exemple dans l'expression de la demande du client, dans la prise en compte de variations de la capacité interne réelle de production, etc. , ceci ayant pour objectif de renforcer la réactivité et également la caractérisation de l'autonomie dans les structures complexes de planification de chaînes logistiques.

7 REFERENCES

- Croom S., P. Romano, and M. Giannakis, 2000. Supply chain management : an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6, p. 67-83.
- Escudero L. F., E. Galindo, G. García, E. Gomez, and V. Sabau, 1999. Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 119, p. 14-34.
- Fargier H., and C. Thierry, 2000. The use of possibilistic decision theory in manufacturing planning and control : recent results in Fuzzy Master Production Scheduling. *Advances in Scheduling and Sequencing under fuzziness*. Spingler-Verlag, p. 45-49.
- François J., J. C. Deschamps, G. Fontan, J. P. Bourrières, 2005. Assessing the impact of control architectures on supply chain performances. *4th International Workshop on Performance Measurement*, Bordeaux, France, 9p.
- Galasso F., 2007. *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*. Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse.
- Galasso F., C. Mercé and B. Grabot, 2006. Decision support for supply chain planning simulation under uncertainty. *Proceeding from the 12th IFAC International Symposium Information Control Problems in Manufacturing (INCOM)*, St-Etienne, France, vol 3, p.233-238.
- Genin P., 2003. *Planification tactique robuste avec usage d'un A.P.S. Proposition d'un modèle de gestion par plan de référence*. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Genin P., A. Thomas, and S. Lamouri, 2007. How to manage robust tactical planning with an APS. *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, p.209-221.
- Grabot B., L. Geneste, G. Reyonso Castillo, and S. Verot, 2005. Integration of uncertain and imprecise orders in the MRP II method. *International Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(2).
- Ho C. J., W. K. Law, and R. Rampal, 1995. Uncertainty-dampening methods for reducing MRP system nervousness. *International Journal of Production Research*, 33(2), p.483-496.
- Lamouri S., 2006. *Synchronisation des prises de décision dans une chaîne logistique : robustesse et stabilité*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, France.
- Leung S. C. H., S. O. S. Tsang, W. L. Ng, and Y. Wu, 2005. A robust optimization model, for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 181, p. 224-238.
- Mahmoudi J., 2006. *Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques : application au secteur de l'électronique et des télécommunications*. Thèse de doctorat, Sup'aero, Toulouse.
- Mercé C., et G. Fontan, 2001. *Hiérarchisation de la fonction planification*. Organisation et gestion de la production. Hermès Science, Chapitre 3, p. 69-112.
- Tan C.K., 2001. A framework of supply chain management literature. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 7, p. 39-48.
- Tayur S. and R. Ganeshan, 2002. *Quantitative models for supply chain management*, Kluwer Academic publishers.

Telle O., 2003. *Gestion de chaînes logistiques dans le domaine aéronautique : aide à la coopération au sein d'une relation donneur d'ordres-fournisseur*. Thèse de doctorat, Sup'aero, Toulouse.

Thierry C., 2003. *Gestion de chaînes logistiques: Modèles et mise en œuvre pour l'aide à la décision à moyen terme*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Toulouse II, France.

Zhao X., and J. Xie, 1998. Multilevel lot-sizing heuristics and freezing the master production schedule in material requirements planning systems. *Production Planning and Control*, 9(4), p.371-384.