

Optimisation des plannings des affectations multi niveaux des flux des céréales importées

Houssemeddine Mkaouar, Khaled Mesghouni

► **To cite this version:**

Houssemeddine Mkaouar, Khaled Mesghouni. Optimisation des plannings des affectations multi niveaux des flux des céréales importées. e-STA Sciences et Technologies de l'Automatique, SEE - Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication 2009, 6 (3), pp.1-8. <hal-00817255>

HAL Id: hal-00817255

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00817255>

Submitted on 24 Apr 2013

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.

Optimisation des plannings des affectations multi niveaux des flux des céréales importées

Houssemeddine MKAOUAR, Khaled MESGHOUNI

Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal
Ecole Centrale de Lille, BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

mkaouar.h@gmail.com, khaled.mesghouni@ec-lille.fr

Résumé – Dans cet article on s'intéresse aux problèmes de prise de décision dans le domaine de la distribution des céréales en Tunisie notamment ceux relatifs à la planification et à l'affectation multi niveaux des céréales importées. L'objectif est d'optimiser la gestion d'une entité de la chaîne logistique céréalière depuis l'approvisionnement (importation) jusqu'à la vente aux clients (minoteries, semouleries,...) en passant par trois niveaux d'affectation. A cet effet on a développé une approche de résolution basée sur la décomposition du problème en deux sous problèmes complémentaires et on a adopté le principe du chaînage arrière (flux tiré). Cette démarche a permis de réduire la complexité et la taille du problème global sans pour autant mettre en cause la qualité de la solution recherchée. Ainsi, la formulation mathématique des deux sous problèmes a permis de dégager les fonctions à optimiser et les contraintes à respecter. Devant le dilemme du choix d'une méthode de résolution, on s'est orienté vers l'adaptation d'une méthode exacte, notamment l'algorithme de Simplex auquel on a apporté une extension afin de relaxer les contraintes non linéaires. Enfin, les résultats numériques fournis par cette approche ont montré que cette dernière engendre des économies pouvant atteindre jusqu'à 20% sur les coûts alloués au transport des céréales

Mots-clés – optimisation, logistique, affectation multi niveau, céréales, prévision, approvisionnement, silos, planification.

I. INTRODUCTION

Le management de la chaîne logistique devient l'un des facteurs majeur de la compétitivité des entreprises, tant pour la maîtrise des coûts que pour celle des niveaux de services. L'ouverture des marchés, le développement des infrastructures et l'émergence des nouvelles possibilités en matière d'échange de données conduisent un nombre croissant d'entreprises à définir leurs activités en termes de flux matières et informationnels. Le management de la chaîne logistique intègre les flux d'approvisionnement, de production et de distribution dans un système globale cohérent et rentable.

C'est dans le cadre de la mise à niveau et de la promotion de la filière céréalière que l'on s'est proposer d'orienter nos recherches afin d'optimiser la gestion d'une entité de la chaîne logistique d'une entreprise céréalière en Tunisie depuis l'approvisionnement (essentiellement de l'importation) jusqu'à la distribution et la vente aux clients (minoteries, semouleries...).

Le but de cette étude est la conception et le développement de modèles et méthodes d'aide à la prise de décision, notamment pour la génération des plans réactifs et optimisés des affectations des flux céréaliers importés, de manière à satisfaire les commandes des clients tout en optimisant les flux matières et la gestion des stocks dans les silos portuaires et de replis ainsi que les coûts logistiques liés au transport des céréales.

Le diagnostique et l'analyse des procédures de gestion, de transport ainsi que les caractéristiques des composantes dynamiques comme la période de décision, l'horizon de planification, la somme des quantités à importer, les dates d'importation, les fluctuations des prix boursiers des flux matières (céréales) et des flux informationnels ont permis de délimiter les frontières du problème à traiter.

Vu la complexité et la taille du problème, on a développé une stratégie de résolution basée sur la décomposition du problème en sous problèmes relié en adaptant les flux d'entrées (somme des quantités prévisionnelle à importer) aux flux de sorties (commandes prévisionnelles des clients), un modèle mathématique est établi pour chaque sous problèmes. L'implémentation de l'algorithme de résolution est réalisée sur Matlab 6.0, les résultats numériques démontrent que l'approche utilisée engendre des économies pouvant atteindre jusqu'à 20% sur les coûts alloués au transport des céréales importées.

II. POSITIONNEMENT ET STRATEGIE DE RESOLUTION

A. Positionnement

Le problème que nous abordons traite principalement du transport des flux des céréales importés et de leurs lieux d'affectations. C'est un problème fortement combinatoire avec trois niveaux d'affectations et qui est caractérisé par deux composantes importantes : le routage et l'affectation.

Le problème d'affectation est un problème d'optimisation combinatoire classique connu comme étant NP-difficile. Dans le problème d'affectation classique, le terme "affectation" décrit la meilleure façon d'affecter n opérateurs à m tâches. Ce type de problème, qui a été largement étudié dans la littérature [1, 2, 3, 4, 5], est présent dans tous les domaines comme la GPAO, l'informatique, les problèmes de routage des véhicules etc. Généralement, la complexité des problèmes d'affectation augmente avec la taille des données.

Les classes de problèmes d'affectations, les plus répondus dans la littérature sont : les problèmes généraux d'affectations (GAP), les problèmes d'affectations multi niveaux (MGAP), les problèmes d'affectations à ressources multiples (MRGAP) et les problèmes dynamiques d'affectations (DAP).

Le problème d'affectation multi niveaux a été traité par Glover, Hultz et Klingman (1979) [6]. Le MGAP consiste à assigner n tâches à m opérateurs avec un maximum de l niveaux. Chaque tâche j doit être assignée à un seul et unique opérateur i à un niveau k . Chaque opérateur i est limité par une capacité (ressource) b_i . Un opérateur i peut lui être affecté plus d'une tâche, mais la somme des ressources requises pour satisfaire cette affectation ne doit pas excéder b_i . La ressource

requis a_{ijk} pour une tâche particulière dépend de l'opérateur à qui elle sera assignée et du niveau auquel elle sera affectée. Le coût d'affectation est noté c_{ijk} .

Les problèmes d'affectations à ressources multiples (MRGAP) sont utilisés pour modéliser une large variété d'applications à ressources multiples, comme par exemples, la planification de l'emplacement de base de données distribuées [7], le chargement de cargaison, la conception d'entrepôt, la planification de travail, l'ordonnancement des cours, la conception de réseau de télécommunications, les applications incluant le transport, etc. [5].

Gravish et Pirkul [8] présentent un ensemble de méthodes de résolution pour les MRGAP basées sur la relaxation Lagrangienne. M. Yagiura, S. Iwasaki et T. Ibaraki [9] ont développé une méta-heuristique basée sur la recherche taboue et les algorithmes de voisinage.

En addition aux méthodes exactes de résolution [10, 11], on trouve plusieurs heuristiques qui ont données des résultats de bonne qualité pour les problèmes de moyenne et de grande taille [12, 13]. Leurs performances ont été récemment moins mises en valeur par l'émergence des nouvelles procédures exactes de résolution. Comme la méthode basée sur le "Branch and Price" algorithm utilisant l'approche de génération de colonnes développé par Savelsberg [10]. Nausa a utilisé une approche combinant la méthode de coupe, la relaxation lagrangienne, et la méthode de sous gradient, pour réduire le temps effectif de résolution [11].

B. Stratégie de résolution

Actuellement, les plannings d'affectation et de vente des céréales sont élaborés sur une base de subdivision géographique du territoire. L'approche est empirique et se base sur l'expérience des opérateurs pour l'estimation des différents coûts qu'il faut minimiser lors des actions de transfert.

L'élaboration du planning de transfert est effectué par le responsable du service transport, suite à un besoin de transfert (rapprochement des blés aux minoteries, nécessité de créer des vides notamment dans les silos portuaires, etc.). Ces plannings sont quasi-systématiques (répondant au coût par coût à la demande). La mauvaise gestion du temps lors de l'élaboration de ces plannings génère un goulot d'étranglement dans les silos portuaires et provoque un ralentissement des cadences de déchargement des navires.

Le synoptique de la problématique est présenté par la figure 1.

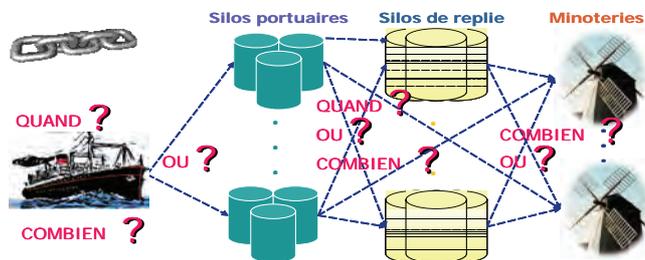


Figure 1 : structure de la chaîne logistique céréalière (cas des importations)

Suite à ces constatations, il devient nécessaire, voir urgent de mettre en place une démarche rigoureuse et fiable afin d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- déterminer les besoins prévus pour la vente,
- déterminer un plan de livraison optimal pour desservir les clients,
- calculer les quantités de blé à prévoir dans les silos de replie,

- déterminer les plannings d'importation et d'affectation des navires aux ports de déchargement de manière à optimiser les coûts de transport.

Afin de répondre à ces questions, nous adoptons la stratégie de résolution suivante :

- Elaboration d'un modèle prévisionnel des demandes mensuelles en céréales importées.
- Décomposition du problème d'affectation en deux sous problèmes complémentaires : sous problème "transfert pour vente" et sous problème "transfert pour replie".
- Résolution du problème "transfert pour vente" en tenant compte des paramètres d'équilibrage des quantités prioritaires (produit dégradé) à vendre aux minoteries; les résultats fournis constitueront les "Entrées" pour la résolution du problème de "transfert pour replie". La résolution du problème "transfert pour vente" permet de dégager un planning d'affectation mensuel prévisionnel des quantités à vendre aux minoteries, de spécifier les volumes des quantités à prévoir aux différents silos. Cette répartition des stocks inclus l'équilibrage de charges entre les silos.
- Résolution du problème "transfert pour replie" : génération des plannings d'affectation pour le transfert des céréales importées, détermination des sommes des quantités à prévoir dans les silos portuaires, et des sommes des quantités à importer dans chaque silo portuaire. La planification des flux de "transfert pour replie" est géré sur un horizon réduit (dix jours); ceci entre dans une stratégie d'affinement et de régulation des flux céréalières transférés entre les silos durant la période de vente.

III. MODELE PREVISIONNEL

A. Typologie de la demande

Dans cette étude, on examine les consommations passées des minoteries, en supposant qu'elles se reproduiront et en prenant en considération leur évolution tendancielle. On se base sur l'analyse des séries chronologiques mensuelles des quatre dernières années en faisant l'hypothèse que l'évolution ne dépend que du temps.

On donne, à titre d'exemple (figure 2), l'évolution chronologique de la demande d'une minoterie sur les quatre dernières années. A partir de l'allure de la courbe on distingue : 1- un mouvement de longue durée qui correspond à une tendance croissante. 2- des mouvements cycliques se traduisant par des oscillations de part et d'autre de la courbe de tendance. 3- des variations aléatoires résiduelles

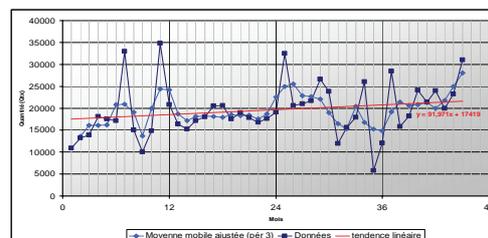


Figure 2 : évolution de la consommation du BTI pour une minoterie

L'analyse de la figure 2 ne permet pas de dégager les estimations futures des ventes, ceci est dû à la présence des variations saisonnières et résiduelles. On propose d'affiner l'analyse des séries chronologiques : on procède par une analyse mensuelle (figure 3). Ensuite on détermine les estimations futures sur un horizon d'un mois en extrapolant les

courbes de tendance basées sur la méthode de moindre carrées simple [14, 15].

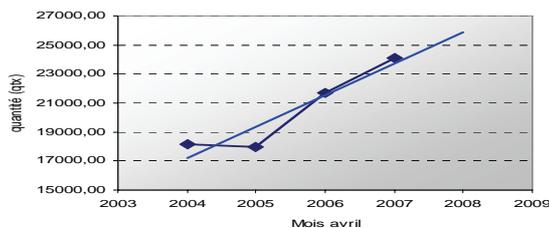


Figure 3 : prévision de la demande pour le mois d'avril 2008

B. Mesure de la qualité des prévisions

On se propose de mesurer la qualité des prévisions estimées par la méthode des moindres carrées. Connaissant les réalisations mensuelles durant les années 2004 à 2007, on adopte la méthode des moindre carrée pour estimer les ventes pour les mêmes périodes. Dans la figure 4 on met en évidence les écarts calculés entre les prévisions et les réalisations. On remarque que les écarts absolus en pourcentage (MAPE) varient entre un minimum de 0.52% et un maximum de 21%.

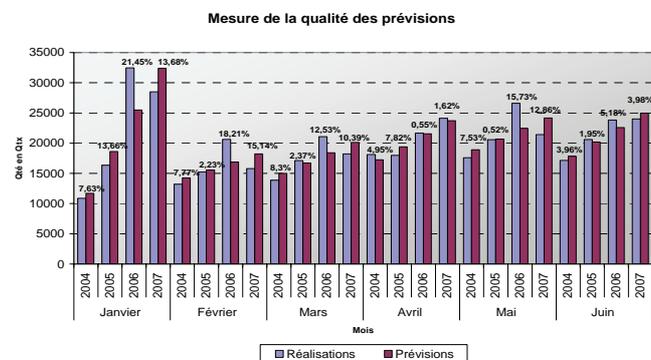


Figure 4 : écarts entre prévisions et réalisations

IV. GESTION DES APPROVISIONNEMENTS

Dans cette partie, on s'intéresse à l'optimisation de la gestion des approvisionnements des silos portuaires (nœuds d'entrées des céréales) et les silos de replis (nœuds de transit).

En se basant sur les commandes prévisionnelles mensuelles des minoteries, on détermine la somme des quantités à prévoir dans les silos de replis ; le modèle d'approvisionnement adopté est assimilé à un modèle dont la quantité à commander est variable et l'horizon d'approvisionnement est fixe.

A. Gestion des approvisionnements des silos de replis

Dans la gestion des approvisionnements d'un silo de repli, on prend en considération les estimations des demandes, l'état de stock dans le silo au moment du lancement prévisionnel de la commande, le vide disponible dans le silo qui peut être alloué au produit p , ainsi que la cadence d'enlèvement des minoteries durant la période de vente. On détermine, pour chaque produit céréalier (BDI, BTI), les quantités à compléter au stock existant dans le silo en question : $Q_{pi} = S_i - S_{ci}$

Avec S_{ci} : le niveau de stock dans le silo i au moment de la commande, Q_{pi} : la quantité de céréale p à compléter au silo i , S_i : les estimations des ventes à partir du silo i .

1. Cadence de prélèvement : D'après une analyse statistique effectuée sur le rythme de prélèvement (achat) d'un ensemble de minoterie à partir d'un silo de replie pendant un mois, On remarque que les prélèvements sont quasi uniformes durant tout le mois (figure 5). Par conséquent, on assimile les

variations des prélèvements par un modèle théorique tel qu'illustré par la figure 6.

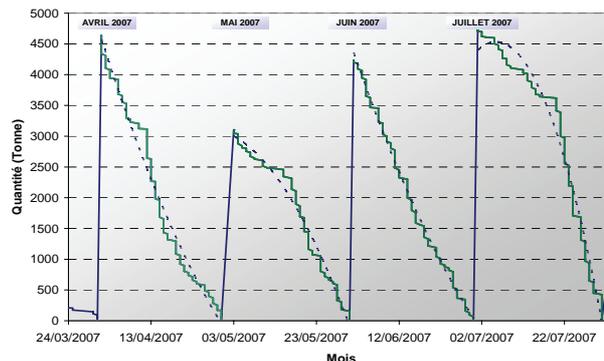


Figure 5 : cadence de prélèvement à partir d'un silo de replie

L'horizon de planification est tributaire de la quantité globale à transférer et du vide (espace de stockage libre) disponible pour contenir la quantité à replier. Donc, pour mieux contrôler et réguler les transferts des céréales importés vers les silos de replis, et pour remédier à la contrainte du manque d'espace de stockage nécessaire (vide) pour contenir les céréales à transférer, et dans l'hypothèse où les prélèvements restent uniforme durant tout le mois, on divise l'horizon de planification (un mois) sur 3 périodes égales de 10 jours qu'on nomme période de gestion (P_g).

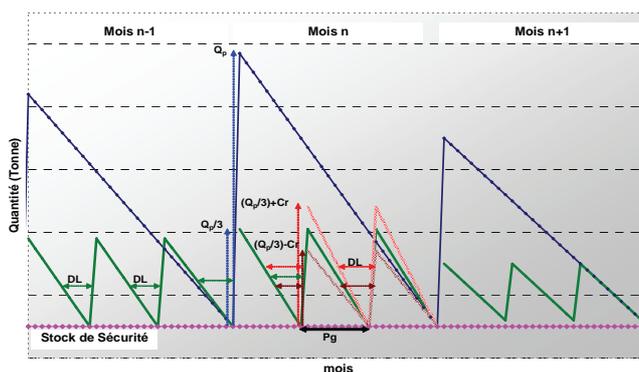


Figure 6 : modèle théorique de gestion d'approvisionnement d'un silo de replie

Les déclenchements des opérations de transfert vers les silos de replis sont déterminés en fonction des points de commande (taux moyen de consommation durant le délai d'approvisionnement). Ces derniers sont déterminés sur la base des taux moyens des ventes multiplié par les délais d'approvisionnement pour chaque silo de replie.

On calcule la quantité prévisionnelle Q_p à vendre pendant le mois n à partir de chaque silo de replie ; on divise cette quantité Q_p en trois parts égales et on calcule le point de commande de façon à ce qu'au 1^{er} jour du mois n , la quantité $Q_p/3$ soit disponible dans le silo. On corrige les quantités restantes à approvisionner au silo pour la 2^{ème} et la 3^{ème} période du mois en cours en tenant compte de la demande réelle Q_r , exprimée par les minoteries (le 1^{er} jour de chaque mois), et de la cadence moyenne de prélèvement durant la 1^{ère} période du mois. Ainsi, la quantité à approvisionner durant la 2^{ème} et la 3^{ème} période sera égale à : $(Q_r - Q_p/3)/2$.

Dans le cas où $(Q_r > Q_p)$ (respectivement $(Q_r < Q_p)$), une augmentation (respectivement une diminution) de la quantité à

approvisionnement sera prévue (respectivement sera déduite) pour la 2^{ème} et la 3^{ème} période.

Un stock stratégique de sécurité est prévu dans les silos de replis pour pallier aux augmentations de la demande par rapport à la moyenne prévue ainsi que les retards de livraisons imputables aux fournisseurs.

B. Gestion des approvisionnements des silos portuaires

Le plan directeur d'approvisionnement sera établi après l'estimation de la part de la collecte nationale et l'estimation des prévisions de vente de l'année future.

Connaissant le volume des stocks existants et les prévisions mensuelles des ventes aux minoteries d'une part, ainsi que les volumes des quantités à prévoir dans les silos de replie d'autre part, on élabore un calendrier d'approvisionnement pour chaque silo portuaire.

Le volume des quantités à transférer et à vendre étant déterminé, on élabore un plan d'approvisionnement relatif à chaque silo portuaire en adoptant la méthode MRP.

Les hypothèses du plan d'approvisionnement sont :

- Délai moyen d'approvisionnement : 10 jours,
- Délai moyen de déchargement d'un navire : 10 jours,
- Lot technique (capacité moyenne d'un navire) : 25000 Tonnes,
- Cadence moyenne de déchargement par jour : 3000 Tonnes.

Un exemple de planification des besoins d'approvisionnement en céréales pour un silo portuaire est illustré par la figure 7 :

Mois	Janvier			Février			...
BB	60000 T			45000 T			
	20000	20000	20000	15000	15000	15000	
OP	25000	25000	0	25000	25000	25000	
RC	25000	25000	25000	0	25000	25000	
SD	0	5000	10000	15000	0	10000	
BN	20000	15000	10000	0	15000	5000	

Figure 7 : Exemple de planification des besoins d'approvisionnement d'un silo portuaire

Avec : BB : besoins brut prévus, RC : réception prévue de la commande, SD : stock disponible, BN : besoin net, OP : ordre d'approvisionnement.

V. MODELISATION DU PROBLEME

Pour des raisons de simplification, on admet les hypothèses suivantes :

- les moyens de transports sont toujours disponibles,
- les coûts d'achat et d'approvisionnement ne sont pas pris en considération dans le modèle,
- un seul produit à la fois est traité : la gestion des affectations se fait de manière séquentielle (produit par produit).

A. Modèle "transfert pour vente"

On cherche à déterminer le réseau de distribution le mieux adapté qui permet d'expédier une quantité de produit (blé dur, blé tendre) de m origine (silos de replis, silos portuaires) à n destinations (minoteries) à moindre coût possible.

1. Affectation des quantités prioritaires : on définit :

- $q_{urg.pi}$: quantité urgente du produit p disponible au silo i ,
- $q'_{urg.pi}$: quantité urgente du produit p à desservir à partir du silo i ,
- $S_{crit.max}$: coefficient qui définit le seuil critique maximal de la quantité prioritaire autorisée à vendre à une minoterie,

- p_{jp} : prévision mensuelle de la demande du produit p de la minoterie j ,
- b'_{jp} : quantité du produit p à desservir à la minoterie j à partir des quantités déclarées comme prioritaires.
- γ : coefficient de proportionnalité, définit comme suit :

$$\gamma = \frac{\sum_i^n q_{urg.pi}}{\sum_j^m p_{jp}} \quad (1)$$

Si $\gamma < S_{crit.max}$ alors (2)

$$b'_{jp} = \gamma \cdot p_{jp} \quad (3)$$

$$q'_{urg.pi} = \gamma \cdot q_{urg.pi} \quad (4)$$

Sinon $b'_{jp} = S_{crit.max} \cdot p_{jp}$ (5)

$$q'_{urg.pi} = S_{crit.max} \cdot q_{urg.pi} \quad (6)$$

Les équations (3) et (5) définissent les quantités critiques à desservir à la minoterie j , et à déduire de la prévision de la demande p_{jp} .

Les équations (4) et (6) définissent les quantités critiques à desservir à partir des silos i , et à déduire de la quantité initiale $q_{urg.pi}$.

2. modélisation du problème :

La structure du problème de "transfert pour vente" est illustrée par le tableau 1 :

		Destinations (minoteries)					
		1	2	3	j	n	
Origines (sites de replis, portuaires, quais)	1	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{1j}	c_{1n}	Disponibilités (à déterminer)
	q_{11}	q_{12}	q_{13}	q_{1j}	q_{1n}		
	2	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{2j}	c_{2n}	
	q_{21}	q_{22}	q_{23}	q_{2j}	q_{2n}		
	3	c_{31}	c_{32}	c_{33}	c_{3j}	c_{3n}	
	q_{31}	q_{32}	q_{33}	q_{3j}	q_{3n}		
i	c_{i1}	c_{i2}	c_{i3}	c_{ij}	c_{in}	a_i	
q_{i1}	q_{i2}	q_{i3}	q_{ij}	q_{in}			
m	c_{m1}	c_{m2}	c_{m3}	c_{mj}	c_{mn}	a_m	
q_{m1}	q_{m2}	q_{m3}	q_{mj}	q_{mn}			
		b_1	b_2	b_3	b_j	b_n	
		Prévisions mensuelles des demandes					

Tableau 1: Structure du problème "transfert pour vente"

Avec :

- a_{ip} : quantité du produit p à prévoir au silo i ,
- b_{jp} : prévision mensuelle de la demande du produit p de la minoterie j , mis à jour après affectation des quantités prioritaires tel que : $b_{jp} = p_{jp} - b'_{jp}$ (7)
- c_{ij} : coût d'expédition d'une tonne du produit p du silo i à la minoterie j ,
- q_{ij} : quantité en tonne, à desservir du silo i à la minoterie j .

À partir du tableau 1, on doit déterminer les q_{ij} de façon à minimiser le coût d'affectation sans pour autant dépasser une quantité a_{ip} (à déterminer, tel que : $a_{ip} \leq a_{ip}^{max}$).

On note :

- x_{ij} : variable booléenne = 1 si la minoterie j est affectée au silo i ($q_{ij} \neq 0$), 0 sinon.
- $Deb_{max.vente}$: débit maximal mensuel de vente d'un silo i ,
- $q_{disp.pi}$: quantité du produit p disponible au silo i au moment du lancement du traitement de l'affectation,
- $q_{vs.pi}$: capacité du vide spécifique du produit p disponible au silo i ,
- $q_{va.i}$: capacité du vide absolue disponible au silo i ,

- E_p : pourcentage des prévisions de la demande du produit p par rapport à la prévision globale de tout les produits ; il est défini comme suit :

$$E_p = \frac{\sum_j b_{jp}}{\sum_p \sum_{j=1}^m b_{jp}} \cdot 100 \quad (8)$$

- $q_{va,pi}$: capacité du vide absolue disponible au silo i attribué au produit p par approximation proportionnelle à la prévision de la demande du produit p , il est défini comme suit : $q_{va,pi} = q_{va,i} \cdot E_p$ (9)
- $a_{pi,max}$: quantité maximale du produit p qui peut être vendu à partir du silo i , défini comme suit :
- $a_{pi,max} = q_{disp,pi} + q_{vs,pi} + q_{va,pi}$ (10)
- s_{min} : quantité minimale que l'on peut affecter à une minoterie j à partir d'un silo i ,
- $max_{silo,vente}$: nombre maximale de silos de vente qui peuvent être affectés à une minoterie j ,
- $a_{m,pi}$: quantité moyenne (idéale) majorée à vendre de chaque silo i afin de satisfaire un équilibrage de charge entre les silos, défini comme suit :

$$a_{m,pi} = \frac{\min(a_{pi,max}, Deb_{max,vente,i}) \sum_{j=1}^n b_{jp}}{\sum_{i=1}^m \min(a_{pi,max}, Deb_{max,vente,i})} \quad (11)$$

Cette quantité est défini à fin de garantir un équilibrage entre les quantités à vendre à partir des silos ; ce qui implique un minimum de renouvellement des stocks pour chaque silo i . Cette contrainte d'équilibrage ne doit pas être "rigide" afin de ne pas bloquer l'algorithme de résolution. A cet effet, on lui définit une plage de variation tel que :

$$\max(0, a_{m,pi}(1-eps)) \leq a_{m,pi} \leq a_{m,pi}(1+eps). \quad (12)$$

Il est à noter que la minimisation du coût de transfert et la répartition des ventes sur le maximum de silo sont deux objectifs antagonistes. On définit un compromis en fonction de eps assurant un minimum de flexibilité entre les deux objectifs.

- eps : seuil qui définit une plage de variation d'une quantité moyenne à affecter à partir d'un silo i : tel que $0 \leq eps \leq eps_{max}$
- eps_{max} : borne supérieure de variation de eps , elle est défini comme suit :

$$\text{si } \frac{\sum_{j=1}^n b_{jp}}{\sum_{i=1}^m \min(a_{pi,max}, Deb_{max,vente,i})} \geq \alpha \quad (13)$$

$$\text{alors : } eps_{max} = 1. \quad (14)$$

Sinon :

$$eps_{max} = \frac{\sum_{i=1}^m \min(a_{pi,max}, Deb_{max,vente,i}) - \sum_{j=1}^n b_{jp}}{\sum_{j=1}^n b_{jp}} \quad (15)$$

- α : coefficient de proportionnalité qui exprime l'importance de la demande par rapport à la somme des quantités destinées à la vente dans les silos. Généralement α est fixé à 0.5.

Les équations (13) et (14) impliquent que si la somme des prévisions des demandes est supérieure ou égale à la moitié des sommes des quantités destinées à la vente, alors la quantité maximale, défini par la zone de variation de $a_{m,pi}$, à vendre à

partir d'un silo i peut atteindre la totalité du produit p à prévoir dans le silo i . En d'autre termes, si l'équation (13) est vérifiée alors ($0 \leq a_{m,pi} \leq 2 \cdot a_{m,pi}$) qui peut être supérieure ou égale à la totalité du produit p à prévoir dans le silo i .

Autrement si la somme des prévisions des demandes est inférieure à la moitié des sommes des quantités destinées à la vente, alors $0 \leq a_{m,pi} \leq a_{m,pi} \cdot (1 + eps_{max})$ avec $eps_{max} > 1$.

L'équation (15) définit la valeur maximale de variation de eps , elle est défini de sorte à assurer une borne supérieure de $a_{m,pi}$ qui peut être supérieure ou égale à la somme de la quantité p à prévoir dans le silo i .

Il est à constater que si on augmente (respectivement on diminue) la valeur de eps , on perd (respectivement on gagne) dans l'équilibrage des stocks entre les silos, et le coût de transport diminue (respectivement augmente).

3. Formulation mathématique du problème "transfert pour vente" :

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot q_{ijp} \cdot x_{ij} \quad (16)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^m q_{ijp} \cdot x_{ij} = b_{jp} \text{ avec } b_{jp} \geq 0 ; j=1..n \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n q_{ijp} \cdot x_{ij} \leq a_{m,pi}(1 + eps) ; i=1..m \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n q_{ijp} \cdot x_{ij} \geq \max(a_{m,pi}(1 - eps), 0) ; i=1..m \quad (19)$$

$$q_{ijp} \geq s_{min} ; \text{ si } x_{ij} = 1 \quad (20)$$

$$q_{ijp} = 0 ; \text{ si } x_{ij} = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq max_{silo,vente} ; i=1..m \quad (22)$$

L'équation (16) représente la fonction objective à minimiser. La contrainte (17) assure que la somme des quantités à vendre à une minoterie j , respecte les prévisions de demande de cette dernière. Les contraintes (18) et (19) assurent à ce que la somme des quantités à prélever à partir d'un silo i ne dépasse pas une quantité majorée par le débit maximal autorisé pour la vente durant un mois, la quantité d'équilibrage des stocks, et la capacité de stock maximal disponible dans le silo i .

Les contraintes (20) et (21) assurent que les quantités à vendre à partir d'un silo i , soient supérieures ou égales à un seuil minimal s_{min} (correspondant généralement à la capacité d'un camion vraquier). Ces deux équations représentent une contrainte non linéaire.

La contrainte (22) permet à la minoterie j d'être desservie au plus par un nombre fixe de silos, ($max_{silo,vente}$), généralement fixé à 5.

B. Modèle "transfert pour replie"

On cherche à déterminer le réseau de distribution le mieux adapté qui permet d'expédier une quantité de produit (blé dur, blé tendre) de r origine (silos portuaires) à s ($m-r$) destinations (clients) à moindre coût.

1. modélisation du problème :

La structure du problème de "transfert pour replie" est illustrée par le tableau 2.

Etant donnée la somme des quantités à desservir aux silos de replis, on détermine, le planning d'affectation optimal qui minimise le coût de transfert des céréales entre les différents

silos d'une part, et les quantités des céréales (par produit) à prévoir dans les silos portuaires pour satisfaire les exigences des silos de replie.

	Destinations (silos de replis)					Disponibilités (à déterminer)
	1	2	i	s		
Origines (silos portuaires, quais)	1	c_{11} q_{11}	c_{12} q_{12}	c_{1i} q_{1i}	c_{1s} q_{1s}	q_{trans_1}
	2	c_{21} q_{21}	c_{22} q_{22}	c_{2i} q_{2i}	c_{2s} q_{2s}	q_{trans_2}
	k	c_{k1} q_{k1}	c_{k2} q_{k2}	c_{ki} q_{ki}	c_{ks} q_{ks}	q_{trans_k}
	r	c_{r1} q_{r1}	c_{r2} q_{r2}	c_{ri} q_{ri}	c_{rs} q_{rs}	q_{trans_r}
		a_1	a_2	a_i	a_s	
	Quantité à satisfaire					

Tableau 2: Structure du problème "transfert pour replie"

On note :

- a_{ip} : quantité du produit p à prévoir au silo i ,

$$a_{pi} = \sum_{j=1}^n q_{ijp} x_{ij} ; i = 1 \dots m \quad (23)$$

- a_{hpi} : quantité à prévoir dans un silo de repli i pendant une période h pour desservir une ou un ensemble de minoterie pendant la même période h .
- q_{disp_pk} : quantité du produit p disponible au silo k au moment du lancement de l'affectation,
- q_{trans_pk} : quantité du produit p à transférer du silo k (cette quantité est à déterminer),
- a_{pk} : quantité du produit p à vendre directement à partir du silo portuaire ou du quai k ,
- q_{imp_pk} : quantité du produit p à importer au silo k . définit comme suit : $q_{imp_pk} = a_{pk} + q_{trans_pk} - q_{disp_pk}$ (24)
- c_{kj} : coût d'expédition d'une tonne du produit p du silo portuaire k au silo de repli i ,
- $Deb_{max_transfert_k}$: débit maximal périodique relatif au transfert à partir d'un silo k ,
- a_{pk_max} : quantité maximale du produit p qui peut être disponible au silo portuaire k prévue pour être transféré pendant la période h .

2. Formulation mathématique du problème "transfert pour replie"

$$\min Z' = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^s C_{ki} q_{kip} x_{ki} \quad (25)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k=1}^r q_{kip} x_{ki} = a_{hpi} \text{ avec } a_{hpi} \geq 0 ; i = 1 \dots s \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^s q_{kip} x_{ki} \leq \min(a_{pk_max}, Deb_{max_transfert_k}) ; k = 1 \dots r \quad (27)$$

$$q_{kip} \geq S_{min} ; \text{ si } x_{ki} = 1 \quad (28)$$

$$q_{kip} = 0 ; \text{ si } x_{ki} = 0 \quad (29)$$

L'équation (25) représente la fonction objective à minimiser. La contrainte (26) assure à ce que la somme des quantités à transférer vers un silo i soit égale à celle exigée par ce dernier durant la période h . la contrainte (27) assure à ce que la somme des quantités à transférer à partir d'un silo portuaire k , ne dépasse pas une quantité majorée par le débit maximal autorisé pour le transfert durant la période h , et la capacité de stock maximal disponible dans le silo i durant la période h .

Les contraintes (28) et (29) assurent à ce que les quantités à transférer à partir d'un silo k soient supérieures ou égales à un seuil minimal S_{min} (capacité d'un camion vraquier).

VI. APPROCHE DE RESOLUTION

La décomposition du problème global en deux sous problèmes complémentaires a permis de réduire sa complexité ainsi que sa taille. D'autre part, en examinant la formulation mathématique des deux sous problèmes, on constate que les deux fonctions objectives (16) et (25) sont linéaires, de même pour la plus part des contraintes.

Devant le dilemme du choix d'une méthode de résolution, on a constaté que l'adaptation des méthodes exactes ont montré leurs performances quant à leurs applications aux problèmes de transport et d'affectation [10, 11]. Bien que les méthodes heuristiques aient donné de bonne qualité pour les problèmes de moyennes et grandes tailles [4, 12, 13], leurs performances ont été moins mises en valeur devant l'émergence des nouvelles procédures exactes de résolution.

En conséquence de l'approche adoptée pour la résolution du problème globale d'affectation. On a porté notre attention vers l'adaptation d'une méthode exacte de résolution, notamment l'algorithme de Simplexe auquel on a apporté des extensions afin d'intégrer les contraintes non linéaires.

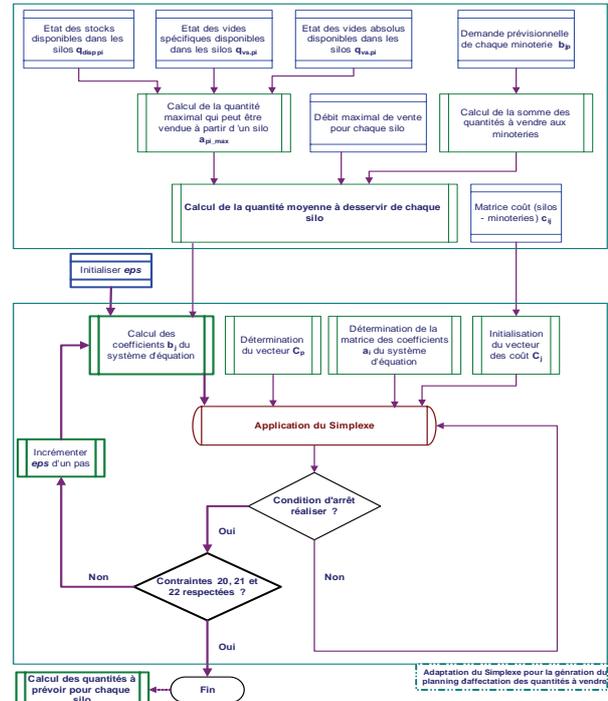


Figure 8 : structure de l'algorithme d'affectation des quantités à vendre aux minoteries

Afin de contourner les non linéarités présentes dans les équations (20, 21 et 22) du problème de "transfert pour vente", et les contraintes (28 et 29) pour le problème de "transfert pour replie", on a introduit un critère d'arrêt supplémentaire assurant la convergence de l'algorithme de simplexe, tout en ayant les contraintes 20, 21, 22, 28 et 29 respectées.

On utilise la variable "eps" comme paramètre de contrôle du critère d'arrêt : on augmente "eps" à pas très faible, cette approche assure une plage de variation de la quantité moyenne a_{m-pi} , ce qui augmente l'espace de recherche pour le Simplexe et améliore la flexibilité d'affectation pour chaque silo. La valeur de "eps" est fixée quand l'algorithme de Simplexe converge et les contraintes non linéaires sont respectées.

L'adaptation de l'algorithme de Simplexe, pour le problème de "transfert pour vente", est illustrée par la structure de l'algorithme représenté par la figure 8.

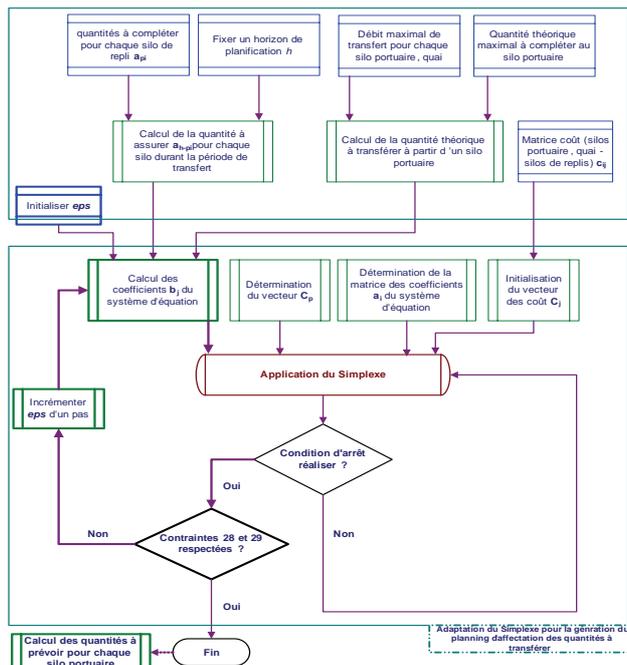


Figure 9: structure de l'algorithme d'affectation des quantités à transférer aux silos de replis

VII. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

L'étude comparative est effectuée pour le mois d'Avril 2007. On a pris en considération les coûts de transfert pour la vente et ceux pour le replie, on a porté notre attention sur l'affectation du blé tendre importé (BTI) puisqu'il représente 56% de la demande globale des minoteries. On s'est basé sur les matrices coûts conventionnelles utilisées par l'entreprise.

On a défini un indicateur représentant l'écart en pourcentage (E_c) entre les coûts engendrés en utilisant l'approche conventionnelle de l'entreprise et ceux calculés en utilisant le simulateur développé.

$$E_c = \frac{Ct.entreprise - Ct.approche.proposée}{Ct.approche.proposée} \times 100$$

On a constaté que le coût global engendré par le transport de BTI durant le mois d'avril 2007 aurait pu être réduit de 18.53%.

A titre d'exemple, les plannings d'affectation générés par le simulateur développé "transfert pour vente" (20 silos, 28 minoteries) et "transfert pour replie" (5 silos portuaires, 15 silos de replie) sont représentés respectivement par les figures 10 et 11.

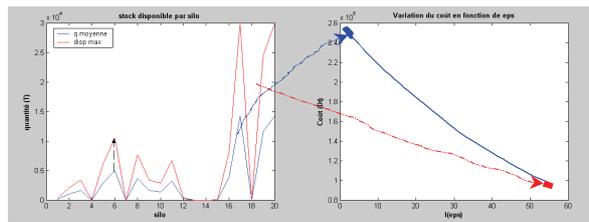
Quantité en Tonnes																											
Silo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	M27	M28	Total/Silo					
SR1					94	47						46							45			278					
SR2																						2106					
SR3																						3346					
SR4																						0					
SR5									834			805										6189					
SR6	1533				4981	678						529										18458					
SR7																						0					
SR8				2950				2275														7660					
SR9	1748																		1470			3334					
SR15				44																		44					
SP1																						6075					
Q1				6075																		0					
Q2																						5250					
SP3								891	1525				2125	1175	850	1375	2530					10040					
SP4																						0					
Total/Minoterie	3325	6075	2875	2950	5075	725	2275	1725	1700	1525	575	4600	2125	1175	850	1375	2000	4000	1250	0	0	64700					

Figure 10 : planning optimal d'affectation de "transfert pour vente"

	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5	SR6	SR7	SR8	SR9	SR10	SR11	SR12	SR13	SR14	SR15	Total (Tonnes)
SP1																0
SP2		278				6135			3156	3031	2836	6670				22106
SP3																0
SP4										4504						4504
SP5			2091	3346			8844									14281
Total	278	2091	3346		6135	8844	7660	3031	2836	6670						40891

Figure 11: planning optimal d'affectation de "transfert pour replie"

Dans la figure 12, on met en évidence l'influence du paramètre d'équilibrage des stocks sur le coût global d'affectation. Il est à remarquer que le paramètre "eps" et le résultat "coût d'affectation" sont inversement proportionnels (figure 12-a) ; plus on augmente "eps" plus le coût d'affectation diminue. En contre partie, on perd sur l'équilibrage de charge (quantité moyenne à vendre à partir des silos) c'est-à-dire que la plus faible valeur de "eps" correspond à la répartition "idéale" des stocks à vendre à partir de chaque silo (figure 12-a courbe en bleu). La plus grande valeur de "eps" élimine la contrainte d'équilibrage des stocks ; ce qui signifie que lors de la génération du planning d'affectation, il y'a des silos beaucoup plus sollicités que d'autres. Le but est de trouver un compromis entre la quantité moyenne à vendre à partir de chaque silo et le coût global d'affectation et ceci via l'algorithme de résolution par ajustement automatique sur le paramètre "eps".



Figures 12-a et 6-b : Influence du paramètre de l'équilibrage sur le coût global d'affectation

VIII. CONCLUSION

Le modèle d'optimisation des affectations multi niveaux des flux des céréales importés proposée dans cet article constitue un support d'aide à la prise de décision dans le contexte de l'optimisation d'une entité de la chaîne logistique céréalière, il constitue un outil de simulation permettant de prévoir le déroulement de tout le processus dynamique de la planification depuis l'approvisionnement jusqu'à la distribution avec différents scénarii. La simulation d'une telle structure décisionnelle permettra de montrer ses performances face aux différents types de perturbations pouvant agir sur les données (demandes clients, délais, coût,...) ou sur l'état (niveau de stock,...).

L'approche élaborée est fondée sur une structure décisionnelle à deux niveaux. Le premier niveau définit le planning des affectations de transport pour assurer la vente aux clients (minoteries) de manière à satisfaire au mieux la demande prévisionnelle et à moindre coût possible. Le plan d'affectation obtenu est affiné sur un horizon qu'on a nommé "période de gestion". Cette planification détaillée doit se réaliser en prenant en compte plus finement la dynamique de la chaîne céréalière. Le deuxième niveau part des résultats obtenus au premier niveau et définit le planning des affectations de transport pour assurer le transfert aux silos de replis à moindre coût possible d'une part, et le plan d'approvisionnement des silos portuaires d'autre part.

Une étude comparative entre l'approche utilisée par l'entreprise et l'approche développée dans cet article a montré que cette dernière donne des résultats meilleurs.

Il convient de souligner la double dimension technique et économique de cette étude pour l'optimisation de la gestion des affectations des stocks et la mise en évidence des économies et des gains pouvant être engendrés par l'adoption de cette approche.

Diverses perspectives de recherches peuvent être envisagées : améliorer la réactivité aux aléas et détecter les perturbations liées à l'exécution des plannings d'affectation, évaluer les risques liés aux prévisions des demandes incertaines et à la gestion des approvisionnements des silos et analyser leurs sensibilités, optimiser les plans des tournées de véhicules pour les transports

des céréales lors de l'exécution des plans de transferts... d'une façon générale, étendre le modèle en intégrant toute la chaîne logistique céréalière depuis le fournisseur jusqu'au client final.

IX. BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Glover. F, Taillard.E, et Werra.D., A user's guide to tabu search, *annals of operations research*, volume 41, p 3-28, 1993.
- [2] Laguna, M., Kelly, James P., Gonzales-Velarde, J L., Glover, F., Tabu search for the multilevel generalised assignment problem, *European Journal of Operation Research*, Vol.82, p 176-189, 1992.
- [3]: B.Hadj-Alouane A., Hajri S., A Genetic Algorithm for an Assignment Problem with Fuzzy Data, *4ème congrés international de génie industriel*, Vol 2, p.1019-1028, Aix-Marseille 2001.
- [4] Amini M. and Racer M., A hybrid heuristic for the Generalised assignment problem, *European Journal of operational Research*, Vol. 5, N°2, p.343-350, 1995.
- [5] Lawrence J. Schmitt. A Genetic Algorithmic Approach for Solving the Multi-Resource General Assignment Problem: Design and Configuration Issues, Department of Information Technology Management, Christian Brothers University.
- [6] Glover, F., Hultz, J., and Klingman, D., Improved computer based planning techniques – Part II , *Interfaces* 9/4, 12-20, 1979.
- [7] Berkin T., Joyce W. Yen., Zeld B. Zabinsky., A stochastic Programming Approach to Resource-Constrained Assignment Problems, *Industrial Engineering, University of Washington*, Seattle, 2004.
- [8] Gravish, B., Pirkul, H., Algorithms for the Multi-Resources Generalized Assignment Problem, *Manage. Sci.* 37(6), 695-713, 1991.
- [9] Yagiura M., Iwasaki S., and Ibaraki T., A Very Large-Scale Neighbourhood Search Algorithm for the Multi-Resources Assignment Problem, 2003, *Metaheuristic International Conference*, Kyoto, Japan, 2003
- [10] Savelsberg. M., A branch-and-price algorithm for the generalized assignment problem, *Operations Research Center*, Vol. 45, p.831-841, 1997.
- [11] Naus. R.M., Solving the Generalized assignment problem: An optimising and heuristic approach, *INFORMS, Journal on Computing*, Vol. 15 p. 249-266, 2003
- [12] Cattrysse, D., M. Salomon, and L. Van Wassenhove., A Set Partitioning Heuristic for the Generalized Assignment Problem, *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, p. 67-174, 1994.
- [13] Lorena, L.A., N. Narciso, and G. Marcelo., Relaxation heuristics for a Generalized Assignment Problem, *European Journal of Operational Research*. Vol. 91 : 3, p. 600-607, 1996.