

Modèle linéaire pour le lissage de charge d'une plateforme logistique

S. Carrera¹, K. Chami¹, R. Guimaraes²,
M.C. Portmann¹ and W. Ramdane Cherif¹

¹ LORIA UMR 7503, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt, CS 14234, 54042
France Cedex

khalida_chami@hotmail.com, carrersu@loria.fr, portmann@loria.fr
ramdanec@loria.fr

² Groupe ICN, ESIDEC, 3 place Edouard Branly, 57073 METZ CEDEX 3
renato.guimaraes@icn-groupe.fr

Résumé Ce travail a été développé suite à un audit d'une plateforme logistique d'une société de distribution de chaussures. Il a conduit à concevoir un ensemble d'outils d'aide à la décision pour le lissage des charges de travail de la plateforme en autorisant une remise en cause limitée des dates d'arrivées des livraisons fournisseurs et des dates de départ des livraisons vers les magasins, ainsi qu'un ajustement de la capacité de travail sous la forme de personnels interimaaires. Deux millions d'articles élémentaires traversent la plateforme chaque année avec deux pointes saisonnières importantes. Nous nous plaçons au niveau de la gestion des flux, les inconnues liées aux produits sont des quantités à manipuler (nombres de boîtes ou volumes des boîtes). L'objectif est de proposer un modèle de programmation linéaire le plus générique possible afin qu'il puisse être adapté et utilisé pour le pilotage d'une multitude de plates-formes et entrepôts où la main d'oeuvre humaine est importante et la charge prévisible mais non stationnaire. Ce modèle permet non seulement de lisser la charge des structures d'entreposage mais peut être employé afin de comparer différents scénarios d'agencements de la plateforme et de l'organisation du travail associé, car l'audit a fait apparaître un nombre trop élevé de manipulation des articles au sein de la plateforme.

Mots-Clefs. Modélisation ; Optimisation ; Programmation linéaire ; Planification ; Gestion des flux ; Lissage de charge ; Négociation de délais.

1 Introduction

Ce travail a été développé suite à un audit d'une plateforme logistique. Plus de deux millions de paires de chaussures traversent cette plateforme chaque année. La plateforme reçoit toutes les chaussures de la chaîne de distribution en provenance des fournisseurs ; elle en stocke une petite partie et envoie le reste vers 90 magasins. Les contenus et les dates de livraisons en provenance des fournisseurs sont négociées avec eux par l'entreprise de distribution. Par contre,

elle est totalement maître de l'organisation des tournées de livraisons vers les magasins. Deux fois par an, saison été et saison hiver, les magasins reçoivent une première livraison des nouveaux produits, par la suite, ils recevront quelques compléments, pris sur la réserve ou retirés d'autres magasins, pour réassortir les pointures. L'outil de lissage de charge est principalement dédié aux deux périodes de pointes, s'étalant sur plusieurs semaines, qui correspondent aux premières livraisons des produits vers les magasins et qui nécessitent un nombre important de personnels intérimaires sur la plateforme. La figure 1 présente les flux externes du cas concret considéré.

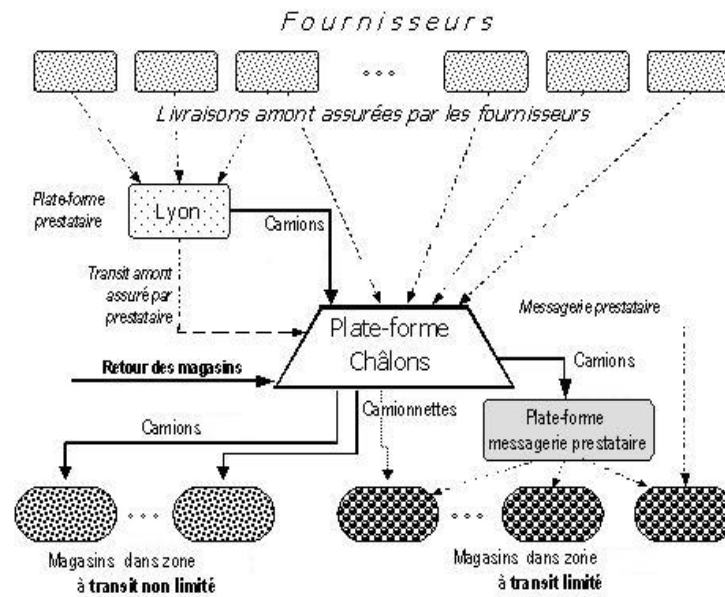


FIG. 1. Flux externes de la plateforme logistique

La littérature associée à ce travail concerne l'optimisation de plateformes logistiques, mais aussi plus généralement l'optimisation de la gestion des flux à moyen terme. Dans notre recherche bibliographique sur les plateformes logistiques (voir Chami [5]), nous avons trouvé de nombreux papiers sur l'optimisation du débit des plateformes en fonction de leur agencement et de la manière de réaliser le picking pour préparer les expéditions (voir l'état de l'art de Van Den Berg [13] ainsi que Chen [6], Bartholdi et Gue [1], Petersen et Aase [11] et le livre de Mocellin [9]) mais nous n'avons rien trouvé sur le lissage de charges avec ou sans négociation des dates livraisons en amont et en aval de la plateforme. Dans les articles sur la gestion des flux à moyen terme, nous avons trouvé de nombreux modèles de programmation linéaire (voir Belvaux [2], Billington [3]...) afin de lis-

ser les charges des postes de travail et quelques modèles incluant de la négociation ou de la coopération (voir Dauzère [7] et Ouzizi [10]). Nous devons poursuivre notre recherche bibliographique en ce qui concerne les modèles linéaires incluant des contraintes humaines et sociales. A notre connaissance, il n'existe pas de modèles de programmation linéaire permettant de négocier des arrivées ou des départs de tournées de livraison associées à une plateforme logistique, ce qui devient nécessaire lorsque le système de décision n'est plus totalement centralisé. La problématique que nous traitons dans cette étude n'a, apparemment, jamais été abordée sous cet angle. Le caractère "moyen terme" de ce type de décision nous a conduits tout naturellement à utiliser la programmation linéaire. Nous avons aussi souhaité construire un modèle suffisamment générique pour être appliqué à plusieurs types de structures de stockage ou d'éclatement, ceci afin de représenter les différentes contraintes liées à ces dernières et afin d'obtenir une solution générique de lissage de charge.

La suite du papier est structurée en trois sections. La section 2 décrit l'organisation générale des zones de stockage et des postes de travail d'une plateforme logistique comportant une partie réserve (entrepôt) et considère les différents types de flux qui peuvent traverser la plateforme. Elle présente également les différentes contraintes industrielles qui doivent être intégrées dans le problème du lissage de charge, ainsi que les critères à optimiser. La section 3 propose un modèle de programmation linéaire qui a été testé sur de petits exemples simplifiés. Pour finir, la section 4 examine les nombreuses extensions qui peuvent être encore apportées à notre modèle, en considérant que selon la durée choisie pour l'unité de temps du modèle, les contraintes sociales et humaines doivent être ajustées.

2 Description de la gestion des flux d'une plateforme logistique

2.1 L'entrepôt et ses différentes zones fonctionnelles

Pour Huragu [8], l'entrepôt est découpé en quatre zones fonctionnelles principales, à savoir :

- La zone d'entreposage ou "*bulk storage area*" : c'est là où sont entreposés les produits par types, par références, etc.
- La zone de transit ou de "*cross-docking*" : le cross-docking est le processus qui consiste à faire passer les cartons, palettes ou tout autre type de conditionnement, des camions de réception vers ceux d'expédition. Le pourcentage de "cross-docking" est de 20% pour l'entrepôt industriel à l'origine de nos travaux et ne peut malheureusement plus être augmenté.
- La zone de picking ou "*forward area*" : généralement de taille réduite pour faciliter les opérations, la zone de picking rapide contient les produits les plus demandés.
- La réserve ou "*reserve area*" : c'est l'endroit où sont stockés les produits dans leur conditionnement d'arrivée (en fait déballés en ce qui concerne notre application) lorsque leur expédition n'est pas immédiate.

2.2 La description des flux dans un entrepôt

Les quatre principaux flux d'un entrepôt sont illustrés par la figure 2 (voir Rouwenhorst [12]).

- **Flux 1** : le cross-docking est utilisé lorsque les produits doivent passer peu de temps dans l'entrepôt (voir Barth [1], Chen [6]). Il n'y a pas d'opérations de conditionnement ;
- **Flux 2** : les produits entrant sont directement stockés dans la réserve. Ce sont généralement, des produits qui doivent séjourner pendant une période assez longue dans l'entrepôt ;
- **Flux 3** : les produits sont d'abord stockés dans la réserve (généralement sur des palettes). Ils sont transférés (avec ou sans conditionnement) vers la zone de picking ultérieurement ;
- **Flux 4** : il s'agit d'une variante du cross-docking. Les produits reçus passent dans la zone de picking pour des opérations de groupage et de consolidation des ordres de livraison.

Notre modèle linéaire peut prendre en compte tous les types de flux. Pour le problème industriel considéré, nous avons environ 20% de flux 1, 80% de flux 3 dans l'organisation de la plateforme au moment de l'audit, car tous les produits passent par la réserve. Dans la nouvelle organisation de la plateforme, une grande partie du flux 3 doit devenir du flux 4 en augmentant la zone de travail du picking de manière à ré-expédier le plus rapidement possible les produits qui arrivent aux périodes de pointe et à diminuer le nombre de manutentions des palettes de chaussures.

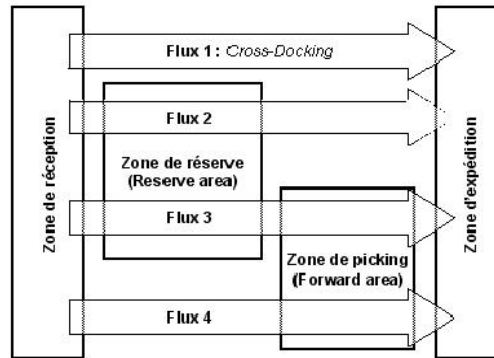


FIG. 2. Les différents flux présents dans un entrepôt

2.3 Modélisation des activités d'un entrepôt

Comme dans toute gestion de flux à moyen terme, nous distinguons deux types principaux d'entités dans notre modélisation : les zones de stockage et les activités qui déplacent des produits d'une zone de stockage vers une autre zone de stockage en apportant éventuellement une valeur ajoutée aux produits déplacés, comme contrôles, déballages, regroupements... Nous avons considéré ici qu'une livraison fournisseur était assimilable à une activité qui dispose d'un stock (sur le camion à son arrivée) virtuellement disponible pour l'activité de déchargement. Il en est de même de manière symétrique pour les livraisons aux clients. Nous supposons également que le pourcentage de produits du flux 3 qui doit être envoyé en réserve (et qui ne sortira de la réserve qu'après l'horizon de notre modèle) est aspiré par la réserve par une activité de type "réserve" à exécuter avant la fin de l'horizon. En travaillant à moyen terme, nous sommes également obligés de choisir une unité de temps dont la longueur est notée ici Δ (selon la granularité de la précision du modèle souhaité par les décideurs, Δ pourra être égal à une heure ou une demi-journée ou même une journée (voir Belvaux [2])), ainsi qu'un horizon H correspondant à un nombre entier de périodes de durée Δ . Δ doit être suffisamment petit pour ne pas avoir à modéliser avec précision les variations des stocks à l'intérieur d'une période.

2.4 Contraintes et critères industriels

Les ressources de la plateforme sont essentiellement des ressources humaines, il est nécessaire de tenir compte des compétences (problèmes de polyvalence et d'efficacité) ce qui conduit à concevoir des catégories de personnels que l'on peut considérer comme approximativement équivalents en ce qui concerne ce qu'ils savent faire et à quelle vitesse.

Le personnel est composé de personnes en CDI (employés de la plateforme) et de personnels intérimaires.

On peut utiliser des familles de produits sans distinguer les pointures (familles de produits qui sont appelées ici produits pour simplifier). La quantité correspondant à un colis arrivant dans un camion ou partant dans un camion est exprimée en nombre de boîtes et non pas en nombre de colis. La connaissance de la taille des colis associée à chaque produit permet de connaître la durée opératoire des activités de chargement ou de déchargement ou même de déballage en fonction du nombre de boîtes.

La capacité des zones de stockage est supposée limitée.

Le nombre de périodes d'avance ou de retard toléré pour les réceptions et les livraisons, ainsi que les pénalités réelles ou virtuelles associées, correspondant à des tournées fournisseurs ou magasins sont supposées connues (en fait calculées par un prétraitement).

Les compétences et le niveau de polyvalence du personnel sont pris en considération et selon la granularité du modèle les regroupements par compétences identiques sont plus ou moins importants (voire une seule personne par catégorie).

3 Modèle de programmation linéaire

La planification fait intervenir un certain nombre d'informations. Elle part de données physiques et comptables pour aboutir à une programmation prévisionnelle.

Données physiques :

- stocks initiaux et réceptions attendues;
- livraisons prévisionnelles des fournisseurs et vers les clients (quantités par produits, dates d'arrivées ou de départs prévus des tournées);
- volume de main d'oeuvre disponible par qualification et par période.

Les données comptables sont essentiellement les estimations de coûts associés au salaire des personnels par catégorie de compétence (en mettant dans des catégories différentes le personnel intérimaire et le personnel permanent).

Les résultats attendus de la programmation prévisionnelle sont :

- flux de produits manipulés dans l'entrepôt à chaque période et pour chaque activité;
- utilisation des ressources (dans notre cas il s'agit de ressources humaines);
- charge de travail à chaque période par catégorie de personnel;
- nombre de personnes intérimaires à prévoir par période : nous avons supposé ici que la granularité du modèle (en ce qui concerne les catégories de personnel) ne permettait pas de traiter avec pertinence les heures supplémentaires et que toute surcharge acceptée était absorbée par du personnel intérimaire.
- dates de livraisons.

3.1 Modèle linéaire

Paramètres :

Δ	unité de temps
NT	ensemble des indices du temps
$nt = \text{card}(NT)$	nombre d'unités de temps dans l'horizon temporel
$t \in NT$	indice représentant un instant quelconque
NZ	ensemble des indices de zones de stockage
$nz = \text{card}(NZ)$	nombre de zones de stockage
$z \in NZ$	indice désignant une zone de stockage quelconque
NW	ensemble des indices des catégories de personnel
$nw = \text{card}(NW)$	nombre de catégories de personnel
$w \in NW$	indice désignant une catégorie de personnel quelconque
NP	ensemble des indices des types de produits
$np = \text{card}(NP)$	nombre de types de produits différents
$p \in NP$	indice désignant un type de produit quelconque

NO	ensemble des indices des opérations
$no = card(NO)$	nombre d'opérations
$o \in NO$	indice désignant une opération quelconque
NLF	ensemble des indices des livraisons fournisseurs
$nlf = card(NLF)$	nombre de livraisons fournisseurs
$lf \in NLF$	indice désignant une livraison fournisseur
NLC	ensemble des indices des livraisons clients
$nlc = card(NLC)$	nombre de livraisons clients
$lc \in NLC$	indice désignant une livraison client
$NL = NLF \cup NLC$	ensemble des indices des livraisons
$\ell \in NL$	indice représentant une livraison quelconque
$NA = NO \cup NL$	ensemble des indices activités : opérations, livraisons fournisseurs, livraisons clients
$a \in NA$	indice représentant une activité quelconque
VZ_z	capacité de la zone z
VP_p	volume d'une boîte du produit p
$TU_{o,p}$	durée minimale de traitement d'une unité de produit p pour l'opération o
$E_{w,o,p} \leq 1$	efficience du personnel de catégorie w pour effectuer l'opération o sur le produit p
$SI_{p,z}$	stock initial du produit p dans la zone de stockage z
$QP_{\ell,p}$	quantité de produit p , livrée par la livraison ℓ
TS_{ℓ}	date souhaitée de la livraison ℓ
CAA_{ℓ}	pénalité d'avance d'une unité de temps Δ par rapport à la date de livraison prévue pour les fournisseurs ou clients de la livraison ℓ
$CR_{\Delta_{\ell}}$	pénalité de retard d'une unité de temps Δ par rapport à la date de livraison prévue pour les fournisseurs ou clients de la livraison ℓ
$MAXA_{\ell}$	nombre maximal d'unités de temps d'avance accordé par le fournisseur ou client le plus exigeant de la livraison ℓ
$MAXR_{\ell}$	nombre maximal d'unités de temps de retard accordé par le fournisseur ou client le plus exigeant de la livraison ℓ ¹

¹ Les quatre données précédentes à savoir : les pénalités d'avance ou de retard de chaque livraison, ainsi que le temps maximal d'avance ou de retard accordé pour chacune de celles-ci font l'objet d'un prétraitement. C'est-à-dire que d'après les fournisseurs (respectivement clients) associés à chaque livraison ainsi que les produits qui la constituent nous devons définir une pénalité moyenne par période et par livraison ainsi que des délais accordés par livraison.

$LZE_{a,z}$	matrice définissant si l'activité a augmente (ou diminue) le stock z (0 si il n'y a pas de relation entre l'activité et le stock, 1 si elle l'augmente, -1 si elle le diminue)
$NORMnrh_{w,t}$	nombre souhaité de personnes de catégorie w à la plate-forme pendant la période t
$MAXnrh_{w,t}$	nombre maximal de personnes de catégorie w à la plate-forme pendant la période t
$MAXTW\Delta$	temps maximal de travail pendant une unité de temps Δ
$CUch$	coût (fictif) d'augmentation (ou de réduction) de la charge totale de travail d'une unité
$CUnrh_w$	coût supplémentaire engendré par le travail d'une personne supplémentaire de catégorie w pendant une unité de temps.

Variables :**Variables de décision :**

$Q_{a,p,t}$	quantité de produit p , traitée par l'activité a pendant la période t
$TW_{w,o,p,t}$	temps (exprimé en unités de temps élémentaires) que passe le personnel de catégorie w , sur l'opération o , le produit p pendant la période de temps t
$Decal_{\ell,t}$	variable égale à 1 si la livraison ℓ arrive en t et 0 sinon
$nrh_{t,w}$	nombre d'employés de catégorie w à la plate-forme pendant la période t

Variables d'état :*Variables liées au niveau de stocks :*

$S_{z,p,t}$	stock de produit p dans la zone de stockage z en fin de période t
-------------	---

Variables liées au calcul de charge :

Ch_t	charge de travail à la plate-forme pendant la période t
$MoyCh$	charge de travail moyenne sur l'horizon temporel
$MaxCh_t$	écart entre la charge moyenne et la charge en t lorsque celle-ci est supérieure à la moyenne
$MinCh_t$	écart entre la charge moyenne et la charge en t lorsque celle-ci est inférieure à la moyenne

Variables liées au calcul du décalage des dates de livraison :

T_{ℓ}	date réelle de la livraison ℓ
RT_{ℓ}	nombre d'unité de temps de retard d'une livraison par rapport à sa date prévue
AV_{ℓ}	nombre d'unité de temps d'avance d'une livraison par rapport à sa date prévue

Contraintes :**Bornes sur les variables :**

$$\forall a, \forall t, \forall p \quad Q_{a,p,t} \geq 0 \quad (1)$$

$$\forall w, \forall o, \forall p, \forall t \quad TW_{w,o,p,t} \geq 0 \quad (2)$$

$$\forall z, \forall p, \forall t \quad S_{z,p,t} \geq 0 \quad (3)$$

$$\forall \ell \quad 0 \leq T_\ell \leq nt \quad (4)$$

$$\forall w, \forall t \quad NORMnrh_{w,t} \leq nrh_{w,t} \leq MAXnrh_{w,t} \quad (5)$$

$$\forall t \quad MaxCh_t \geq 0, MinCh_t \geq 0 \quad (6, 7)$$

$$\forall \ell \quad 0 \leq AV_\ell \leq MAXA_\ell, 0 \leq RT_\ell \leq MAXR_\ell \quad (8, 9)$$

Variation des stocks et contraintes de capacité :

$$\forall z, \forall p \quad S_{z,p,0} = SI_{z,p} \quad (10)$$

$$\forall z, \forall p, \forall t \quad S_{z,p,t} = S_{z,p,t-1} + \sum_{a \in NA} LZE_{a,z} \times Q_{a,p,t} \quad (11)$$

$$\forall z, \forall t \quad \sum_{p \in NP} S_{z,p,t} \times VP_p \leq VZ_z \quad (12)$$

Les contraintes (11) et (12) représentent les relations entre les stocks et les opérations qui diminuent et qui augmentent ce stock sur l'ensemble des périodes en prenant en compte la zone de stockage alloué à ce stock. Les camions arrivés à la plate-forme sont considérés comme des stocks, la valeur de ce stock est égale au volume de produits dans le camion, la livraison fournisseur est considérée comme une opération qui augmente ce stock, et le déchargement une opération qui le diminue. Il sera de même pour les livraisons clients dont la valeur sera égale à un stock final.

Avances et retards sur les livraisons :

$$\forall \ell \quad \sum_{t \in NT} Decal_{\ell,t} = 1 \quad (13)$$

$$T_\ell = \sum_{t \in NT} t \times Decal_{\ell,t} \quad (14)$$

$$AV_\ell \geq TS_\ell - T_\ell, RT_\ell \geq T_\ell - TS_\ell \quad (15,16)$$

Les contraintes (13) à (14) représentent les contraintes de négociation amont et aval. Dans (13), nous exprimons le fait que la livraison peut être décalée à une et une seule position temporelle et qu'elle ne peut pas être fractionnée en plusieurs livraisons. Il est à noter que si Δ est très petit, on pourra n'autoriser le décalage de la livraison qu'à certaine période correspondant à des horaires où on accepte de décharger ou de charger des camions; il suffit d'ajouter des paramètres binaires, bornes supérieures de $Decal_{\ell,t}$, qui indiquent les emplacements temporelles permis ou interdits. La contrainte (14) donne la date de livraison après négociation. Les contraintes 15 et 16 permettent de calculer l'avance et le retard de la période retenue par rapport à la date souhaitée TS_ℓ . Le calcul ne sera exact que si on pénalise cette avance et ce retard dans la fonction objectif.

Liaison entre les livraisons prévues et les flux manipulés :

$$\forall p, \forall \ell, \forall t \quad Q_{\ell,p,t} = QP_{\ell,p} \times Decal_{\ell,t} \quad (17)$$

La contrainte (17) permet de calculer, pour chaque produit et chaque livraison, les quantités réelles de livraison arrivant à une période donnée après négociation de la date de livraison.

Satisfaction de la charge :

$$\forall o, \forall t, \forall p \quad TU_{o,p} \times Q_{o,p,t} \leq \sum_{w: E_{w,o,p} \neq 0} TW_{w,o,p,t} \times E_{w,o,p} \quad (18)$$

$$\forall w, \forall t \quad \sum_{o \in NO} \sum_{p \in NP} TW_{w,o,p,t} \leq nrh_{w,t} \times MAXTW \Delta \quad (19)$$

La contrainte (18) est une contrainte de satisfaction de la charge. Cette contrainte prend en compte la polyvalence du personnel en regroupant ces derniers par catégorie w . Le temps de travail nécessaire pour réaliser un produit p d'une opération o change d'une catégorie à une autre. La contrainte de respect d'un temps maximum de travail sur une unité de temps Δ est donnée par la contrainte (19)

Contraintes liées aux compétences

$$\forall w, \forall o, \forall t, \forall p \quad TW_{w,o,p,t} \leq E_{w,o,p} \times M \quad (20)$$

Cette contrainte permet de ne pas affecter une opération o sur un produit p à une catégorie w si cette catégorie n'a aucune compétence pour la réaliser, c'est-à-dire que $E_{w,o,p} = 0$.

Contraintes liées au calcul de charge

$$Ch_t = \sum_{w \in NW} \sum_{o \in NO} \sum_{p \in NP} TW_{w,o,p,t} \quad (21)$$

$$MoyCh = \frac{1}{nt} \sum_{t \in NT} Ch_t \quad (22)$$

$$MaxCh_t = MoyCh - Ch_t \quad (23)$$

$$MinCh_t = Ch_t - MoyCh \quad (24)$$

Fonctions objectifs intermédiaires :

Notre problème est multi-critères. Nous avons dégagé trois indicateurs : le lissage de charge, les pénalités d'avance et de retard pour les livraisons clients et fournisseurs et la minimisation du nombre de personnel. Ces trois critères peuvent être pondérés dans la fonction objectif finale par les paramètres α , β et γ

Lissage de charge :

$$\text{Min } \sum_t (MaxCh_t + MinCh_t) CUch$$

Minimiser les pénalités de décalage des dates de livraison :

$$\text{Min } \sum_{\ell \in NL} (AV_\ell \times CA\Delta_\ell) + (RT_\ell \times CR\Delta_\ell)$$

Minimiser le nombre de personnes :

$$\text{Min } \sum_t \sum_w (nrh_{w,t} - NORMnrh_{w,t}) \times CUnrh_{w,t}$$

Fonction objectif : (correspond à l'agrégation des critères précédents)

$$\text{Min } \alpha(\sum_t (MaxCh_t + MinCh_t) \times CUch) + \beta(\sum_{\ell \in NL} (AV_\ell \times CA\Delta_\ell) + (RT_\ell \times CR\Delta_\ell)) + \gamma(\sum_t \sum_w (nrh_{w,t} - NORMnrh_{w,t}) \times CUnrh_{w,t})$$

CUch est un coût fictif, on peut l'augmenter ou le diminuer selon l'importance que l'on veut donner au lissage de charge. Il joue en quelque sorte le même rôle que les α , β et γ mais il est maintenu pour que les équations soient homogènes en terme de coûts.

3.2 Compléments d'explication liées aux contraintes

- (1,2,3) Contraintes de positivité
- (4) Les dates de livraisons doivent être à l'intérieur de l'horizon temporel
- (5) Le nombre de personnes par catégorie doit être compris entre le nombre de permanents et le nombre maximum autorisé (incluant les intérimaires)
- (6,7) Contraintes de positivité
- (8,9) On ne peut pas avancer une livraison de plus de $MAXA_\ell$ (resp. $MAXR_\ell$) le nombre d'unités de temps d'avance (resp. retard) toléré qui lui est associé
- (10) Le stock à la première période de chaque zone est égal au stock initial, qui est une donnée
- (11) Le stock relatif à un type de produit et une zone de stockage, à une période donnée, est égal au stock à la période précédente plus (ou moins) les quantités traitées par les opérations qui modifient ce stock
- (12) Le stock de tous les produits dans une zone de stockage à une période doit être inférieur à la capacité de cette zone (la capacité est donnée en volume car toutes les boîtes de produits n'ont pas le même volume)

- (13) Une livraison est entièrement décalée à une seule autre date
- (14) Comme la livraison ne peut être décalée que vers une seule autre date, $Decale_{\ell,t}$ n'est égal à 1 que pour un seul t , et le fait de multiplier $Decale_{\ell,t}$ par t nous donne la date de livraison réelle
- (15,16) Lorsque la date calculée est antérieure (resp. postérieure) à la date prévue c'est une avance AV_{ℓ} (resp. retard RT_{ℓ})
- (17) Liaison entre les livraisons prévues et les flux manipulés
- (18) La somme du temps passé par toutes les catégories sur une opération doit être supérieure ou égale à la charge de travail pour cette opération à la période t pour chaque produit p
- (19) Quelque soit la catégorie et la période de temps, la charge de travail doit être inférieure ou égale au nombre de personnes présentes qui travailleraient un maximum de temps
- (20) Si l'efficacité d'une catégorie est nulle pour une opération, alors la catégorie n'est pas affectée à celle-ci

4 Expérimentations, conclusions et perspectives

Nous avons appliqué ce modèle linéaire (sous une forme légèrement simplifiée en ce qui concerne les catégories de personnel) sur deux organisations différentes de la plateforme. La première organisation est l'organisation actuelle qui consiste à déballer tous les produits qui arrivent, à contrôler la conformité entre la commande et la livraison fournisseur et à tout mettre dans la réserve. Les mêmes produits sont repris de manière indépendante par les *pickers* qui en fonction des bons de livraisons magasins sillonnent avec des chariots à roulettes entre les rayons de la réserve (agencement en peigne) pour préparer les livraisons. Des contrôleurs vérifient le contenu de chaque chariot et les chariots sont expédiés par camions vers les magasins. La deuxième organisation, à n'utiliser que pendant les deux périodes de pointe, consiste à déballer les produits et à vérifier la conformité commande-livraison, mais ensuite de passer directement produit par produit des tables de déballage aux chariots clients qui sont complétés progressivement à chaque livraison et mis dans les camions au moment de la livraison client correspondante. Les expérimentations que nous avons faites, sur des données générées aléatoirement en respectant les ordres de grandeur du cas concret, montrent que l'on peut lisser la charge de travail en modifiant (légèrement) les dates de livraison amont et aval. Elles ne montrent pas de manière suffisamment significative que la deuxième organisation est pertinente : elle nécessite un espace plus important ce qui induit des risques plus grands d'accident (mesure qualitative) pour un gain mesuré en coût de main d'oeuvre.

Nous avons proposé un modèle de programmation linéaire pour le lissage de charge de plateformes logistiques qui joue non seulement sur la planification proprement dite, mais également sur les capacités en ressources humaines, et aussi sur la possibilité de négocier que des tournées de livraison amont et/ou aval soient totalement avancées ou reculées. Nous allons compléter ce modèle en autorisant également que les quantités liées à une livraison soient modifiées.

Par ailleurs, nous poursuivons cette recherche d'outils d'aide à la décision pour le lissage de charge dans les systèmes de production (plateformes logistiques ou ateliers) impliquant de nombreuses tâches manuelles, en cherchant d'une part à adapter les contraintes humaines et sociales à la granularité de la précision du modèle et d'autre part à assurer les liens de manière hiérarchique entre les modèles de granularités différentes.

Références

1. Bartholdi J.J. et Gue K.R. : The best shape for a crossdock. *Transportation Science*, vol. 38, pp. 235-244, (2004)
2. Belvaux G. and Wolsey L.A. : Modelling practical lot-sizing problems as mixed integer programs. *Management Science*, vol. 47, pp. 993-1007, (2001)
3. Billington P.J., McClain J.O. and Thomas L.J. : Heuristics for multilevel lot-sizing with a bottleneck. *Management Science*, 32(8) pp. 989-1006,(1986)
4. Brewer P.C. et Speh T.W. : Using the balanced scorecard to measure supply chain performance. *Journal of Business Logistics*, vol. 21, pp. 75-93, (2000)
5. Chami K. : Lissage de charge dans une plateforme logistique. Mémoire bibliographique et mémoire de master recherche CII, Metz, (2007)
6. Chen P., Guo, Y., Lim A. et Rodrigues B. : Multiple crossdocks with inventory and time windows. *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp. 43-63, (2006)
7. Dauzère-Pérès S. et Lasserre J.B. : On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. *International Transactions in Operational Research*, vol. 9(6) pp. 779-793, (1999)
8. Huragu S.S, Du L., Mantel R.J. et Shuur P.C. : Mathematical model for warehouse design and production allocation. *International Journal of Production Research*, vol. 43, pp. 327-338, (2005)
9. Mocellin F. : Gestion des entrepôts et plates-formes. Paris, Dunod (2006)
10. Ouzizi L. : Planification par négociation dans un système de décision semi-distribué pour une entreprise en réseau. Thèse de l'Université de Metz (2005)
11. Petersen C.G. et Aase G. : A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal Production Economics*, vol. 92, pp. 11-19 (2004)
12. Rouwenhorst B., Reuter B., Stockrahm V., Van Houtum G.J., Mantel R.J. et Zijm W.H.M. : Warehouse design and control : framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, vol. 122, pp. 515-533, (2000)
13. Van Den Berg J.P. et Zijm W.H.M. : Models for warehouse management : classification and examples. *International Journal Production Economics*, vol. 59, pp. 519-528, (1999)