



HAL
open science

Évaluation de l'incertitude pour l'aide à la replanification en horizon glissant d'une chaîne logistique

Sanaa Tiss, Jacques Lamothe, C Thierry

► **To cite this version:**

Sanaa Tiss, Jacques Lamothe, C Thierry. Évaluation de l'incertitude pour l'aide à la replanification en horizon glissant d'une chaîne logistique. MOSIM'20 - 13ème Conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2020, Agadir (online), Maroc. 9 p. hal-03053842

HAL Id: hal-03053842

<https://hal.science/hal-03053842v1>

Submitted on 11 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE POUR L'AIDE À LA REPLANIFICATION EN HORIZON GLISSANT D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE

S. TISS, J. LAMOTHE

Centre Génie Industriel, IMT Mines Albi
Albi, France

sanaa.tiss@mines-albi.fr, jacques.lamothe@mines-albi.fr

C. THIERRY

Université de Toulouse, IRIT
Toulouse, France

caroline.thierry@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ : Dans une chaîne logistique constituée d'unités de fabrication et de distribution indépendantes, chaque maillon planifie ses activités et partage ses plans avec les autres partenaires afin d'aligner leurs planifications et éviter les ruptures en bout de la chaîne. Dans cet article, nous adoptons le point de vue d'un planificateur de distribution centrale qui se situe entre la production et des centres de distributions locaux. Dans le contexte d'une planification tactique à horizon glissant, ce dernier modifie sa planification afin de l'adapter aux événements et aléas de la semaine. Cela peut augmenter significativement la nervosité du système de planification et le besoin d'agilité et flexibilité au sein de la chaîne logistique. La nervosité des décisions des autres planificateurs de la chaîne est vue comme source d'incertitude pour sa planification. Ainsi, nous considérons l'incertitude sur les demandes de ses clients et sur les réceptions prévues de ses fournisseurs. Nous proposons une évaluation possibiliste des risques et de la robustesse de ces plans de livraisons sous incertitude, dans un cadre d'aide à la décision.

MOTS-CLÉS : Ensembles Flous, Évaluation des Risques, Robustesse, Planification Tactique, Chaîne Logistique, Nervosité, Aide à la Décision.

1 INTRODUCTION

Le défi principal d'une planification est de prévoir une activité future sur un horizon de temps. Ce défi s'accroît lorsque plusieurs acteurs doivent se coordonner pour réaliser la planification des activités d'une chaîne logistique (SC) composée de maillons indépendants.

La planification de la production est généralement assurée par un ensemble de modules MRP (Manufacturing Resource Planning) (Adams and Cox, 1985). Pour la planification des opérations de distribution, les entreprises disposant de produits "Make-To-Stock" se basent généralement sur des processus de planification de type DRP (Distribution Resource Planning) (Martin, 1992).

Au niveau tactique, chaque acteur modifie sa planification afin de s'adapter aux événements non prévus ou pour assurer la synchronisation de son activité avec le reste de la chaîne. L'effet de ces modifications se propage dans la chaîne et peut augmenter la nervosité du système de planification (effet Bulwhip).

Pour la suite de cet article, nous focalisons sur la planification de la distribution centrale ayant les unités de fabrication comme fournisseurs et les unités de distribution locales comme clients (voir figure1). Nous avons pour objectif d'évaluer les risques de non-maintien de la promesse de livraison d'un décideur en horizon glissant ainsi que la robustesse du plan face aux incertitudes sur la demande et les réceptions prévues.

Nous présenterons d'abord les travaux de la littérature adressant des problèmes de la planification sous incertitude. Ensuite, nous modéliserons le problème et les contraintes considérées. Enfin, nous présenterons notre approche pour aider à la replanification en évaluant les risques et la robustesse des plans et nous finirons l'article avec un exemple illustratif de cette évaluation.

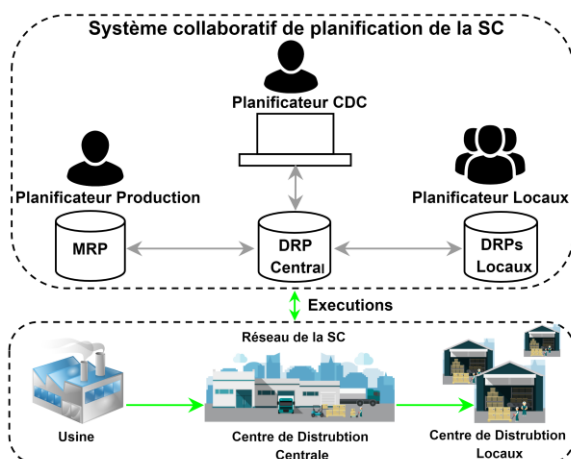


Figure 1 : Chaîne logistique (SC)

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans la littérature, les notions de nervosité, e.g. (de Kok and Inderfurth, 1997), et de robustesse, e.g. (Goren and Sabuncuoglu, 2008), sont souvent liées à la notion de stabilité.

La nervosité reflète l'instabilité des variables de décision d'une planification. Elle est généralement quantifiée par le nombre de changements effectués sur ces variables

au long des cycles de replanification (Ho, 1989). Néanmoins, dans le cadre d'une planification à horizon glissant, nous ne pouvons pas échapper à ce phénomène mais plutôt chercher à l'atténuer. Horizon figé, stock de sécurité, Lot-for-Lot, surestimation des délais, diminution des coûts de modification et augmentation de la longueur d'horizon de planification sont des stratégies visant la minimisation de la nervosité dans la SC (Kadipasaoglu and Sridharan, 1995). D'autres travaux ont pris en compte les incertitudes dans les paramètres de planification pour traiter ce phénomène et évaluer l'effet de ces incertitudes sur la nervosité de système (e.g. (Ho and Ireland, 1998)).

Cependant, la robustesse peut être vue comme une mesure de **stabilité des performances** face à la nervosité des variables de décision. « *A system is known as robust if it makes it possible to obtain a weak dispersion of the target performances in spite of the variations of the level of the noncontrollable decision variables.* » (Genin et al., 2005) Cela justifie le fait que la notion de robustesse est souvent liée à l'analyse des risques et des incertitudes, impactant les performances dans la prise de décision, dans la littérature. (Kleijnen and Gaury, 2003) intègrent l'analyse des risques ou des incertitudes dans leur méthodologie afin de proposer la solution la plus robuste face à la variabilité d'un environnement.

Les incertitudes dans les problèmes de planification de la SC concernent différents paramètres. (Ben Ammar, 2014) identifie quatre catégories principales : délai de livraison incertain et demande déterministe (Dolgui and Ould-Louly, 2002), délai de livraison et demande incertains (Axsater, 2006), demande incertaine (Graves, 2011) et capacité incertaine (Guillaume et al., 2013). La littérature dans cette dernière catégorie est **très limitée**. Peu de travaux ont pris en compte explicitement l'incertitude sur les attendus de livraison et les contraintes de capacité.

Les types de modélisation des incertitudes de ces paramètres dans la littérature sont principalement : 1/ les intervalles, la représentation la plus simple de l'incertitude (Guillaume et al., 2017), 2/ les distributions de probabilité (Birge and Louveaux, 2011), 3/ les fonctions de croyance (Yager and Liu, 2008), 4/ les ensembles flous (Ghabot et al., 2005).

La théorie des possibilité et les ensembles flous permettent de modéliser des incertitudes en cas d'insuffisance de données pour déterminer une distribution de probabilité (Guillaume et al., 2011).

Dans notre article, nous modélisons la nervosité des décisions des clients et des fournisseurs en utilisant les ensembles flous. Nous confrontons les plans de livraison déterministes cumulés (décisions) du planificateur de distribution à ces incertitudes afin d'évaluer la robustesse et les risques de ces plans. Nous nous appuyons principalement sur les mesures de la théorie de possibilité pour effectuer cette évaluation. Dans ce contexte, nous mesurons la robustesse d'un plan en évaluant la nécessité qu'il satisfait les objectifs tout en respectant les contraintes (Fargier and

Thierry, 2000), malgré l'incertitude de la demande et des réceptions programmées.

3 MODÉLISATION DU PROBLÈME DE DÉCISION SOUS INCERTITUDE

3.1 Problème

Nous nous intéressons à la planification des plans des livraisons clients (voir figure 2).

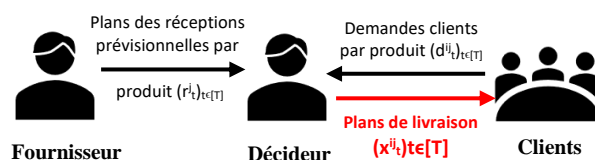


Figure 2 : Processus de décision et notations

Au niveau de centre de distribution central, un décideur gère un grand nombre de références de produits. Le stock d'un produit est partagé entre plusieurs clients. Cela fait de la décision des plans de livraison par produit et par client une décision complexe et multi-contrainte.

Cette décision est susceptible de beaucoup évoluer dans le temps dans un environnement à fortes variabilités.

Au cours du processus de replanification, l'identification des plans risqués qui nécessitent des modifications pour éviter des perturbations et/ou une dégradation importante du taux de service, est complexe dans ce contexte.

Nous modélisons le manque de confiance du décideur dans les plans transmis par les autres partenaires par une incertitude, afin d'évaluer la robustesse de ses décisions et l'aider à replanifier efficacement.

3.2 Notations

Soit $\{IJ\}$, l'ensemble des clients i consommant le produit j . $[T]$, l'ensemble des périodes t d'un horizon de planification.

Au niveau du centre de distribution, un décideur reçoit des plans de demandes d'approvisionnement par produit $(d_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$ de la part de ses clients et des plans de réceptions prévisionnelles par produit $(r_t^j)_{t \in [T]}$ de la part de ses fournisseurs dans la chaîne. Ensuite, il décide des plans de livraisons par produit $(x_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$ pour chacun de ses clients.

Soit $(D_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$, $(R_t^j)_{t \in [T]}$ et $(X_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$ les plans cumulés des plans $(d_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$, $(r_t^j)_{t \in [T]}$ et $(x_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$, respectivement, calculés pour chaque période, tels que $D_t^{ij} = \sum_{s=1}^t d_s^{ij}$, $R_t^j = \sum_{s=1}^t r_s^j$, $X_t^{ij} = \sum_{s=1}^t x_s^{ij}$. La décision $(x_t^{ij})_{t \in [T], i \in IJ}$ fait objet de l'évaluation dans les prochaines sections.

3.3 Modèle d'incertitude

Dans l'historique de planification à horizon glissant, nous distinguons les incertitudes dues à des déplacements des

quantités dans le temps entre deux cycles de planification successifs (1) et les incertitudes dues à des modifications effectives de la quantité initialement prévue, pour une période donnée, entre deux cycles de planification successifs (2). Les plans des acteurs de la chaîne incluent les deux types d'incertitudes observés.

À l'aide des plans cumulés, nous filtrons les incertitudes dues aux modifications effectives des quantités prévues. Il convient donc de noter que l'imprécision des données cumulées est moins importante que la somme des imprécisions des données non cumulées ($\widetilde{Q}_t \leq \sum_{s=1}^t \widetilde{q}_s$; respectivement, \widetilde{q}_t et \widetilde{Q}_t sont la quantité incertaine planifiée à la période t et la quantité cumulée incertaine planifiée à la période t).

Une représentation trapézoïdale peut être utilisée pour modéliser une information incomplète graduelle concernant une quantité planifiée incertaine \widetilde{Q}_t .

Q_t est la quantité réellement transmise par un acteur. Elle se situera dans l'intervalle expert le plus possible $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ (voir figure 3). Un cas particulier est de considérer la valeur transmise comme la valeur la plus possible dans l'intervalle possible $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ ce qui revient à une représentation triangulaire. C'est cette représentation que nous utiliserons dans la suite de cet article pour des raisons pédagogiques.

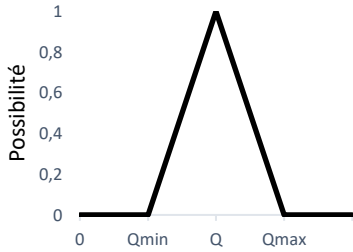


Figure 3 Distribution de possibilité triangulaire

3.4 Contraintes considérées

Sur l'horizon de planification, nous distinguons trois zones : gelée, flexible et libre (Chapman and Clive, 2007). Dans l'horizon gelé, les changements de planification ne sont pas autorisés sauf avec approbation exceptionnelle du décideur. L'horizon flexible est une zone de compromis et de négociations. Enfin, dans la zone libre, les modifications sont acceptées automatiquement dans les limites définies.

En général, les perturbations les plus importantes se trouvent au niveau de la zone flexible de planification en s'approchant de la date de réalisation. D'où notre intérêt à évaluer les décisions de cette zone face aux incertitudes pour augmenter leur robustesse. Nous considérons les incertitudes sur les demandes et les réceptions de la zone flexible de la planification.

Le maintien de la promesse de livraison $(x_t^{ij})_{t \in [T], i \in I}$ sur les différents cycles de planification jusqu'à sa réalisation dépend principalement de la disponibilité des quantités

prévisionnelles dans le stock (Contrainte (C1)). Cependant, la satisfaction des clients augmente en minimisant l'écart entre cette promesse et la demande de ces clients (Contrainte (C2)).

Pour la suite nous nous basons sur les mesures de la théorie de possibilité, liées aux demandes et réceptions cumulées floues, pour faire une évaluation possibiliste de deux risques principaux, risque de rupture et risque d'insatisfaction client, liés aux contraintes C1 et C2 respectivement ainsi que la robustesse des plans de livraisons.

4 ÉVALUATION DES RISQUES ET DE LA ROBUSTESSE DE PLANIFICATION

4.1 Mesures en théorie de possibilité

La nécessité et la possibilité d'un événement A sont les deux mesures principales décrivant l'incertitude de cet événement à partir d'une distribution de possibilité (Zadeh 1965).

La possibilité $\Pi(A)$ évalue à quel point l'évènement A est possible, telle que :

$$\Pi(A) = \sup_{x \in A} (\pi(x)) \quad (1)$$

La nécessité $N(A)$ évalue à quel point l'évènement A est nécessaire (certain) et elle est liée à la mesure de possibilité par la propriété de dualité (contrairement aux probabilités autoduales, $P(A) = 1 - P(A^c)$) suivante :

$$N(A) = 1 - \Pi(A^c) = \inf_{x \notin A} (1 - \pi(x)) \quad (2)$$

Ces mesures satisfont les conditions de normalisation suivantes :

$$\Pi(A) + \Pi(A^c) \geq 1 \quad (3)$$

$$N(A) \leq \Pi(A) \quad (4)$$

$$\forall A, B \subseteq S, \Pi(A \cup B) = \max(\Pi(A), \Pi(B)) \quad (5)$$

$$\forall A, B \subseteq S, N(A \cap B) = \min(N(A), N(B)) \quad (6)$$

k est un nombre précis, les mesures de possibilité et de nécessité de l'évènement ' $x \geq k$ ' et de l'évènement ' $x \leq k$ ' sont les suivantes :

$$\Pi(x \geq k) = \Pi(x \in [k, +\infty[) = \sup_{x \geq k} (\pi(x)) \quad (7)$$

$$\Pi(x \leq k) = \Pi(x \in]-\infty, k]) = \sup_{x \leq k} (\pi(x)) \quad (8)$$

$$N(x \geq k) = 1 - \Pi(x < k) = \inf_{x < k} (1 - \pi(x)) \quad (9)$$

$$N(x \leq k) = 1 - \Pi(x > k) = \inf_{x > k} (1 - \pi(x)) \quad (10)$$

4.2 Évaluation des risques

Le risque est défini comme « effet de l'incertitude sur les objectifs » selon la norme (ISO 31000(fr), 2018). Ainsi, dans cet article, nous mesurons l'effet de l'incertitude de la demande et celle des réceptions sur la satisfaction des contraintes C1 et C2.

K1 est le risque de rupture dû à l'insatisfaction de la contrainte C1 face aux incertitudes sur les réceptions. K2 est le risque d'insatisfaction client dû à l'insatisfaction de la contrainte C2 face aux incertitudes sur les demandes. La mesure d'un risque lié à un événement 'A' porte sur la mesure du couple $(N(A), \Pi(A))$.

Soit S_t^j , le stock projeté de la période t du produit j. Sans perte de généralité, nous considérons le stock initial inclus dans r_0^j . Nous utilisons les données cumulées pour le calcul du stock projeté, tel que :

$$S_t^j = R_t^j - X_t^j \quad (11)$$

Pour une période $t \in [T]$, la possibilité et la nécessité de rupture (insatisfaction de la contrainte C1 ($\overline{C1}$)), lié à la décision précise de livraison totale cumulée X_t^j sont calculées comme suit :

$$\Pi(\overline{C1})_t = \Pi(S_t^j < 0) = \Pi(R_t^j < X_t^j) \quad (12)$$

$$N(\overline{C1})_t = N(S_t^j < 0) = N(R_t^j < X_t^j) \quad (13)$$

Le **risque K1 de rupture** lié à la période t, est noté K1(t), tel que :

$$K1(t) = (\Pi(\overline{C1})_t; N(\overline{C1})_t) \quad (14)$$

Par objectif de simplification, nous négligeons le risque de sur stockage et nous considérons que les clients ont une capacité de stockage infini. Un client (i) est satisfait si la quantité de livraison, précise, promise X_t^{ij} pour une période t répond au moins à sa demande D_t^{ij} . Nous évaluons la possibilité et la nécessité d'insatisfaction d'un client i (insatisfaction de la contrainte C2 ($\overline{C2}$)) comme suit :

$$\Pi(\overline{C2})_{i,t} = \Pi(D_t^{ij} > X_t^{ij}) \quad (15)$$

$$N(\overline{C2})_{i,t} = N(D_t^{ij} > X_t^{ij}) \quad (16)$$

Le **risque K2 d'insatisfaction** lié à la période t et un client i est noté K2(t,i), tel que :

$$K2(t,i) = (\Pi(\overline{C2})_{i,t}; N(\overline{C2})_{i,t}) \quad (17)$$

Les deux graphiques ci-dessous montrent la répartition des risques K1(t) et K2(t,i) selon les décisions X_t^j et X_t^{ij} par rapport respectivement aux distributions de R_t^j et D_t^{ij} .

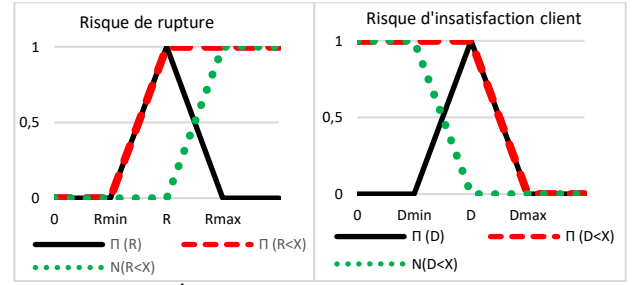


Figure 4 : Évaluation des risques K1(t) et K2(t,i)

Promettre une quantité, X_t , pour la livraison des clients qui dépasse la quantité prévisionnelle en stock, ou promettre une quantité inférieure aux demandes clients, implique un risque de ne pas tenir cette promesse dans les prochains cycles de planification.

Ainsi, nous agrégeons les deux risques K1(t) et K2(t,i) en un **risque « global »**, $K_{tot}(t, IJ)$, évaluant le risque de non maintien de la promesse, (\overline{C}), de la décision totale X_t^j pour une période t, tel que :

$$K_{tot}(t, IJ) = (\Pi(\overline{C})_{t, IJ}; N(\overline{C})_{t, IJ}) \quad (18)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \Pi(\overline{C})_{t, IJ} &= \Pi((\overline{C1})_t \cup (\overline{C2})_{t, IJ})_t \\ &= \Pi((R_t^j < X_t^j) \cup (D_t^j > X_t^j)) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} N(\overline{C})_{t, IJ} &= N((\overline{C1})_t \cup (\overline{C2})_{t, IJ})_t \\ &= N((R_t^j < X_t^j) \cup (D_t^j > X_t^j)) \end{aligned} \quad (20)$$

La **gravité (G) du risque « global »** du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$ peut ainsi être mesurée en terme de nécessité maximale du risque mesurée sur les périodes $t \in [T]$, tel que :

$$G = \max_{t \in [T]} (N(\overline{C})_{t, IJ}) \quad (21)$$

Soit [N] un ensemble de périodes t de taille N, tel que :

$$[N] \subset [T], \forall t \in [N], \Pi(\overline{C})_{t, IJ} > 0 \quad (22)$$

La **fréquence (F) d'apparition du risque « global »** le long de l'horizon [T] du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$, peut être exprimée comme suit :

$$F = \frac{N}{T} \quad (23)$$

D'autre part, nous considérons un risque global comme évitable si une opération de lissage du plan peut être suffisante pour la satisfaction des contraintes. Ce lissage est possible si la quantité totale promise X_T^j à la dernière

période T, est exécutable avec des réceptions totales cumulées programmées R_T^j et si elle satisfait la quantité totale demandée cumulée D_T^j . Ainsi, nous évaluons l'adaptabilité d'un plan (A) comme suit :

$$A((X_t^j)_{t \in [T]}) = \Pi((R_T^j \geq X_T^j) \cap (D_T^j \leq X_T^j)) \quad (24)$$

4.3 Évaluation de la robustesse

Nous évaluons la robustesse d'un plan comme étant le degré de certitude de satisfaction des contraintes (C1 et C2) simultanément, malgré les incertitudes sur R_t^j et D_t^j , telle que :

$$\begin{aligned} \text{Rob}(X_t^j) &= N((R_t^j \geq X_t^j) \cap (D_t^j \leq X_t^j)) \\ &= \min(1 - \Pi(R_t^j < X_t^j); 1 - \Pi(D_t^j > X_t^j)) \end{aligned} \quad (25)$$

Nous agrégeons l'évaluation de la robustesse globale du plan $(X_t^j)_{t \in [T]}$ sur l'horizon [T], comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Rob}((X_t^j)_{t \in [T]}) &= \bigcap_{t \in [T]} \text{Rob}(X_t^j) \\ &= \min_{t \in [T]} \text{Rob}(X_t^j) \end{aligned} \quad (26)$$

La Figure 5 résume sur le même graphe les évaluations des risques et de la robustesse d'une décision X_t^j à partir des mesures de possibilité et nécessité en termes de satisfaction des contraintes C1 et C2, pour un scénario des distributions floues de R et D, tel que : $D < R_{\min} < D_{\max} < R$

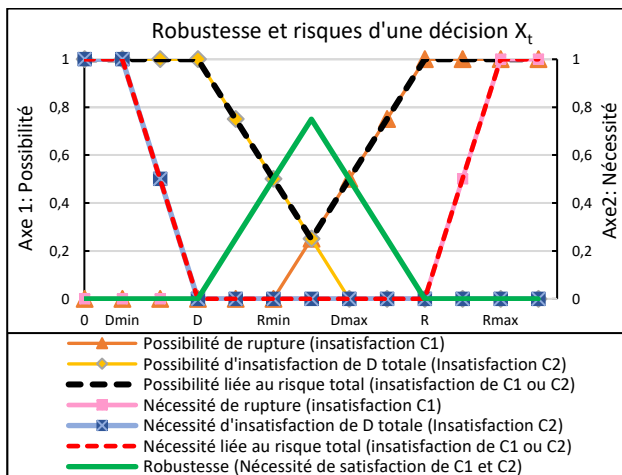


Figure 5 : Évaluation des risques et robustesse

4.4 Arborecence d'évaluation de criticité des plans

La norme (ISO 13849-1, 2008) définit l'arborecence classique d'évaluation des risques. Cette évaluation est basée sur trois niveaux principaux : la gravité du risque puis sa fréquence et finalement la facilité à l'éviter. En s'appuyant sur ce principe, nous proposons dans cette section une évaluation arborecente permettant de classer les plans par produit, $(X_t^j)_{t \in [T]}$, en fonction de l'évaluation du

risque global afin d'aider le décideur à identifier les plans de livraison les plus critiques.

L'arborecence est constituée de quatre niveaux. D'abord, nous filtrons les plans robustes qui satisfont les contraintes de manière plus ou moins certaine. Puis, les plans les plus contraignants font l'objet d'évaluation possibiliste en termes de gravité, fréquence et adaptabilité par rapport au risque global (voir les sections 3.2 et 3.3).

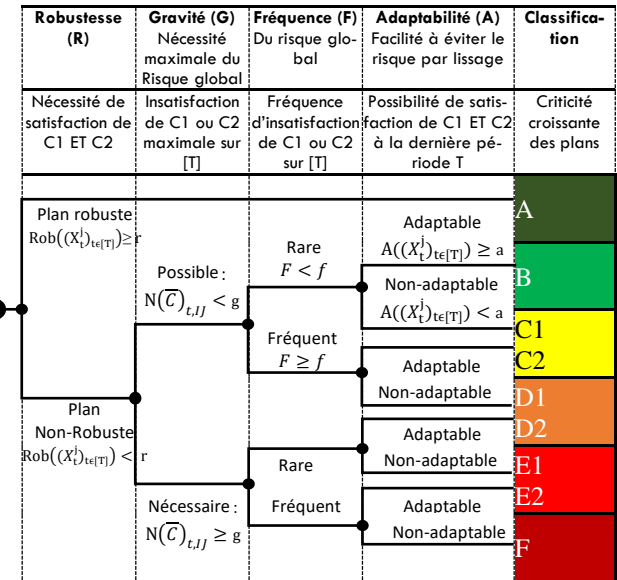


Figure 6 : Arborecence d'évaluation des plans /produit

Sur le premier niveau d'évaluation de la robustesse des plans (eq. (26)), le décideur peut paramétrer r afin de jouer sur les tolérances de son système et filtrer les plans les moins robustes en augmentant le r , pour ensuite détailler leur évaluation en terme de risque global et les classer selon leur criticité. Il a aussi le choix de définir la longueur T de l'horizon de planification à évaluer ainsi que le paramétrage des niveaux d'évaluation qui suivent.

Au niveau de l'évaluation de la gravité du risque global (eq.(21)), Le plan est considéré plus critique si le risque global maximal est sûr (nécessaire).

Ensuite, au niveau d'évaluation de la fréquence du risque global (F) (eq. (23)) le décideur peut aussi définir la valeur de référence f .

Finalement, nous évaluons la facilité à éviter le risque global en mesurant l'adaptabilité du plan (eq. (24)).

Le résultat de l'évaluation se présente dans la matrice ci-dessous (Figure 7). Les plans des produits (P_i) sont positionnés dans la matrice selon leur criticité en termes d'insatisfaction des contraintes. Les plans robustes sont également facilement identifiables sur la matrice.

| | | | | | | |
|------------------|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Plan non robuste | Lissage insuffisant | | C1 | D1 | E1 | F |
| | Lissage suffisant | | B | C2 | D2 | E2 |
| Plan Robuste | | A | | | | |
| R | A | | Rare à Impossible | Fréquent Possible | Rare Nécessaire | Fréquent Nécessaire |
| R | G/F | Plan Robuste | Plan non robuste | | | |

Figure 7 : Matrice de criticité des plans par produit

5 EXEMPLE ILLUSTRATIF

5.1 Données

Nous considérons les données cumulées de planification de trois produits (P1, P2 et P3). Le stock de chaque produit est partagé entre deux clients (C1 et C2).

La planification de la distribution des trois produits se fait sur un horizon de cinq périodes (t1, t2, t3, t4, t5).

Les tableaux 1, 2 et 3 présentent les plans cumulés flous des demandes clients des produits P1, P2 et P3, respectivement. Les plans flous sont présentés sous forme du triplet (Dmin ; D ; Dmax).

- **Produit P1 :**

| Période Demande /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| D (C1) | (45 ;50 ; 55) | (116 ;15 ; 0 ;185) | (160 ;20 ; 0 ;240) | (320 ;40 ; 0 ;480) | (400 ;50 ; 0 ;600) |
| D (C2) | (180 ;20 ; 0 ;220) | (180 ;20 ; 0 ;220) | (320 ;40 ; 0 ;480) | (360 ;40 ; 0 ;440) | (630 ;70 ; 0 ;770) |
| D_Totale | (225 ;25 ; 0 ;275) | (296 ;35 ; 0 ;405) | (480 ;60 ; 0 ;720) | (680 ;80 ; 0 ;920) | (1030 ;120 ;137 ;0) |

Tableau 1 : Plans flous des demandes clients (P1)

- **Produit P2 :**

| Période Demande /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|-------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| D (C1) | (0 ;100 ; 200) | (50 ;200 ; 400) | (100 ;30 ; 0 ;400) | (200 ;40 ; 0 ;500) | (100 ;50 ; 0 ;600) |
| D (C2) | (20 ;50 ; 200) | (50 ;100 ; 250) | (100 ;15 ; 0 ;300) | (100 ;20 ; 0 ;400) | (50 ;250 ; 0 ;500) |
| D_Totale | (20 ;150 ; 400) | (100 ;30 ; 0 ;650) | (200 ;45 ; 0 ;700) | (300 ;60 ; 0 ;900) | (150 ;75 ; 0 ;1100) |

Tableau 2 : Plans flous des demandes clients (P2)

- **Produit P3 :**

| Période Demande /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|-------------------------|--------------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| D (C1) | (0 ;0 ;50) | (50 ;200 ; 400) | (0 ;400 ; 600) | (100 ;65 ; 0 ;800) | (100 ;65 ; 0 ;1000) |
| D (C2) | (0 ;50 ;100) | (0 ;150 ; 200) | (100 ;15 ; 0 ;300) | (100 ;20 ; 0 ;300) | (100 ;30 ; 0 ;500) |
| D_Totale | (0 ;50 ;150) | (50 ;350 ; 600) | (100 ;55 ; 0 ;900) | (200 ;85 ; 0 ;1100) | (200 ;95 ; 0 ;1500) |

Tableau 3 : Plans flous des demandes clients (P3)

Le tableau 4 présente les plans cumulés flous des des réceptions prévues des fournisseurs par produit. Les plans flous sont présentés sous forme du triplet (Rmin ; R ; Rmax) des paramètres de la distribution triangulaire de possibilité pour chaque période.

| Période Réceptions / Produit | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| R (P1) | (270 ;30 ; 0 ;330) | (450 ;50 ; 0 ;550) | (560 ;70 ; 0 ;840) | (720 ;90 ; 0 ;1080) | (880 ;1100 ;1320 ;0) |
| R (P2) | (0 ;50 ;100) | (50 ;350 ; 400) | (100 ;45 ; 0 ;600) | (50 ;550 ; 700) | (100 ;85 ; 0 ;900) |
| R (P3) | (270 ;30 ; 0 ;330) | (600 ;70 ; 0 ;800) | (800 ;90 ; 0 ;950) | (1000 ;1100 ;1200 ;0) | (1200 ;1500 ;1600 ;0) |

Tableau 4 : Plans flous des réceptions par produit

Les tableaux 5, 6 et 7 présentent les décisions des plans de livraison cumulés à évaluer, de chaque article et pour chaque client (le décideur pourra entrer des plans non cumulés).

- **Produit P1 :**

| Période Livraisons /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| X (C1) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| X (C2) | 100 | 220 | 340 | 460 | 580 |
| X_Totale | 200 | 420 | 640 | 860 | 1080 |

Tableau 5 : Plans des livraisons par client et total (P1)

- **Produit P2 :**

| Période Livraisons /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| X (C1) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| X (C2) | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| X_Totale | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 |

Tableau 6 : Plans livraison par client et total (P2)

- **Produit P3 :**

| Période Livraisons /client | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 |
|----------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| X (C1) | 50 | 400 | 500 | 700 | 800 |
| X (C2) | 100 | 200 | 300 | 300 | 400 |
| X_Totale | 150 | 600 | 800 | 1000 | 1200 |

Tableau 7 : Plans livraison par client et total (P3)

5.2 Résultats d'évaluation et analyse

5.2.1 Classification des plans de livraison par produit

Nous évaluons les plans de livraison par produit, par rapport au risque global (K_{tot}) de non-maintien de promesse. Les résultats obtenus de cette évaluation par produit, sont les suivants :

| Produit | R (r = 0.3) | G (g = 0.5) | F (f = 0.3) | A (a = 0.5) | Classe |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| P1 | 0.0 | 1.0 | 0.8 | 0.29412 | F |
| P2 | 0.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | E2 |
| P3 | 0.45637 | 0 | 0.6 | 1.0 | A |

Tableau 8 : Résultats d'évaluation des plans de livraison par produit

Les paramètres (r, g, f, a) présentent le paramétrage initialisé par le décideur pour la classification des plans par produit.

Nous visualisons la classification obtenue des plans par produit dans la matrice ci-dessous :

| | | | | | | |
|------------------|---------------------|--------------|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Plan non robuste | Lissage insuffisant | | | | | P1 |
| | Lissage suffisant | | | | | P2 |
| Plan Robuste | | P3 | | | | |
| R | A | Plan Robuste | Rare à Impossible | Fréquent Possible | Rare Nécessaire | Fréquent Nécessaire |
| | G/F | | Plan non robuste | | | |
| R | | | | | | |

Figure 9 : Résultat de classification des plans par produit dans la matrice de criticité

Le plan de livraison totale du produit P3 est le plus robuste face aux incertitudes des demandes clients et des réceptions programmées du fournisseur. Les quantités totales programmées pour la livraison des clients satisfont nécessairement les demandes totales ainsi que la contrainte de disponibilité du produit dans le stock.

Le plan de livraison total du produit P2 est identifié comme critique avec un risque fréquent et nécessaire de non-maintien de promesse. Cependant, une opération de lissage des quantités programmées pourra être suffisante pour éviter ce risque.

Le plan de livraison totale du produit P1 est identifié le plus critique avec un risque de non-maintien de promesse de livraison nécessaire et très fréquent. Une opération de lissage des quantités programmées sur l'horizon de planification ne sera pas suffisante pour éviter ce risque.

La matrice amènera vraisemblablement à focaliser sur le produit P1.

5.2.2 Aide à la replanification du plan critique

Pour le produit P1, une visualisation plus détaillée sur les risques apparus pour chaque période est alors proposée (figures 10 et 11).

Les figures 10 et 11 détaillent respectivement l'évaluation du risque de rupture et du risque d'insatisfaction de la demande totale cumulée pour chaque période.

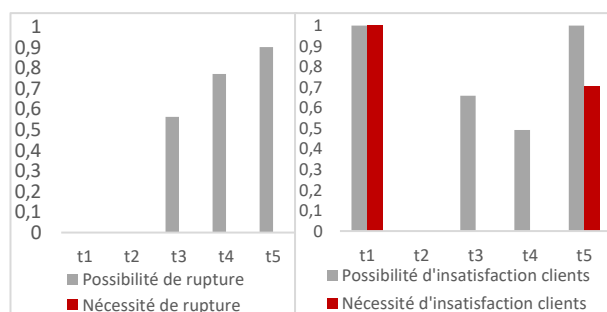


Figure 10 : Risque de rupture par période (P1)

Figure 11 : Risque d'insatisfaction des clients (P1)

À partir de cette évaluation le décideur identifie facilement les périodes t1 et t5 comme des périodes très critiques en termes de satisfaction de la demande totale. Cela oriente ses décisions de modification vers ces deux périodes. Les ajustements auront comme objectif d'annuler la nécessité d'insatisfaction client.

Afin d'apporter davantage des précisions sur les modifications les plus pertinentes, nous proposons un niveau d'évaluation encore plus détaillé par rapport au risque d'insatisfaction des clients. Les figures 12 et 13 montrent l'évaluation de la satisfaction de chaque client partageant le stock du produit P1.

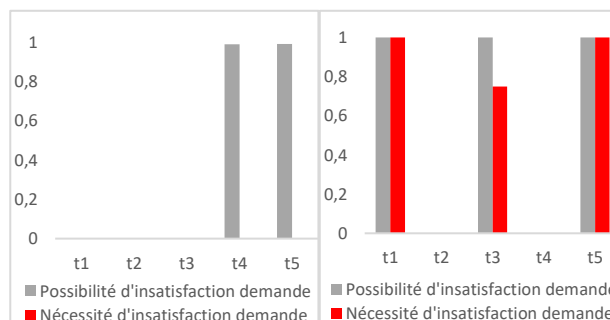


Figure 12 : Risque d'insatisfaction du client 1

Figure 13 : Risque d'insatisfaction du client 2

L'évaluation du risque d'insatisfaction de chaque demande client cumulée par période, oriente le décideur vers des modifications sur les plans de livraison par client. A partir des résultats des figures 12 et 13, le décideur constatera que les quantités promises à la livraison du client 2 ne satisferont pas les demandes du client 2 des périodes t1, t3 et t5 et que cette insatisfaction est sûre.

Finalement, si le décideur souhaite effectuer des modifications sur les quantités promises au client 2 des périodes t1, t3 et t5. Ces modifications augmenteront nécessairement la performance et la robustesse du plan P1 en termes de satisfaction des clients.

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La nervosité des demandes des clients et des plans de réceptions des fournisseurs d'un acteur d'une chaîne logistique est considérée comme des incertitudes qui rendent la décision de livraison de ce dernier difficile et instable. Dans cet article, nous aidons ce décideur à prendre en compte ces incertitudes pour évaluer les risques et la robustesse de ses décisions, en utilisant principalement les différentes mesures de la théorie des possibilités.

Nous faisons la différence entre différents niveaux d'agrégation des risques (à la période ou par plan, par client ou par demande totale). Nous avons proposé un outil d'évaluation de la criticité des plans décidés par produit en termes de satisfaction des contraintes considérées. Cela aidera le décideur à éviter les modifications insignifiantes sur les plans robustes et à s'orienter plutôt vers les plans les plus risqués.

Nous pouvons tout à fait étendre ce système et le personnaliser pour l'évaluation des plans par rapport à un risque spécifique.

Pour l'évaluation de la criticité des plans, nous avons considéré la contrainte du maintien de la promesse répondant à la demande totale des clients. La prochaine étape consistera à intégrer une étude d'équité des plans de livraison des clients. La modélisation des préférences de livraison du décideur peut être intégrée dans cette évaluation aussi.

Finalement, un test de l'outil proposé avec un 'Serious Game' est prévu par des décideurs en charge de la planification de la distribution chez le partenaire industriel Pierre Fabre Dermo-Cosmétique.

REMERCIEMENT

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR pour le financement du projet CAASC (Cloud Adaptation for Agile SC), Projet-ANR-18-CE10-0012.

REFERENCES

- Adams, F. P., and J. F. Cox. 1985. Manufacturing resource planning : An information systems model. *Long Range Planning* 18: 86–92.
- Axsater, S. 2006. Planning order releases for an assembly system with random operation times. 2.
- Ben Ammar, O. 2014. Planification des réapprovisionnements sous incertitudes pour les systèmes d'assemblage à plusieurs niveaux. thesis. Saint-Etienne, EMSE.
- Birge, J. R., and F. Louveaux. 2011. Introduction to Stochastic Programming. Springer Science & Business Media.

- Chapman, and Clive. 2007. Introduction to Materials Management. Pearson India.
- Dolgui, A., and M.-A. Ould-Louly. 2002. A model for supply planning under lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics* 78: 145–152.
- Fargier, H., and C. Thierry. 2000. The Use of Possibilistic Decision Theory in Manufacturing Planning and Control: Recent Results in Fuzzy Master Production Scheduling. 15.
- Genin, P., S. Lamouri, and A. Thomas. 2005. Impact de l'utilisation d'un plan de référence sur la robustesse de la planification tactique. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)* 39: 777–798.
- Goren, S., and I. Sabuncuoglu. 2008. Robustness and stability measures for scheduling: single-machine environment. *IIE Transactions* 40: 66–83.
- Grabot, B., L. Geneste, G. Reynoso-Castillo, and S. Vérot. 2005. Integration of uncertain and imprecise orders in the MRP method. *Journal of Intelligent Manufacturing* 16: 215–234.
- Graves, S. C. 2011. Uncertainty and Production Planning. In K. G. Kempf, P. Keskinocak, and R. Uzsoy [eds.], *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise: A State of the Art Handbook*, Volume 1, International Series in Operations Research & Management Science, 83–101. Springer US, Boston, MA.
- Guillaume, R., B. Grabot, and C. Thierry. 2013. Management of the risk of backorders in a MTO–ATO/MTS context under imperfect requirements. *Applied Mathematical Modelling* 37: 8060–8078.
- Guillaume, R., C. Thierry, and B. Grabot. 2011. Modelling of ill-known requirements and integration in production planning. *Production Planning & Control* 22: 336–352.
- Guillaume, R., C. Thierry, and P. Zieliński. 2017. Robust material requirement planning with cumulative demand under uncertainty. *International Journal of Production Research* 55: 6824–6845.
- Ho, C.-J. 1989. Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. *International Journal of Production Research* 27: 1115–1135.

- Ho, C.-J., and T. C. Ireland. 1998. Correlating MRP system nervousness with forecast errors. *International Journal of Production Research* 36: 2285–2299.
- Kadipasaoglu, S. N., and V. Sridharan. 1995. Alternative approaches for reducing schedule instability in multistage manufacturing under demand uncertainty. *Journal of Operations Management* 13: 193–211.
- Kleijnen, J. P. C., and E. Gaury. 2003. Short-term robustness of production management systems: A case study. *European Journal of Operational Research* 148: 452–465.
- de Kok, T., and K. Inderfurth. 1997. Nervousness in inventory management: Comparison of basic control rules. *European Journal of Operational Research* 103: 55–82.
- Martin, A. J. 1992. *DRP: Distribution Resource Planning: The Gateway to True Quick Response and Continuous Replenishment*. John Wiley & Sons.
- Yager, R. R., and L. Liu eds. . 2008. *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.