AIDE À LA PLANIFICATION AVEC INCERTITUDE, IMPRÉCISION ET INCOMPLÉTUDE SUR LA DEMANDE

François GALASSO

LAAS-CNRS, Université de TOULOUSE
7 avenue du Colonel ROCHE
31077 Toulouse Cedex 4
galasso@univ-tlse2.fr

Caroline THIERRY

Université de TOULOUSE, IRIT
5 allées Antonio MACHADO
31058 TOULOUSE
thierry@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ : *La prise en compte de la demande client pour la planification tactique dans les chaînes logistiques est un enjeu crucial pour leur bon fonctionnement. L'environnement concurrentiel actuel rend difficile l'engagement des clients sur le moyen terme. Dès lors, il est nécessaire de développer des méthodes et outils pour s'adapter au mieux à une demande fluctuante. Dans ce contexte, cet article s'attache à appliquer à la gestion de la demande une terminologie issue de la théorie de la décision sous incertitude. Les liens entre cette terminologie et une approche industrielle basée sur la notion de risques sont présentés. Ensuite, un outil de simulation orienté sur la relation client-fournisseur est présenté. Cet outil a pour objectif d'évaluer, grâce à un ensemble de critères d'aide à la décision dont l'application est rendue possible par la démarche étymologique initiale, de guider un décideur sur ses choix en matière de planification. Cette orientation est basée à la fois sur une évaluation des gains possibles suite à l'application d'une stratégie de planification donnée mais aussi au degré d'optimisme associé au sens du critère d'Hurwicz.*

MOTS-CLÉS : *simulation, horizon glissant, planification, risques*

1. INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la mise en place de processus coopératifs au sein de chaînes logistiques est au centre des préoccupations des industriels. Pourtant au sein des chaînes logistiques du secteur aéronautique, on constate une gestion essentiellement basée sur des relations point-à-point entre entités indépendantes utilisant un partage partiel de l'information (François et Galasso, 2005). Cela s'explique par la maturité inégale des entreprises pour initier des processus de collaboration. Dans le contexte particulier des PMEs, chaque entreprise possède notamment une vision limitée de la chaîne et manque parfois d'outils efficaces pour savoir comment analyser et intégrer les informations imparfaites transmises par les grands donneurs d'ordres. Cela pose un double problème de (1) prise en compte de contraintes liées aux autres entreprises (i.e. intégration des prévisions fournies par leurs clients, de délais de réactions de leurs fournisseurs) et (2) de définition de conditions optimales de production en interne (i.e. ajustements de capacité, lissage de charge).

Dans cette vision globale, la bonne compréhension de la demande est l'élément primordial au bon fonctionnement à la fois des processus internes et de la partie amont de la chaîne (Bartezzaghi et Verganti, 1995). En effet, il apparaît important de pouvoir donner à l'industriel des méthodes et outils lui permettant de mieux cerner la demande client et de faciliter sa prise en compte dans le processus de planification de sa chaîne logistique.

Au niveau des processus de production, la prise en compte des imperfections sur la demande du client peut être envisagée par l'introduction de marges dans la planification (i.e. stocks de sécurité, coefficients de rebuts…) mais aussi au niveau des processus de gestion de la demande (Galasso, 2007). Ces processus permettent à l'entreprise de se prémunir contre les variations de la demande. En revanche, elles génèrent souvent des niveaux de stocks importants.

Dans le cadre de cet article, l'objectif recherché consiste à donner à l'industriel (le fournisseur) des moyens d'appréhender la demande imparfaite du client compte tenu de ses capacités de réaction. Pour cela nous proposons une évaluation des risques basée sur une approche par simulation du processus de planification au sein de la relation client fournisseur. Plus spécifiquement, nous nous intéressons à l'impact de différentes politiques de gestion de la demande client dans le processus de planification.

Après avoir présenté le système étudié et la problématique abordée (§2) nous proposons un état de l'art (§3) sur la planification de la production sous incertitude au sein des chaînes logistiques. Nous décrivons ensuite les incertitudes sur la demande ainsi que l'approche par simulation proposée pour évaluer les risques liés au choix de la stratégie de gestion de la demande (§4). Enfin, nous illustrons la méthodologie proposée sur un exemple (§5).

2. SYSTEME ETUDIE ET PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à une relation dyadique dans une chaîne logistique entre un fournisseur (PME) et un client.

Nous nous situons dans un contexte (cf. figure 1) où le client transmet au fournisseur des demandes qui peuvent être fermes et prévisionnelles. En effet dans son processus de planification le client met en place un horizon gelé (dans lequel les décisions de production ne sont pas remises en cause). Cet horizon gelé lui permet de transmettre à son fournisseur des demandes fermes sur cet horizon. Les *demandes fermes* se rapportent aux périodes proches de l'instant courant et sont définies sur un horizon temporel donné, appelé horizon ferme (HF), qui marque la limite temporelle jusqu'à laquelle le client assure que ses demandes n'évolueront pas. Au-delà de cet horizon les décisions de production peuvent être remises en causes mais le client peut s'engager à ce que ces variations se situent dans un intervalle exprimé en pourcentage de la demande. Cet intervalle est fixé avec le fournisseur : on parle de *demandes prévisionnelles ou flexibles*. Ces demandes flexibles sont établies sur un horizon flexible (HL). Elles fournissent à la fois une valeur provisoire de la demande et un intervalle de flexibilité dans lequel cette valeur est susceptible d'évoluer. Cette flexibilité s'exprime pour chaque période et est définie sur le long terme par contrat entre une entreprise et ses clients ou fournisseurs. Les valeurs maximales et minimales de la demande constituent les bornes de l'intervalle de flexibilité associées aux demandes flexibles auxquelles nous ferons référence par la suite. Les demandes fermes et flexibles sont transmises au fournisseur avec une périodicité donnée.

Nous considérons par ailleurs que pour la *planification en interne* à un instant donné, le fournisseur utilise une procédure d'optimisation utilisant un modèle ad hoc via un *APS* (Advanced Planning System) que nous ne remettons pas en cause.

Pour générer un plan, l'APS traite des données déterministes. Il est donc nécessaire de traiter les demandes flexibles qui sont transmises par le client sous la forme d'une valeur et d'un intervalle de flexibilité. C'est le processus de gestion de la demande qui effectuera ce traitement. Plusieurs types de comportement peuvent être envisagés selon le degré de connaissance que le fournisseur a du comportement de son client (par exemple : tendance à la surestimation ou à la sous-estimation).

Dans ce contexte, notre objectif, dans cet article, est d'aider le décideur à déterminer comment la demande prévisionnelle en provenance du client doit être prise en compte dans la planification. Nous nous intéressons donc au processus de planification de la production sous incertitude au sein de la chaîne logistique dyadique considérée. Pour cela, nous proposons une approche par simulation qui permet au décideur d'évaluer les risques liés à ce processus de gestion de la demande en envisageant différents scénarios.

3. ETAT DE L'ART

La littérature concernant la planification de la production sous incertitude au sein de chaînes logistiques est abondante.

De manière générale et d'un point de vue industriel, la notion de décision sous incertitude n'est pas explicitement évoquée : c'est la notion de gestion des risques qui est affichée. Il est pourtant indéniable que ces deux concepts « *incertitude* » et « *risque* » sont intimement liés même s'il est parfois difficile de faire le lien entre eux. La gestion des risques, notamment en gestion de la chaîne logistique, apparaît comme un enjeu industriel important. Pourtant, on peut noter (Ziegenbein et Nienhaus, 2004, Brindley, 2004) que les travaux académiques qui s'affichent explicitement dans ce domaine sont très peu nombreux même si on note un intérêt croissant pour cette problématique depuis ces toutes dernières années.

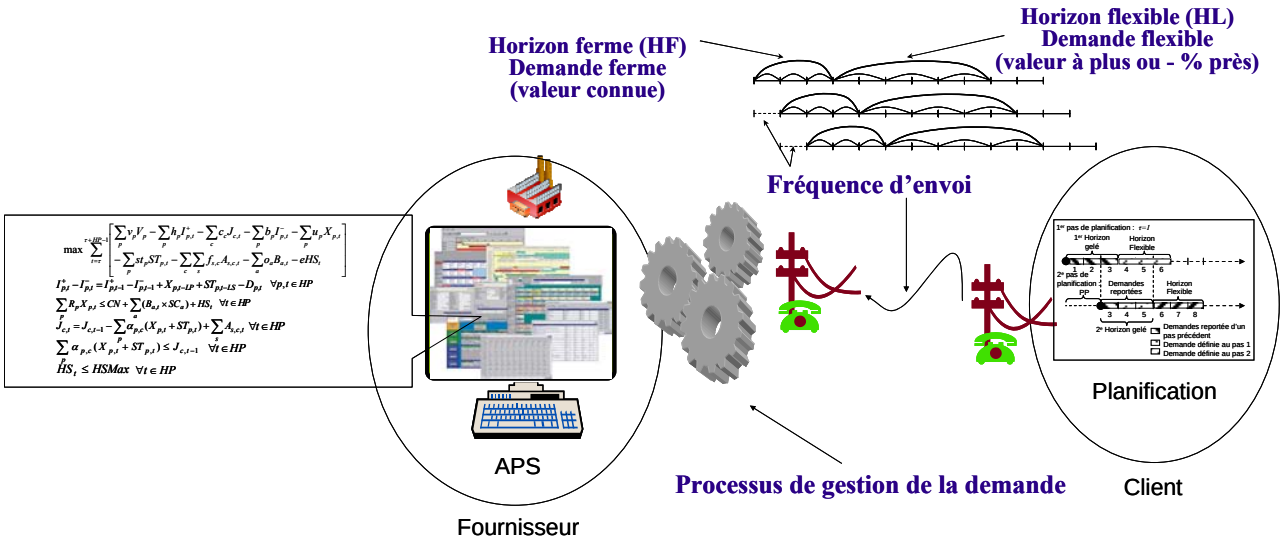


Figure 1. Positionnement de l'étude

D'un point de vue académique, la clarification des définitions, des cadres de classification et des modèles est au centre des préoccupations actuelles ((Brindley, 2004), (Tang, 2006)). (Holton, 2004) situe les deux concepts en précisant que le risque comporte deux composantes essentielles : l'exposition et l'incertitude. Il définit donc le risque comme l'exposition à une proposition (i.e. un fait) incertaine. Par ailleurs, du point de vue de la théorie de la décision, la distinction est plutôt faite entre « décision sous risque » et « décision sous incertitude » selon la connaissance sur les occurrences des différents états de la nature : on parlera alors de décision sous risque lorsqu'on peut associer des probabilités à ces occurrences et de décision sous incertitude lorsque ce n'est pas possible (Lang, 2003).

Dans le cadre d'un processus de décision sous incertitude, on est amené à manipuler des connaissances imparfaites. Parmi ces imperfections (Bouchon-Meunier, 1995) distingue notamment : les incertitudes, les imprécisions et l'incomplétude de ces connaissances. L'*incertitude* concerne « le doute quant à la validité de la connaissance » ou le fait de ne pas savoir si une proposition est vraie ou pas (exemple : « Je crois mais ce n'est pas sur » …). L'*imprécision* concerne la « difficulté dans l'énoncé de la connaissance ». Il peut s'agir d'une connaissance exprimée en langage naturel de manière vague (exemple : « c'est important »…) ou d'une connaissance numérique mal connue en raison, par exemple, d'une mesure de l'information imprécise (exemple : « cette valeur est comprise entre x et y » ou « cette valeur est peut-être x, y ou z ». L'*incomplétude* porte sur « l'absence de connaissances ou sur des connaissances partielles sur certaines caractéristiques du système ».
De nombreux critères ont par ailleurs été proposés pour classifier de manière plus fine les différents types d'incertitudes (Teixidor, 2006). (Bräutigam *et al.,* 2003) distinguent notamment deux types d'incertitudes : les incertitudes endogènes (spécifiques à l'entreprise ou au système étudié) et les incertitudes exogènes (extérieures à l'entreprise ou au système).
Plus précisément dans le contexte de la chaîne logistique, (Ritchie *et al.,* 2004) proposent un cadre dit de contingence qui comporte 4 dimensions : les caractéristiques contextuelles, le contexte de la chaîne logistique, le système de décision (niveau de décision, type de décision, disponibilité de l'information,…), l'humain (comportement face au risque). L'imperfection des connaissances sur un système peut être due à l'obtention de ces connaissances ou à une flexibilité inhérente au système.
En ce qui concerne les modèles pour la planification de production sous incertitude, (Mula *et al.,* 2006) ont proposé récemment un état de l'art très complet. Dans cet état de l'art, les auteurs distinguent les modèles conceptuels, les modèles analytiques, les modèles issus de l'intelligence artificielle et les modèles de simulation. Parmi ces derniers, nous citerons le modèle de simulation du processus de planification à horizon glissant proposé par (Rota *et al.,* 2002) très proche de notre approche qui intègre approche analytique et simulation. En effet, il s'agit d'une des premières tentatives pour évaluer l'intérêt de prendre en compte les prévisions dans le processus de planification alors que les progiciels de type APS n'en étaient qu'à leurs débuts en termes d'implantation industrielle. Aujourd'hui, avec l'essor de l'implantation de tels outils, les industriels se posent la question des risques liés à leur mise en œuvre dans le contexte de la chaîne logistique (Ritchie *et al.,* 2004). Dans ce contexte, (Génin *et al.,* 2007) proposent, par exemple, une approche pour garantir une planification robuste avec un APS. Au-delà de la planification elle-même, il devient nécessaire d'aider l'industriel à définir des processus de gestion de la demande face à des connaissances imparfaites.

4. AIDE A LA DÉCISION SOUS INCERTITUDE

Après avoir caractérisé les imperfections auxquelles est confronté le décideur en charge de la planification chez un fournisseur au sein d'une chaîne logistique, nous présentons une approche d'évaluation des risques (le mot risque est utilisé ici dans son acceptation industrielle) liés aux stratégies de gestion de la demande de ce décideur. Cette approche s'appuie sur un outil de simulation intégrant la modélisation des comportements des acteurs de la chaîne logistique considérée.

4.1. Imperfection dans les connaissances sur la demande

L'incertitude sur la demande porte sur les grandes tendances du « marché ». Ces tendances sont empreintes d'incertitude car il peut être difficile de définir si un marché sera à la hausse, à la baisse ou s'il subira une variation temporaire (un pic de demande).

Par ailleurs, les demandes flexibles sont exprimées par le client comme une connaissance imprécise. La demande à une date donnée est comprise entre deux valeurs, la borne minimale de l'intervalle de flexibilité et la borne maximale de l'intervalle de flexibilité.
Les demandes prévisionnelles transmises au fournisseur sont données sur un horizon donné. Au-delà d'une certaine date aucune demande n'est exprimée : la connaissance sur la prévision de la demande est donc incomplète.

Dans l'exemple traité dans cet article, nous considérons que l'entreprise sait qu'elle devra faire face à un pic de demande. Par contre nous considérons qu'il y a une incertitude quant à la hauteur de ce pic.

4.2. Une approche d'évaluation des risques par simulation

La problématique du fournisseur réside dans l'adoption d'une stratégie dite de gestion de la demande lui permettant de prendre en compte les demandes

transmises par le client dans son processus de planification. Ces stratégies de gestion de la demande sont confrontées selon différents scénarios de comportements du client. L'ensemble des simulations à réaliser (couples stratégies/scénarios) constitue le plan d'expériences des simulations.
Nous proposons donc de simuler l'ensemble des situations définies dans le plan d'expériences des simulations et de calculer à chaque fois l'évolution de différents indicateurs pour chaque acteur de la chaîne : niveaux de stock et de rupture de produits finis et de matières premières, capacité, production, etc. La définition d'un modèle de coût (coût élémentaire pour chaque critère et pour chaque acteur) permet d'obtenir le gain obtenu par l'application de chaque stratégie dans chacun des scénarios de marché. Ce gain peut être considéré comme représentatif, à un niveau agrégé, de l'ensemble des indicateurs. Les valeurs issues de l'indicateur de gain global permettent aux décideurs d'évaluer les risques liés aux politiques envisagées. Cependant, la meilleure politique de gestion de la demande peut être différente en fonction du scénario de demande considéré. Il faut donc pouvoir comparer les politiques non pas sur chaque scénario pris séparément mais en considérant l'ensemble des scénarios envisagés. Cela est possible grâce au choix d'un critère permettant d'agréger les indicateurs obtenus pour les différents scénarios. Dans le cadre d'un problème de décision sous incertitude comme celui étudié ici, on ne peut déterminer facilement les probabilités d'occurrence des états de la nature. L'évaluation peut être effectuée selon plusieurs critères (qui donneront potentiellement des résultats différents) : les critères de Laplace (moyenne), de Wald (évaluation pessimiste), d'Hurwicz (pondération d'optimisme), de Savage (minimisation du regret maximal), etc. Les résultats obtenus avec les différents critères peuvent être rassemblés dans un diagramme des risques à partir duquel le décideur peut asseoir son choix (Mahmoudi, 2006). Un diagramme général est présenté et détaillé en figure 2.

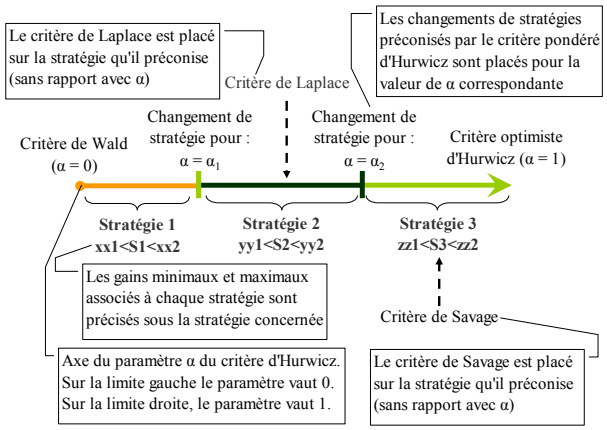


Figure 2. Diagramme des risques général

Dans ce diagramme, nous positionnons les stratégies de gestion de la demande en fonction de la propension au risque du décideur : ces stratégies sont positionnées sur un axe qui est gradué en fonction de la valeur du coefficient de pondération α du critère d'Hurwicz (comprise en 0 et 1). L'évolution de la valeur de ce critère en fonction de α pour chaque stratégie est représentée sur une courbe selon la formule du critère d'Hurwicz : $H_S(\alpha) = (1-\alpha)\ m_S + \alpha\ M_S$ (avec m_S le gain minimum et M_S le gain maximum obtenus par l'application de la stratégie S). A partir de cette courbe, nous pouvons déterminer les valeurs des points α_i de changement de stratégie. Nous positionnons ensuite les différentes stratégies sur le diagramme. Pour chaque stratégie les gains minimaux et maximaux associés sont donnés. Par ailleurs, si les stratégies représentées sont aussi préconisées par d'autres critères (Laplace et Savage), on rattache ces critères à ces stratégies dans le diagramme.

4.3. Modélisation des comportements au sein de l'outil de simulation

Pour simuler la dynamique du comportement des deux acteurs concernés, nous allons définir :

- des modèles de comportement du client qui permettent de calculer les demandes fermes et prévisionnelles transmises au fournisseur
- des modèles de comportement du fournisseur qui intègrent :
  - Le processus de gestion de la demande
  - Le processus de planification

Pour simuler la dynamique de ces comportements on utilise une méthode d'avance du temps à période fixe. Cette période correspond à la période de replanification.

4.3.1 Modélisation du comportement du client

Un modèle de l'évolution de la demande permet de simuler de manière très macroscopique le comportement du client. Ce modèle permet de calculer la demande du client à chaque pas de la simulation. Le principe est illustré sur un exemple en figure 3.

La demande prévisionnelle transmise au fournisseur est calculée à partir d'une tendance et d'un écart par rapport à cette tendance. La demande ferme est calculée en fonction de la demande prévisionnelle calculée au pas de simulation précédent : on parle d'affermissement de la demande. Lors du tout premier pas de simulation la demande est initialisée en calculant une demande prévisionnelle à partir de la tendance et de l'écart sur tout l'horizon puis le processus d'affermissement de cette demande prévisionnelle est appliqué sur l'horizon ferme.

Dans l'exemple de la figure 3, la tendance est linéaire et augmente de 5 unités produites à chaque période, l'écart est, de manière simplifiée de +/- 5 unités à chaque période. Le scénario de comportement du client modélisé est celui pour lequel le client fait toujours une surestimation de la demande au niveau prévisionnel. La demande ferme est donc calculée en prenant la borne minimum de la demande prévisionnelle transmise au pas de simulation précédent.

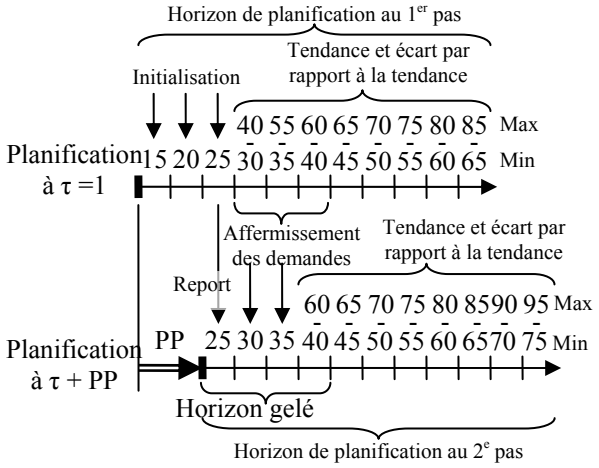


Figure 3. Modélisation du comportement du client

La demande client est notée $D^{\tau}_{p,t}$. L'imprécision sera représentée par un intervalle dont les bornes sont notées de la façon suivante :

- $\underline{D}^{\tau}_{p,t}$, qui constitue la borne inférieure de la variation tolérée sur la demande flexible,
- $\overline{D}^{\tau}_{p,t}$, qui en constitue la borne supérieure.

Les demandes seront toujours comprises dans l'intervalle des valeurs $\left[\underline{D}^{\tau}_{p,t}, \overline{D}^{\tau}_{p,t}\right]$ pour chaque produit fini *p*, période *t* et pas de planification τ et sont modélisées de la façon suivante (1) :

$$\begin{cases} D^{\tau}_{p,t}, & \forall p, \forall t \in HF^{\tau} \\ D^{\tau}_{p,t} \in \left[\underline{D}^{\tau}_{p,t}, \overline{D}^{\tau}_{p,t}\right] & \forall p, \forall t \in HL^{\tau} \end{cases} \quad (1)$$

L'évolution de la demande entre deux pas de planification successifs est formalisée par les relations suivantes :

$$D^{\tau}_{p,t} = D^{\tau-PP}_{p,t} \ \forall p \ \forall t \in \left\{HF^{\tau-PP} \cap HF^{\tau}\right\} \quad (2)$$

$$D^{\tau}_{p,t} \in \left[\underline{D}^{\tau-PP}_{p,t}, \overline{D}^{\tau-PP}_{p,t}\right] \forall p \ \forall t \in \left\{HL^{\tau-PP} \cap HF^{\tau}\right\} \quad (3)$$

$$\left[\underline{D}^{\tau}_{p,t}, \overline{D}^{\tau}_{p,t}\right] = \left[\underline{D}^{\tau-PP}_{p,t}, \overline{D}^{\tau-PP}_{p,t}\right] \forall p \ \ \forall t \in \left\{HL^{\tau-PP} \cap HL^{\tau}\right\} \quad (4)$$

L'équation (2) montre que les demandes fermes ne sont pas modifiées entre deux pas successifs de planification. Les nouvelles demandes (puisque résultant du processus de consolidation) restent cohérentes avec leurs valeurs « flexibles » précédentes (3). Les bornes de demande flexible ne changent pas entre deux pas de planification (4).

4.3.2 Modélisation du comportement du fournisseur

Le processus de *gestion de la demande du fournisseur* permet de définir la demande qui sera prise en compte au niveau de la planification, sous forme déterministe, mais en fonction de son degré d'imprécision. Ainsi, selon l'horizon considéré (i.e. ferme ou flexible), le fournisseur devra satisfaire les équations 5 et 6 :

$$\hat{D}^{\tau}_{p,t} = D^{\tau}_{p,t} \ \forall p \ \forall t \in HF^{\tau} \quad (5)$$

$$\hat{D}^{\tau}_{p,t} = f(\underline{D}^{\tau}_{p,t}, \overline{D}^{\tau}_{p,t}) \ \forall p \ \forall t \in HL^{\tau} \quad (6)$$

où $\hat{D}^{\tau}_{p,t}$ est la demande déterministe sur laquelle se base la planification. Le choix d'une valeur $\hat{D}^{\tau}_{p,t}$ est fondé sur *f*, la stratégie de gestion de la demande.

Le *comportement de planification* est modélisé comme un problème de planification en utilisant un modèle analytique linéaire en variables mixtes (implémentable avec un APS). Le modèle utilisé est basé sur celui détaillé dans (Galasso *et al.,* 2006). Ce modèle a été adapté au niveau de la fonction objectif (7) pour maximiser le gain calculé, à chaque pas de planification, sur l'ensemble de l'horizon de planification. Ce modèle générique possède les caractéristiques suivantes : multiproduits ; multicomposant ; multifournisseur ; possibilité d'ajuster les capacités en interne par l'introduction d'heures supplémentaires, de passage en 2 ou 3 huit et enfin, possibilité de sous-traiter une partie de la production.

Nous introduisons les variables de décision suivantes :

$X_{p,t}$: production interne de produits *p* à la période *t*.
$ST_{p,t}$: production sous-traitée de produits *p* à la période *t*.
HS_t : heures supplémentaires utilisées à la période *t*.
$B_{a,t}$: (variables binaires) = 1 si l'action *a* pour modifier la capacité est activée en période *t*, 0 sinon.

Elles sont liées aux variables d'état suivantes :

$I^{+}_{p,t}$; $I^{-}_{p,t}$: niveaux de stocks et d'arriérés à la fin de la période *t* pour le produit fini *p*.
$J_{c,t}$: stock de composants à la fin de la période t.
$A_{s,c,t}$: quantité de composant *c* commandé au fournisseur *s* pour une livraison en période *t*.

Le modèle est basé sur les données suivantes :

CN : capacité nominale disponible à chaque période *t*.
{a} : ensemble d'actions pouvant être activées pour ajuster la capacité de l'entreprise (i.e. 2 ou 3-huit).
$\hat{D}_{p,t}$: demande déterministe du produit fini *p* en période *t* définie par le fournisseur.
R_p : temps unitaire de production du produit *p*.
$\alpha_{p,c}$: coefficient de nomenclature liant le produit *p* et le composant *c*.

Le modèle de planification est défini ci-dessous :

$$\max \sum_{t=\tau}^{\tau+HP-1} \left[\begin{array}{l} \sum_p v_p V_p - \sum_p h_p I^{+}_{p,t} - \sum_c c_c J_{c,t} - \sum_p b_p I^{-}_{p,t} - \sum_p u_p X_{p,t} \\ - \sum_p st_p ST_{p,t} - \sum_c \sum_s f_{s,c} A_{s,c,t} - \sum_a o_a B_{a,t} - eHS_t \end{array} \right] \quad (7)$$

sous les contraintes :

$$I^{+}_{p,t} - I^{-}_{p,t} = I^{+}_{p,t-1} - I^{-}_{p,t-1} + X_{p,t-LP} + ST_{p,t-LS} - \hat{D}_{p,t} \quad \forall p,t \in HP \quad (8)$$

$$\sum_{p} R_p X_{p,t} \leq CN + \sum_{a} (B_{a,t} \times SC_a) + HS_t \quad \forall t \in HP \quad (9)$$

$$J_{c,t} = J_{c,t-1} - \sum_{p} \alpha_{p,c}(X_{p,t} + ST_{p,t}) + \sum_{s} A_{s,c,t} \quad \forall t \in HP \quad (10)$$

$$\sum_{p} \alpha_{p,c}(X_{p,t} + ST_{p,t}) \leq J_{c,t-1} \quad \forall t \in HP \quad (11)$$

$$HS_t \leq HSMax \; \forall t \in HP \quad (12)$$

La fonction objectif (7) permet de maximiser le gain du plan obtenu à chaque pas de planification. v_p est le gain occasionné par la livraison d'un produit p. h_p, hc_c, b_p, u_p, st_p, $f_{s,c}$, o_a, e, sont les coûts unitaires associés aux décisions correspondantes. L'équation (8) relie les quantités de production (sous-traitée ou non) et les niveaux de stocks et d'arriérés. Les délais d'obtention au niveau de la production interne *LP* et de la sous-traitance *LS* sont également introduits dans cette équation. De plus, c'est dans cette équation que la demande $\hat{D}_{p,t}$, prise en compte dans la simulation du processus de planification est introduite. La contrainte (9) limite, sur chacune des périodes, le volume de production en fonction de la capacité. Une capacité nominale *CN* est disponible à chaque période à laquelle peut s'ajouter un volume d'heures supplémentaires HS_t et une surcapacité SC_a introduite par le biais des actions définies dans *{a}* (i.e. actions d'ajustement de capacité) pouvant être activées par la variable de décision $B_{a,t}$. Cette équation montre un partage des ressources entre les différents produits. L'équation (10) permet de calculer les stocks de composants en fonction des approvisionnements $A_{s,c,t}$, de la consommation des composants liée à la production interne ou sous-traitée et des coefficients de nomenclature $\alpha_{p,c}$. La contrainte (11) permet d'assurer la cohérence entre le besoin et les stocks de composants. Les heures supplémentaires sont limitées par (12) à une valeur maximale *HSMax*. Toutes ces contraintes sont définies pour chaque période de l'horizon de planification.

Chaque variable de décision possède sa propre dynamique et, comme en ce qui concerne la gestion de la demande client, elle peut être soumise à un délai d'anticipation spécifique reflétant le besoin d'organisation pour leur mise en application.

5. EXEMPLE ILLUSTRATIF

Dans cet exemple, nous appliquons la logique d'aide à la décision présentée dans la section 4 dans une logique simplificatrice. L'exemple développé considère un cas mono-produit représentatif, par exemple, de l'agrégation au niveau tactique d'un ensemble de produits finis appartenant à la même famille. Le décideur responsable de la planification a défini deux scénarios correspondant à deux évolutions du marché. Il possède deux leviers décisionnels pour ajuster sa capacité. Ainsi, en plus de sa capacité interne nominale, il peut à la fois utiliser des heures supplémentaires et sous-traiter une partie de sa production. Son objectif est de choisir une stratégie de planification en fonction des imperfections sur la demande et des caractéristiques de son outil de production.

5.1. Paramétrage de l'entreprise

Le paramétrage temporel du système de production introduit des horizons gelés différents selon le type de décision considéré. Le tableau 1 présente les délais associés à chacune des décisions.

Décision	Délai d'obtention	Délai d'anticipation
Production interne	1	
Sous-traitance	2	2
Heures supplémentaires		1
Fournisseur 1		4
Fournisseur 2		2

Tableau 1. Valeurs des paramètres temporels

Dans cet exemple, on considère que le décideur a la possibilité d'agir sur sa production interne, dès la période courante. Par contre les produits fabriqués en interne seront disponibles pour le client ou stockés à la période suivante (LP = 1). Pour utiliser la sous-traitance, les informations sur les quantités à produire doivent parvenir 2 périodes en avance. Ce décalage correspond à un gel des décisions sur les deux premières périodes de la planification. Les produits sous-traités sont en effet disponibles au bout de 2 périodes. Les heures supplémentaires doivent être anticipées d'une période et prennent effet sur la période courante. Pour que le fournisseur 1 (F1) puisse organiser sa propre production et livrer les composants, une anticipation de 4 périodes est requise. Le fournisseur 2 (F2) ne nécessite que 2 périodes d'anticipation. L'intérêt d'utiliser le fournisseur 1 est son faible coût relativement au fournisseur 2.

Des coûts sont associés à chaque variable de décision :

Variables de décision	Coûts unitaires
Rupture (b_p)	20
Stock (h_p)	10
Production (u_p)	5
Sous-traitance (st_p)	70
Heures Supplémentaires (e)	30
Achats C1 à F1 ($f_{F1,C1}$)	2
Achats C2 à F1 ($f_{F1,C2}$)	1
Achats C1 à F2 ($f_{F2,C1}$)	3
Achats C2 à F2 ($f_{F2,C2}$)	2
Stockage C1 (c_{C1})	1
Stockage C2 (c_{C2})	0,5

Tableau 2. Structure des coûts pour la simulation

Le prix de vente des articles qui permet de calculer le gain global est fixé à 200 uc. Le produit fini P fabriqué est composé de 1 composant C1 ($\alpha_{P,C1}$ = 1)et de deux composants C2 ($\alpha_{P,C2}$ = 2). Enfin, en interne, la fabrication de P nécessite 2 unités de temps (R_p = 2)

5.2. Définition du plan d'expériences

Dans notre exemple, nous caractérisons l'incertitude sur la demande par l'occurrence possible de deux tendances différentes. La première tendance (T1) est le reflet d'une forte augmentation ponctuelle de la demande avec l'acceptation de commandes allant au-delà de la capacité nominale de production. La figure 4 présente les demandes prévisionnelles correspondantes. A chaque période sont données les valeurs minimales, maximales et moyennes des demandes. Une imprécision de 20% par rapport à la valeur moyenne est envisagée.

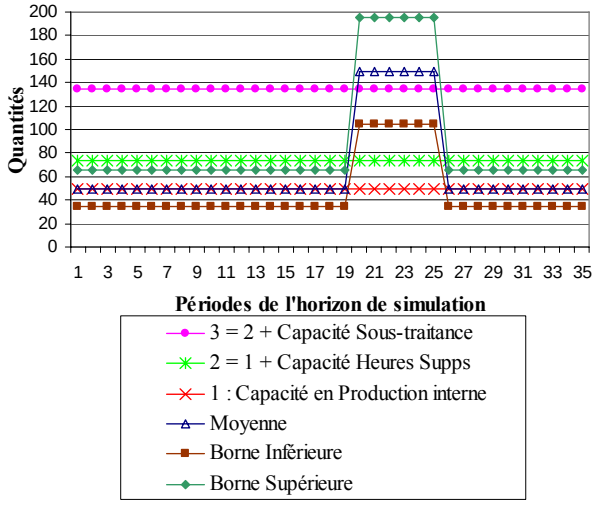


Figure 4. Tendance 1 et capacités de production

La seconde tendance présentée en figure 5 correspond à une augmentation modérée de la demande envisagée par le décideur. Cette hausse ponctuelle de la demande attendue pour les périodes 20 à 25 est beaucoup moins élevée que précédemment.

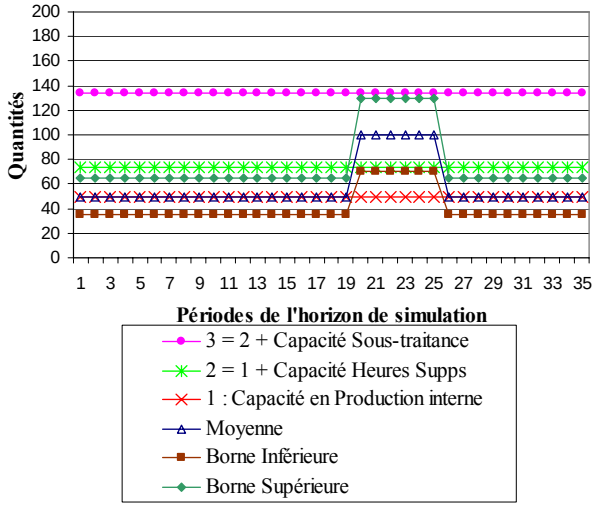


Figure 5. Tendance 2 et capacités de production

Selon sa hauteur, le pic aura plus ou moins d'influence sur la planification compte tenu de l'ensemble des capacités de production (interne ou sous-traitée) et des délais de production associés (Galasso, 2007).

De plus nous envisagerons deux comportements du client :

- un comportement de surestimation de la demande qui amène le client à toujours commander la borne minimale de la demande prévisionnelle et noté « Min »,
- un comportement de sous-estimation de la demande qui amène le client à toujours commander la borne maximale de la demande prévisionnelle et noté « Max ».

Au fur et à mesure du déroulement du processus de planification, le décideur aura une meilleure connaissance de la tendance à laquelle il sera confronté. Indubitablement, cette connaissance sera plus ou moins rapide en fonction de sa visibilité (longueur de l'horizon ferme) sur la demande ferme. Nous supposons ici que la chaîne logistique a été définie de manière cohérente et que la visibilité sur la demande client doit permettre au décideur d'utiliser tous ses leviers décisionnels (i.e. les heures supplémentaires, la sous-traitance et les deux fournisseurs). Ainsi, compte tenu du paramétrage temporel défini en tableau 1, l'horizon de planification adopté pour les simulations est de 12 périodes. Ainsi, il englobe les 4 périodes nécessaires à l'utilisation du sous-traitant plus les 4 nécessaires à l'utilisation du fournisseur 2 et la périodicité de planification de 2 périodes.

Dans un premier temps, la demande ferme est connue sur un horizon de 4 périodes. Sur les 8 périodes suivantes, la demande est connue sous forme flexible. Le pourcentage de flexibilité associé est de (+/- 20%).

Pour traiter l'imprécision sur les demandes flexibles, le fournisseur adopte deux stratégies de planification pour la gestion de la demande :

- S1 : choisir la demande flexible maximale
- S2 : choisir la demande flexible minimale

Ces stratégies seront évaluées vis-à-vis des différents scénarios de comportement du client.

Ces simulations sont conçues comme des combinaisons :

- d'une tendance d'évolution de la demande (T1 ou T2),
- d'un type de comportement client (surestimation notée « Min » ou sous-estimation notée « Max » de la demande),
- d'une stratégie de planification du fournisseur (concernant le choix par le fournisseur de la demande flexible maximale notée S1 ou minimale notée S2).

Ainsi, le plan comporte 8 simulations. Les paramètres de coûts et les paramètres temporels restent identiques pour chaque simulation.

5.3. Résultats

Les gains obtenus lors de l'application des stratégies S1 (prise en compte de la demande maximale) et S2 (prise en compte de la demande minimale) sont présentés dans le tableau 3. Dans ce tableau, le meilleur et le pire des gains obtenus pour chaque stratégie sont précisés en gras et sont de : 476 378 et 235 470 pour la première stratégie et de 403 344 et 264 853 pour la seconde.

	Tendance 1		Tendance 2	
	Scénario « Min »	Scénario « Max »	Scénario « Min »	Scénario « Max »
S1	245 201	**476 378**	**235 470**	444 191
S2	291 798	**403 344**	**264 853**	383 765

Tableau 3. Résultats obtenus pour un HF = 4 et HL = 8

A partir de ces résultats, il est possible d'établir le diagramme des risques présenté en figure 7 pour une longueur d'horizon ferme de 4 périodes.

Il est donc nécessaire de calculer à partir de quelle valeur du coefficient de pondération α du critère d'Hurwicz, un changement de stratégie est « préconisé » (cf. figure 6).

On trace les droites d'équation :

- $H_{S1} = (1-\alpha)\times 235\,470 + \alpha\times 476\,378$ pour S1 et
- $H_{S2} = (1-\alpha)\times 264\,853 + \alpha\times 403\,344$ pour S2.

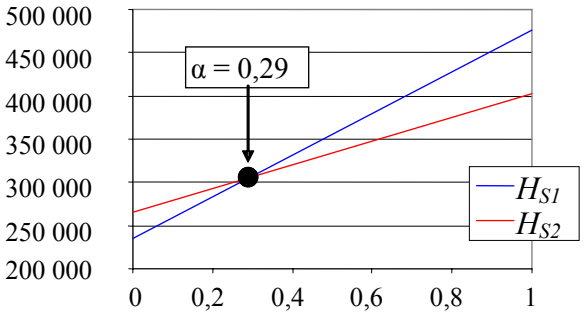


Figure 6. Détermination du point de changement de stratégie

On peut maintenant établir le diagramme des risques. On trace tout d'abord l'axe matérialisant la propension au risque du décideur en faisant apparaître la valeur du paramètre α à partir de laquelle il y a une rupture en ce qui concerne le choix des stratégies (ici, pour α = 0,29). On positionne ensuite les stratégies S1 et S2 sur cet axe. On rattache ensuite les autres critères (Laplace et Savage) dans le diagramme sur les stratégies qu'ils préconisent.

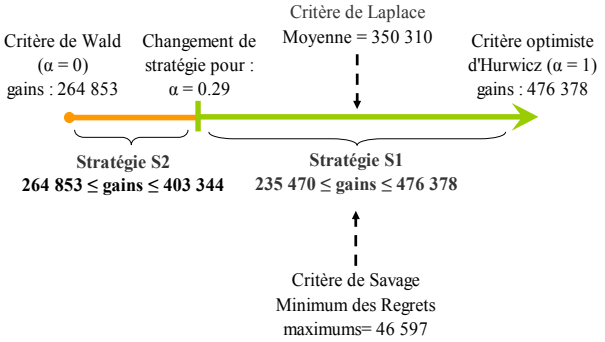


Figure 7. Diagramme de risque pour HF = 4 et HL = 8

On constate sur ce diagramme que lorsque la situation est envisagée dans une perspective pessimiste (valeur de α inférieure à 0,29) la stratégie consistant à choisir la demande minimale (S2) est préférable. Il montre aussi que les critères de Laplace, de Savage et d'Hurwicz, lorsque le décideur adopte une attitude plutôt optimiste (valeur de α supérieure à 0,29) préconisent le choix de la stratégie S1. Le décideur devra s'appuyer sur d'autres informations (par exemple, des informations du client de son client sur l'évolution du marché) pour savoir s'il doit être pessimiste ou non.

Ces résultats apportent un sens supplémentaire à la simple simulation permettant d'établir des gains en fonction de différents scénarios. En effet, en première instance, il peut paraître trivial que plus la demande à satisfaire sera importante, plus les gains seront importants. Néanmoins, la réalisation d'un tel scénario conduisant à ce gain reste incertaine. Ainsi, au travers du diagramme de risque, nous apportons non seulement une information quant à la stratégie applicable mais aussi une indication sur la pertinence de ce choix.

5.4. Support à la collaboration et à la réduction de l'imprécision

Pour évaluer l'impact de l'imprécision sur la demande, nous répétons le plan d'expériences précédent pour 3 longueurs de l'horizon ferme (6, 8 et 10) auxquelles sont ajoutées les longueurs d'horizon flexible correspondantes (6, 4 et 2) pour obtenir un horizon de planification constant de 12 périodes. Ainsi, nous souhaitons permettre au fournisseur d'avoir la possibilité de convaincre le client de lui transmettre des demandes fermes sur un horizon plus long.

Les résultats obtenus pour chaque cas sont présentés dans les tableaux 4, 5 et 6. Ces tableaux conservent le même formalisme que le tableau 3 et les gains maximum et minimum pour chaque stratégie apparaissent en gras.

	Tendance 1		Tendance 2	
	Scénario « Min »	Scénario « Max »	Scénario « Min »	Scénario « Max »
S1	275 477	**477 185**	**256 284**	446 378
S2	291 798	**444 947**	**264 853**	425 302

Tableau 4. Résultats obtenus pour un HF = 6 et HL = 6

	Tendance 1		Tendance 2	
	Scénario « Min »	Scénario « Max »	Scénario « Min »	Scénario « Max »
S1	287 509	**478 565**	**262 128**	446 378
S2	291 798	**463 995**	**264 853**	444 929

Tableau 5. Résultats obtenus pour un HF = 8 et HL = 4

	Tendance 1		Tendance 2	
	Scénario « Min »	Scénario « Max »	Scénario « Min »	Scénario « Max »
S1	291 328	**478 610**	**264 557**	446 423
S2	291 798	**473 611**	**264 853**	446 378

Tableau 6. Résultats obtenus pour un HF = 10 et HL = 2

Un premier résultat est le fait que les minimums et maximums des gains pour chaque stratégie s'obtiennent pour les mêmes associations de tendance et de demande flexible. Ainsi, les maximums des gains s'obtiennent lorsque l'entreprise doit satisfaire la demande maximale dans le cadre de la tendance 1. Dans ce cas de figure, la demande à satisfaire est la plus élevée et permet donc à l'entreprise de réaliser le maximum de chiffre d'affaires. Cette logique s'applique pour les gains minimums qui sont obtenus lorsque l'entreprise doit satisfaire le minimum de demande c.a.d. quand elle doit satisfaire la demande minimale pour la tendance 2.

Les figures 8 à 10 présentent les différents diagrammes de risques obtenus pour des valeurs d'horizon ferme croissantes.

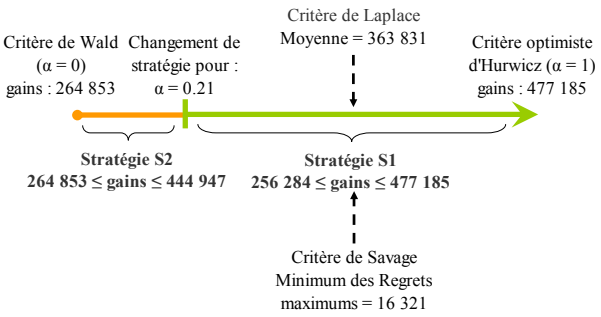


Figure 8. Diagramme de risque pour HF = 6 et HL = 6

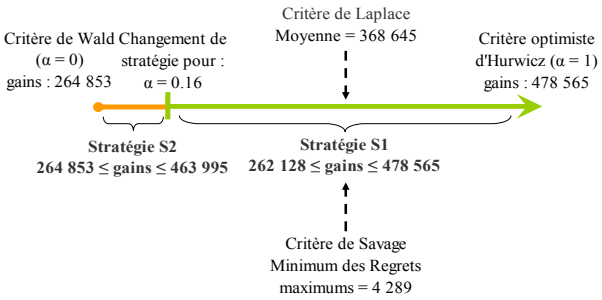


Figure 9. Diagramme de risque pour HF = 8 et HL = 4

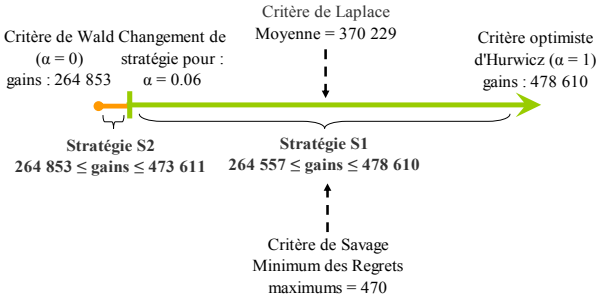


Figure 10. Diagramme de risque pour HF = 10 et HL = 2

L'évolution de ces diagrammes va inciter le décideur à adopter une attitude de plus en plus optimiste. En effet, le degré d'optimisme nécessaire au changement de stratégie diminue de 0,21 à 0,06.

Au-delà des diagrammes de risque, une analyse peut être menée concernant l'incomplétude sur les données. Pour cela, la figure 11 présente deux séries de données sur les écarts de gains entre la stratégie S1 et la stratégie S2. La première compare les gains maximums et la seconde compare les gains minimums. Dans la première série de données, les résultats sont positifs car les gains maximums pour S1 sont supérieurs à ceux obtenus avec la stratégie S2. Dans la seconde série de données, ils sont négatifs car la stratégie S2 génère des gains minimums plus élevés que la stratégie S1. Chaque écart est mesuré pour une longueur d'horizon ferme donnée et présentée en abscisse. Cette figure montre que plus la longueur de l'horizon est grande, plus les écarts entre les stratégies sont faibles. Cela confirme qu'au-delà d'une certaine visibilité, le choix d'une stratégie n'a que peu d'influence sur les résultats de la simulation.

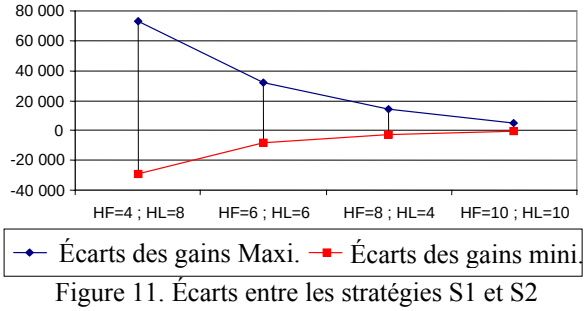


Figure 11. Écarts entre les stratégies S1 et S2

Ces résultats sont à mettre en correspondance avec les figures 7 à 10 présentant les diagrammes de risque. Même si les critères de décisions donnent une préférence

pour la stratégie S1, l'engagement du décideur sera de toute façon de moins en moins risqué.

L'évaluation menée est basée sur le degré d'optimisme/pessimisme du décideur. Elle lui permet d'être guidé dans sa réflexion et de compléter l'information brute obtenue après simulation.

6. CONCLUSION

Cet article s'appuie sur un état de l'art pour proposer une adaptation de la terminologie associée à la théorie de la décision sous incertitude à la gestion de la chaîne logistique. Ainsi, une déclinaison des notions liées aux incertitudes, imprécisions et incomplétudes est abordée vis-à-vis de la gestion de la demande dans une relation client-fournisseur. Ces éléments nous ont permis d'associer un cadre de simulation permettant d'évaluer les comportements du client et du fournisseur à ces imperfections sur la demande. Nous avons montré que, par cette approche, il était possible d'apporter une aide à la décision au fournisseur désireux de définir son comportement pour la planification. Cette aide à la décision va au-delà d'une simple évaluation des plans puisqu'elle introduit des niveaux d'optimisme (au sens du critère d'Hurwicz) pour lesquels une stratégie peut être privilégiée. De plus, les résultats obtenus en faisant varier les longueurs des horizons peuvent inciter le client à améliorer ses relations avec les fournisseurs en proposant des données fermes sur un horizon plus long.

Les perspectives de ce travail sont multiples. Sur le plan sémantique elles peuvent être la recherche de convergences entre la terminologie appliquée en théorie de la décision sous incertitude et la gestion de production au niveau opérationnel. Cet article s'est en effet, essentiellement focalisé au niveau tactique. D'un point de vue plus technique, même si les mécanismes de planifications ont été construits dans un souci de généricité, un éventail d'applications numériques pourrait être envisagé. Globalement, on s'attend à confirmer les éléments présentés dans cet article en termes d'amélioration de la performance lorsque la collaboration client-fournisseur est améliorée.

REFERENCES

Bartezzaghi, E. and R. Verganti, 1995. Managing demand uncertainty through order overplanning. *International Journal of Production Economics*, 40, p. 107-120.

Bouchon-Meunier, B., 1995. *La logique floue et ses application*s Addison-Weyley.

Bräutigam, J., Mehler-Bicher, A., and C. Esche, 2003. Uncertainty as a key value driver of real options. *Proceedings of the annual international conference on real options*, available online at: http://www.realoptions.org/papers2003/BraeutigamUncertainty.pdf.

Brindley, C. (Ed.), 2004. *Supply chain risk*. MPG Books Ltd.

François, J. and F. Galasso, 2005. Un cadre générique d'analyse des relations dans la chaîne logistique interentreprises. *Proceedings from the 6th Congrès international de génie industriel,* Besançon, France.

Galasso, F., Mercé, C. and B. Grabot, 2006. Decision support for supply chain planning under uncertainty. *Proceedings from the 12th IFAC International Symposium Information Control Problems in Manufacturing (INCOM),* St-Etienne, France, 3, p. 233-238.

Galasso, F., 2007, *Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

Geary, S., Childerhouse, P. and D. Towill, 2002. Uncertainty and the seamless supply chain. *Supply Chain Management Review*, 6, p. 52 - 60.

Génin, P., Thomas, A. and S. Lamouri, 2007. How to manage robust tactical planning with an APS (Advanced Planning Systems). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, p. 209-221.

Holton, G. A., 2004. Defining Risk. *Financial Analysts Journal,* 60 (6), p. 19-25.

Lang, J., 2003, *Contribution à l'étude de modèles, de langages et d'algorithmes pour le raisonnement et la prise de décision en intelligence artificielle.* Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Sabatier, France.

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, France.

Mula, J., Poler, R. and J.P. Garcia, 2006. MRP with Flexible Constraints: A Fuzzy Mathematical Programming Approach, *Fuzzy Sets and Systems,* 157, p. 74-97.

Ritchie, B. and C. Brindley, 2004. *Risk characteristics of the supply chain – a contingency framework.* Brindley, C. (Ed.). (2004). Supply chain risk. Cornwall: MPG Books Ltd.

Rota, K., Thierry, C. and G. Bel, 2002. Supply chain management: a supplier perspective. *Production Planning and Control*, 13(4), p. 370-380.

Tang, C.S., 2006. Perspectives in supply chain risk management, *International Journal of Production Economics*, 103, p. 451-488.

Teixidor, A.B., 2006. *Proactive management of uncertainty to improve scheduling robustness in process industry*. Thèse de doctorat, Universitat Politèctina de Barcelone.

Ziegenbein, A. and J. Nienhaus, 2004. Coping with supply chain risks on strategic, tactical and operational level. *Proceedings of the Global Project and Manufacturing Management Symposium*. Richard Harvey, Joana Geraldi, and Gerald Adlbrecht (Eds.), Siegen, p. 165-180.