

Travelling salesman problem et ordonnancement dans les industries des produits frais

Michel Nakhla

► **To cite this version:**

Michel Nakhla. Travelling salesman problem et ordonnancement dans les industries des produits frais. 2013. hal-00803887

HAL Id: hal-00803887

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00803887>

Preprint submitted on 23 Mar 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.

Travelling salesman problem et ordonnancement dans les industries des produits frais

Michel Nakhla

Professeur – Chercheur au CGS Ecole des Mines de Paris

(Mars 2013)

Abstract : Cet article s'intéresse aux problèmes d'ordonnancement dans l'industrie agroalimentaire du frais. Dans ce secteur, la détermination d'un ordonnancement de manière à minimiser le délai de mise à disposition du produit, à réduire les pertes matières, à améliorer le taux de service des lignes de conditionnement soulève souvent des questions assez chevelues rendant difficile l'application de méthodes exactes d'optimisation. Pour traiter des contextes multi objectifs, les méthodes classiques nécessitent soit des temps de résolution gourmands, soit des efforts d'adaptation sophistiqués. Nous avons testé des méthodes heuristiques qui permettent de définir et d'améliorer la planification existante. Les résultats obtenus montrent que des améliorations appréciables peuvent être obtenues.

Keywords : ordonnancement, industrie des produits frais, Travelling salesman problem

1. Introduction

Cet article présente une démarche heuristique développée pour mettre à jour et optimiser l'ordonnancement dans l'industrie alimentaire du frais.

Dans ce contexte particulier, l'ordonnancement concerne des lignes de fabrication avec existence de réglages dépendants de la séquence des commandes et incluant plusieurs objectifs à optimiser : l'optimisation des capacités des lignes et des temps de réglage, le respect des délais de livraison, la minimisation des stocks des produits finis. C'est un problème NP-difficile. Dans les industries du vivant, notamment agroalimentaires, d'autres objectifs viennent augmenter cette complexité. Ces objectifs contribuent principalement au niveau du coût de revient industriel : la réduction des pertes matières au moment de changement de format, la périssabilité des matières premières et des encours de production et des produits finis et enfin l'optimisation des dates limites de consommation.

Pour un problème de petite taille ou dans une situation où les lignes sont dédiées à des produits, une solution peut être obtenue par simple énumération par le recours à des approches arborescentes ou à des techniques de programmation mathématiques. Mais face à des problèmes multi objectifs ou de grande taille ces méthodes nécessitent souvent des temps de résolution importants et des efforts d'adaptation sophistiqués malgré les progrès obtenus dans ce domaine. Sur le terrain, les contraintes industrielles poussent souvent vers la mobilisation de méthodes plus empiriques ou approchées capables de donner des solutions acceptables en un temps plus compatible avec le rythme industriel.

Plus illustrer la démarche suivie, nous avons analysé les modes de planification dans un grand groupe industriel spécialisé dans les produits frais. Nous avons choisi de porter un diagnostic sur l'efficacité de l'ordonnancement dans des unités de production de pâtes fraîches prêtes à l'emploi. Ce choix a été guidé par les niveaux de perte matière liés à l'ordre de traitement des commandes, de réglage et de nettoyage entre les lots de fabrication, entraînant une augmentation du coût de revient. La démarche proposée permet l'optimisation des planifications actuelles tout en restant ouverts l'introduction de nouvelles gammes de production. L'angle d'attaque choisit est d'aborder le problème d'ordonnancement des produits frais comme un problème de voyageur de commerce dit *travelling salesman problem* (TSP). Les résultats obtenus montrent que des améliorations des taux de perte sont possibles sont grâce à une meilleure planification de l'ordonnancement des commandes.

La suite de cet article est organisée comme suit. Nous effectuons premièrement une revue de la littérature des principaux problèmes de tournées. Nous décrivons ensuite les caractéristiques des industries des produits frais étudiées. Dans la section 4, nous présenterons les approches heuristiques mobilisées pour la modélisation des problèmes d'ordonnancement dans l'industrie du frais. Nous privilégierons l'approche $\lambda - opt$. Des résultats numériques basés sur des données réelles seront présentés dans la section 5 et illustrent l'intérêt de l'approche.

2. Travelling Salesman Problem pour l'ordonnancement d'atelier

Les problèmes d'ordonnancement dépendant des réglages de la séquence des commandes ont été largement étudiés dans la littérature (Aliahverdi et al, 1999 ; Yang et Liao, 1999) mais peu de travaux abordent les problèmes d'ordonnancement multi-objectifs et d'applications industrielles. Depuis une dizaine d'années, de nouveaux algorithmes d'approximation dits métaheuristiques ont été mobilisés pour résoudre des problèmes d'ordonnancement. On peut citer l'utilisation des métaheuristiques pour traiter les problèmes d'ordonnancement d'une machine unique avec des objectifs de minimisation du retard total et des temps de réglage par Ragatz (1993), Rubin et Ragatz (1995), Tan et Narasimhan (1997), Tan et al. (2000) et Gagne et al. (2002). On peut également citer le recours aux algorithmes génétiques (Wang and Zheng 2001, Varela et al. 2003, Watanabe et al. 2005), la recherche tabou (Nowicki and Smutinicki 1996, 2005, Pezzella and Merelli 2000). Plus récemment, la métaheuristique appelée Ant Colony Optimisation (ACO) a fait l'objet d'un intérêt grandissant suite à des applications réussies pour traiter les problèmes d'optimisation combinatoire. On peut citer notamment les travaux de Gagné et Gravel, 2002 sur les problèmes d'ordonnancement, type job shop, rencontrés dans un centre de coulée d'aluminium ou encore dans une situation multi-objectifs tenant compte des préférences du planificateur (Gagné et Gravel, 2004).

Peu de travaux, cela dit, ont traité les problèmes d'optimisation multiobjectifs et plus particulièrement ceux faisant intervenir une matière périssable, des processus courts et une variété de produits générant des fréquences de changement élevées et des délais très contraints par le marché.

Selon l'analogie avec TSP, l'ordonnancement (ou tournée) optimal est obtenu en traitant (visitant) chaque commande d'un plan de production. Les commandes étant espacées par les temps de réglage des machines et de changement de format. Ainsi, il s'agit de débiter et de finir par la même commande, en visitant chacune une et une seule fois de manière à minimiser la durée totale d'exécution du plan de production. Des relations de précédence apparaissent alors entre les commandes ou clients, ce qui impose certaines restrictions à la tournée. Le lecteur peut trouver une revue de littérature complète dans Savelsberg et Sol (1995) sur le problème standard de tournées incluant des relations de précédence et de distances entre les clients. D'autres auteurs comme Renaud et al (2000) ont proposé des algorithmes hybrides pour résoudre ce même problème.

Parmi les algorithmes les plus expérimentés sur le problème standard de TSP, soulignons notamment les algorithmes de recherche tabous de Gendreau, Hertz et Laporte (1994), de Osman (1993) et de Taillard (1993) et les heuristiques basées sur le partitionnement de Renaud, Boctor et Laporte (1996) et Kelly et Xu (1999).

L'aspect principal de l'application de TSP au cas étudié est la notion d'ordonnancement multi-objectifs. Ceux-ci sont déterminants dans les industries du frais comme nous le verrons dans la suite de l'article.

3. Caractéristiques et spécificités des industries du frais

Le cas étudié est une entreprise de fabrication des pâtes à tarte et à gâteau prêtes à l'emploi, ces produits font partie du rayon traiteur frais libre-service en grandes et moyennes surfaces. Le mode de production est sur stock, ce qui rend les produits finis disponibles immédiatement pour les clients et réduit donc le délai de livraison aux seuls temps de préparation des commandes et de transport. Les produits sont fabriqués en série. Comme dans toutes les entreprises agroalimentaires proposant des produits frais, il faut tenir compte de la date limite de consommation. Dans le cas étudié, les produits ont une DLC courte (de l'ordre d'un mois).

Toutes les références sont produites régulièrement avec une rotation des stocks d'environ une semaine.

Le problème d'ordonnancement traité consiste à déterminer l'ordre de passage de n commandes de produits (regroupés en lots) sur des unités constituées de lignes de fabrication, de conditionnement et d'emballage.

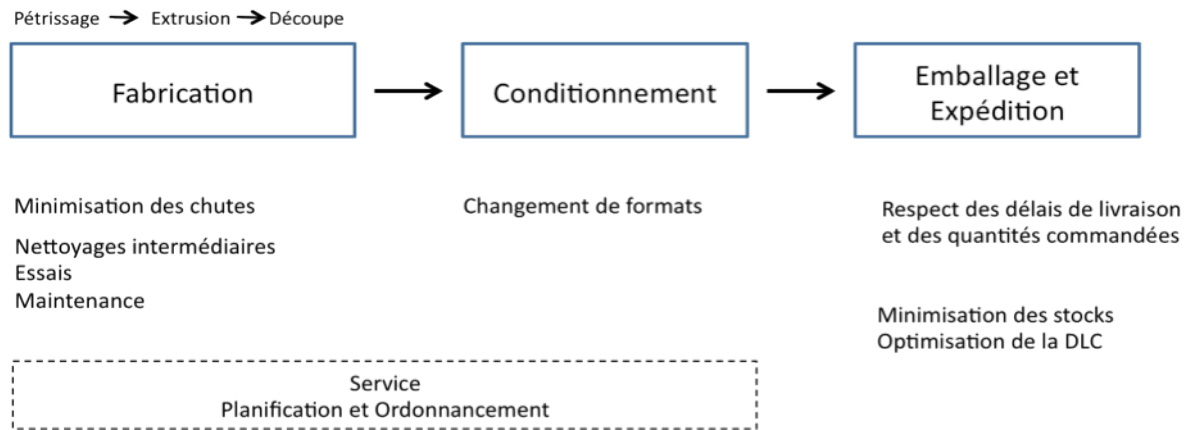


Figure 1. Le processus de fabrication et de conditionnement

Le cahier des charges définit un nombre de jours minimum entre la date de réception dans les bases logistiques et la DLC, « contrat date ». Il est généralement de 21 jours. Les bases logistiques n'acceptent pas les produits ayant un nombre de jours entre la réception et la DLC inférieur au contrat date. Ce contrat date donne un délai entre la date de production et la date limite d'expédition le surstock de produits périssables.

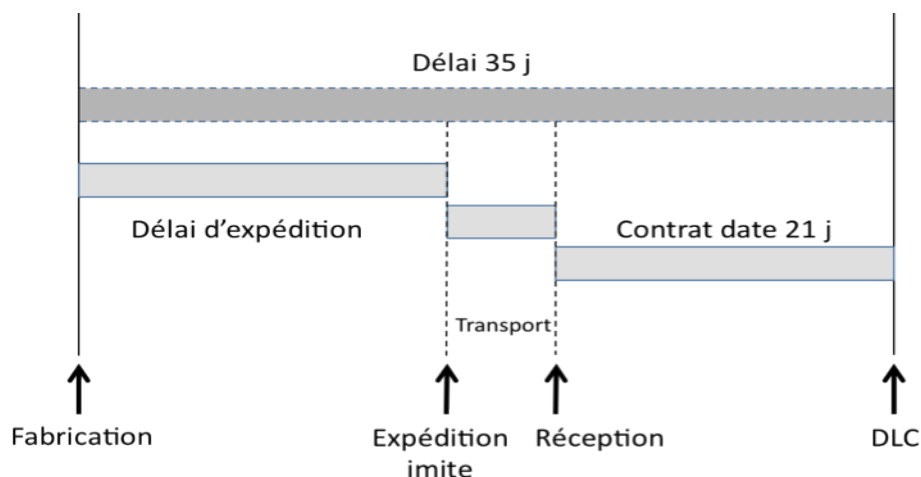


Figure 2. Le principe du contrat date

En plus, du contrat date, l'ordonnancement recherché doit respecter un certain enchaînement des lots qui fait perdre le moins de temps et qui génère le moins de « chutes de matière ».

En effet, en cours de production, la contrainte de recyclage des chutes de produits est déterminante dans l'ordonnancement recherché. Plusieurs chutes peuvent se produire, certaines liées à la découpe des pâtes (par exemple une forme ronde dans une laize rectangulaire) ces chutes sont automatiquement réinjectées en début de ligne ou mises au rebut. Si les chutes sont issues d'une pâte feuilletée et que le lot suivant est constitué de d'une pâte brisée, il est possible de recycler ces chutes sur la même ligne (ce qui n'est par le cas d'un enchaînement pâte brisée/pâte feuilletée).

L'enchaînement des formats de conditionnement constitue également une contrainte forte pour l'ordonnancement. Le passage d'un format à un autre nécessite de lourds réglages (jusqu'à 50mn d'arrêt).

Enfin, l'ordonnancement de lots de produits doit enchaîner des recettes cohérentes pour éviter de multiplier les numéros de campagne de production. Cet enchaînement doit tenir compte également du poids des produits. Compte tenu des types de réglages, passer d'un produit plus lourd à un produit plus léger (au sein d'un même lot) engendre une surconsommation de matière pour l'industriel, à l'inverse passer d'un produit plus léger à un produit plus lourd peut entraîner un sous poids non acceptable du point de vue étiquetage réglementaire.

Un ordonnancement avec des contraintes de Date Limite de Consommation (DLC) : la nécessité d'une vision hiérarchique

Les règles de priorités qui viennent d'être brièvement rappelées posent quelques problèmes lorsque l'importance des informations est grande et lorsque les ordres de fabrication à réaliser sont dépendants et où un ordre partiel est imposé. De plus, les temps de changement et de nettoyage des lignes sont dépendants de l'ordre retenu.

Parmi ces informations, citons d'abord les contraintes liées à l'outil de production lui même ; les lignes de production diffèrent par leur rendement, leur capacité à fabriquer tel ou tel produit, leur flexibilité pour les changements de production et enfin, les qualifications et les effectifs nécessaires au pilotage des lignes tenant compte de l'absentéisme (congés, formation et maladies).

La complexité de l'ordonnancement vient de l'existence de dépendance dans l'enchaînement des lots de fabrication ; On peut concevoir facilement qu'il est plus logique que la teneur de certains ingrédients soit croissante dans la succession des lots pour éviter le temps de nettoyage, de préparation de la ligne de fabrication et les pertes de matière à chaque amorçage d'un nouveau lot.

Par ailleurs, les produits de base sont demandés constamment et sont souvent produits en premier car leur quantité peut être prévue bien à l'avance, ce n'est qu'après que l'on produit les références marginales ou nouvelles en fonction de la demande journalière. Dans ce développement, on constate que l'enchaînement de ces ordres de fabrication se rapproche davantage d'une arborescence relativement complexe ; dans ce cas, une règle d'ordonnancement doit respecter trois grandes impératives : gérer les priorités en fonction des dates de livraisons, utiliser les règles de succession des lots pour minimiser les temps de changement des fabrications, assurer une DLC cible concernant la date d'expédition des produits au départ des usines vers les bases logistique (contrat date). La première impérative consiste à intégrer l'ordonnancement et le planning des dates de livraison ce qui demande une grande coordination entre les points de vente (grande distribution, ou franchisés) et l'outil de production. La seconde privilégie une vision hiérarchique entre les petits et les grands lots. La troisième, pose le problème de la réduction du cycle de fabrication qui est déjà assez court (quelques heures) et de l'engagement des usines en matière de date d'expédition. Cela revient

à mettre également en place plusieurs types de contrats (usine/distributeurs) en fonction de la taille des lots.

Notre problème consiste donc à déterminer un ordonnancement de lots sur une ligne respectant des contraintes de dates au plus tôt et au plus tard. Les différents lots sont liés par un ordre partiel (dosages croissants de matière grasses), en plus ces différents lots ne peuvent être morcelés (le problème est donc non préemptif).

4. Approches heuristiques pour la modélisation des problèmes d'ordonnancement dans l'industrie du frais selon l'approche $\lambda - opt$

L'approche proposée ici consiste à partir d'un ordonnancement initial régulier et de l'améliorer en changeant l'ordre des lots et, éventuellement, en modifiant l'affectation des lots aux différents ordonnancements. Le but final est de réduire le temps d'occupation des lignes de production.

Démarche suivie

Généralement, les heuristiques peuvent être réparties en trois classes : les heuristiques de construction, les heuristiques d'amélioration et les heuristiques hybrides. Les heuristiques de construction élaborent graduellement une tournée (un ordonnancement) en ajoutant un sommet (commande) à chaque étape. Elles s'arrêtent dès que la solution est trouvée et n'essayent pas de l'améliorer, parmi ces heuristiques, celle du plus proche voisin, l'algorithme glouton et l'algorithme de Christofides. Les heuristiques d'amélioration consistent, une fois qu'une tournée est générée par une heuristique de construction ou générée aléatoirement, à l'améliorer pour obtenir une tournée de qualité meilleure. Les heuristiques de recherche locale *2-opt* [6] et *3-opt* [6] sont des exemples les plus représentatives de cette catégorie. Dans cette catégorie, il y a également l'algorithme de Lin-Kernighan, la recherche tabou, le recuit simulé et les algorithmes génétiques. L'heuristique de colonie de fourmis combine les caractéristiques des deux classes. Il existe d'autres hybridations parmi lesquelles l'hybridation de Freisleben et Mertz [2] et de Dorigo et Gambardella [1] qui combinent respectivement l'algorithme génétique et l'algorithme de Lin-Kernighan ou encore l'heuristique et colonie de fourmis et *3-opt*.

Dans l'industrie étudié, rappelons le, l'ordonnancement doit répondre à trois objectifs : la réduction des chutes matière, l'optimisation de l'enchaînement des lots en fonction des recettes et la réduction des temps de réglage (optimisation des capacités en gérant l'enchaînement des formats).

Pour répondre à ces objectifs, il est habituel dans les industries des produits frais de regrouper les lots de produits en deux catégories C_1 (Feuilleté) et C_2 (sablé). Au sein de chaque catégorie, on distingue des lots constitués d'un même format et d'une même recette $lot_1, lot_2, \dots, lot_i, \dots, lot_j$. Cette pratique débouche sur des ordonnancements types relativement stables et reproductibles une ou deux fois par jour.

La recherche d'un ordonnancement optimal nous ramène à un problème de recherche de tournée optimale pour lequel plusieurs algorithmes sont disponibles. Les calculs utilisent, à la place des distances, les temps qui séparent deux lots successifs correspondent aux temps de changement de réglage. Nous avons dû tenir compte du fait que les temps entre deux commandes peuvent parfois être différents selon l'ordre choisi. La matrice des temps qui a été élaborée est donc asymétrique. Cette matrice peut être mise à jour très rapidement avec un minimum d'opérations.

Sur cette matrice, nous opérons dans un contexte asymétrique, en mobilisant les heuristiques type $\square-opt$ en adaptant les heuristiques $2-opt$ de Lin (1965) et $3-opt$. Par ailleurs, comme l'organisation de la production est basée sur des campagnes de production en fonction des jours des semaines, on peut se retrouver avec plusieurs ordonnancements initiaux. Dans ce cas, la démarche proposée va consister à opérer une optimisation inter-ordonnements par un échange de sommets entre deux tournées (circuits) (Frieze, 1982). Nous présentons ci-dessous comment ces méthodes ont été adaptées à notre cas.

Adaptation du $2-opt$

Le $2-opt$ est une heuristique des plus connus pour résoudre le problème du voyageur de commerce. Initialement développé par Lin (1965) pour des problèmes symétriques, il est adaptable au cas asymétrique.

Soit $G = (X, U)$ un graphe orienté où X représente l'ensemble des sommets et $U = \{(x_i, x_j) : i \neq j, x_i, x_j \in X\}$, l'ensemble des arcs. Une tournée, ou un circuit, sur X correspond alors à un ensemble ordonné de points $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Le $2-opt$ est une approche itérative qui tente d'améliorer une tournée en échangeant deux arcs à chaque itération. Ainsi, à chaque itération l'algorithme considère toutes les paires d'arcs (x_i, x_j) et (x_k, x_l) et vérifie si un gain de temps peut être obtenu en les remplaçant par les deux arcs (x_i, x_k) et (x_j, x_l) . L'algorithme continue tant que des améliorations sont possibles. Lorsque les données sont symétriques, le calcul du gain de temps est direct et se résume à la différence de longueur entre les arcs éliminés et les arcs les remplaçant, ce qui demande des calculs de l'ordre de $O(n^2)$ à chaque itération. Dans le cas asymétrique, il est nécessaire d'évaluer la tournée dans les deux sens et de retenir la tournée procurant le plus petit temps afin d'évaluer le gain associé à chaque échange, ce qui augmente l'ordre de calcul à $O(n^3)$.

L'extension directe du $2-opt$ consiste à tenter d'échanger à chaque itération trois paires d'arcs. Malheureusement, le temps de calcul du $3-opt$ symétrique est $O(n^3)$ et grimperait à $O(n^4)$ dans le cas asymétrique, ce qui le rend inutilisable pour des problèmes de taille réelle. Une restriction du nombre potentiel d'échanges aux seuls sommets consécutifs ($3-opt^*$) permet de conserver la complexité à $O(n^2)$. Encore une fois, cet algorithme a été adapté afin de tenir compte de l'aspect asymétrique de la matrice des distances, ce qui augmente de nouveau la complexité à $O(n^3)$.

Étape 1. Considérer une tournée initiale avec des sommets numérotés de 1 à n , le sommet initial $S = 1$.

Étape 2. Enlever $x = 3$ sommets consécutifs à partir du sommet 1 et insérer ces sommets entre toutes les paires de sommets consécutifs restants dans la tournée en considérant les deux sens possibles d'insertion de la chaîne. Dans les deux cas, le temps de la tournée doit être évalué dans les deux sens.

Si l'échange diminue le temps de la tournée, changer immédiatement la séquence de visite de la tournée et répéter l'étape 2.

Si aucune tentative d'insertion ne diminue le temps de la tournée, mettre le sommet initial à $= 1 + 1$.

Si $S = n + 1$ alors passer à l'étape 3, autrement répéter l'étape 2.

Étape 3. Mettre $S = 1$ et $x = x - 1$. Si $x = 0$, alors l'algorithme est terminé, autrement retourner à l'étape 2.

Échanges inter-ordonnements.

Ce type d'échange consiste à déterminer s'il serait plus avantageux de traiter dans un plan de production d'autres lots appartenant à un autre plan de production, ce qui revient à modifier l'affectation des lots aux plans de production. Lors de l'application de ces échanges, il faut tenir compte de certaines contraintes opérationnelles :

- Limiter les nombres maximum et minimum de lots dans un ordonnancement pour éviter qu'un plan de production comporte un grand nombre de commandes et dépasser ainsi les heures régulières de travail. Mais aussi pour assurer une activité minimale pour une équipe de production ;
- N'autoriser que l'échange entre les ordonnancements de la même demi-journée et de la même campagne de production pour limiter les changements à l'horaire de travail et optimiser la date limite de consommation.

La méthode consiste à évaluer le déplacement d'un lot vers un autre plan de production qui respecte les deux contraintes ci-dessus. Sur l'ordonnancement O_i pour un lot x_i , les arcs $\{(x_{i-1}, x_i), (x_i, x_{i+1})\}$ sont enlevés et l'ordonnancement est reconnecté avec l'arc (x_{i-1}, x_{i+1}) . L'ordonnancement est ensuite amélioré avec la méthode (3 – opt^*). Le lot x_j est alors inséré sur un circuit potentiel O_k . Cette insertion requiert l'ajout de deux nouveaux arcs $\{(x_{k-1}, x_i), (x_i, x_{i+1})\}$ et nécessite l'élimination de l'arc $(x_{k-1}, x_{j_{k+1}})$. Ce deuxième ordonnancement est également amélioré à l'aide de la méthode (3 – opt^*). Évidemment, toutes les possibilités de lots à enlever x_j et à insérer sont considérées. A chaque itération la combinaison de durée minimale est retenue. L'algorithme continue jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne soit possible. Les calculs nécessaires sont de l'ordre de $O(n^3)$.

L'exemple ci-dessous illustre le déplacement d'un lot de l'ordonnancement O_i vers le l'ordonnancement O_k .

	x_{i-1}	x_i	x_{i+1}
x_{i-1}	0	14	20
x_i	14	0	15
x_{i+1}	20	15	0

	x_{k-1}	x'_i	x_{k+1}
x_{k-1}	0	10	18
x'_i	10	0	20
x_{k+1}	15	20	0

Temps de changement de formats entre lots

Supposons deux ordonnancements initiaux :

O_1 : x_{i-1}, x_i, x_{i+1} entraînant un temps de changement total de $14+15=25$

O_2 : x_{k-1}, x'_i, x_{k+1} entraînant un temps de changement total de $10+20=30$

En déplaçant le lot x'_i (car sa recette est compatible avec la recette du lot x_i qui a la même recette, donc temps de changement nul) de O_2 vers O_1 on obtient les deux ordonnancements suivants :

O'_1 : $x_{i-1}, x_i, x'_i, x_{i+1}$ entraînant un temps de changement total de $14+0+15=25$

O'_2 : x_{k-1}, x_{k+1} entraînant un temps de changement total de 18

5. Résultats numériques

Pour juger de la performance de la démarche proposée, 10 commandes (5 de pâtes feuilletés et 5 de sablés) de tailles différentes ont été testées. Chaque commande est constituée de plusieurs lots. Chaque lot correspond à un couple format-recette. Sur ces commandes, 10 plans de production ont été choisis et correspondent à trois demi-journées types de productions¹. Cette situation initiale servira ensuite de référence pour mesurer la performance de la démarche proposée.

¹ Ces trois demi-journées font partie des trois jours consacrés à la production de références standards. Les autres jours sont consacrés à des pâtes spéciales fabriquées à la commande. A la fin de chaque journée, 2h30 sont réservées au nettoyage du matériel et des installations.

Ordonnement O _i	Durée initiale en mn
1	215
2	175
3	140
4	190
5	140
6	145
7	190
8	160
9	145
10	175
Durée totale hebdomadaire	1675

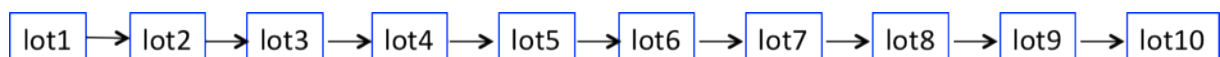
Tableau 1 : les durées en mn des dix ordonnancements choisis

Dans un premier temps, nous avons cherché à quantifier les améliorations possibles en optimisant 10 ordonnancements initiaux sans aller jusqu'à modifier l'affectation des lots aux ordonnancements. Ainsi, sur chacun des ordonnancements, les temps de changements de formats ont été identifiés comme le montre le tableau ci-dessous afin de calculer la durée totale minimale.

Commandes "Feuilleté"	lot1	lot2	lot3	lot4	lot5	lot6	lot7	lot8	lot9	lot10
lot1	0	5	25	4	15	10	7	17	5	13
lot2	5	0	25	2	7	10	5	24	5	20
lot3	26	25	0	26	30	35	22	35	30	30
lot4	4	2	25	0	10	10	5	20	4	2
lot5	10	8	30	10	0	15	10	30	10	25
lot6	10	10	35	10	14	0	14	20	6	18
lot7	7	5	15	5	9	14	0	25	9	20
lot8	17	25	35	20	30	20	25	0	20	5
lot9	5	5	30	4	10	6	8	20	0	15
lot10	15	15	30	17	25	15	20	5	16	0

Tableau : Matrice des temps liés aux changements de formats et de réglage entre deux lots successifs

Dans cet exemple, l'ordonnement optimal correspond à 100 mn :



A chacun des ordonnancements, nous avons intégrés les temps de fabrication des lots pour appliquer dans un premier temps l'approche 3-opt* pour améliorer chacun des ordonnancements. Dans un deuxième temps, nous avons appliqué l'approche inter-ordonnements pour une optimisation croisée. Les résultats obtenus figurent dans le tableau suivant.

Ordonnement O _i	Durée initiale en mn	3-opt* durée en mn	Inter-ordo durée en mn	Meilleure amélioration
1	220	205	190	13,64%
2	175	165	155	11,43%
3	145	140	130	10,34%
4	190	175	170	10,53%
5	150	135	135	10,00%
6	145	140	140	3,45%
7	190	175	170	10,53%
8	160	155	150	6,25%
9	160	140	140	12,50%
10	175	170	155	11,43%
Durée totale hebdomadaire	1710	1600	1535	10,23%

Tableau : comparaison de performances obtenues par l'application des deux approches

Le tableau 2 présente les améliorations obtenues sur chacun des ordonnancement en utilisant l'heuristique 3 – opt *. Pour l'ensemble des ordonnancements en constate une amélioration globale de 75 minutes de l'occupation des unités de production.

L'application de l'échange inter-ordonnement aux plans de production de 3 équipes consécutives montre une amélioration globale par rapport aux ordonnancements initiaux de 10,23% soit 175 minutes.

L'application combinée du 3 – opt * et de la procédure inter-ordonnement permet une économie quotidienne de 140 minutes.

Conclusion

Dans cet article, nous avons montré comment l'adaptation de techniques relevant des problèmes de tournées de véhicules classiques (TSP) permet de traiter efficacement un problème d'ordonnement multi objectifs dans l'industrie des produits frais.

L'application combinée de deux heuristiques montre une réduction quotidienne de 8,3% de la durée d'occupation des lignes de production.

Bien que ces résultats soient intéressants, ils démontrent néanmoins que l'écart entre les résultats qu'il est possible d'obtenir avec l'expérience des opérateurs et des responsables de planification les meilleurs résultats obtenus par des métaheuristiques beaucoup plus sophistiqués reste à relativiser. Vu les économies réalisables, il reste à trouver un compromis acceptable entre des modifications fréquentes des plans de production (qui entraînent des changements des heures de travail) et l'efficacité générale obtenue.

Sur le plan pratique, un tel niveau d'économie est facilement interprétable. Au cours des années, le service planification a toujours cherché à limiter les modifications des plans de production réguliers (des produits de base demandés constamment) afin de minimiser les impacts sur les heures de travail et sur l'organisation des équipes. Ainsi, des commandes devenues marginales conservaient leur ordre dans l'ordonnement (ce qui occasionne des impacts sur les temps de changements de formats) et des nouvelles commandes étaient généralement ajoutées en fin du plan de production afin de réduire les impacts sur les commandes régulières. De plus, la règle générale adoptée dans les unités de production étudiées, consiste à planifier les pâtes nécessitant une longue de préparation en début de journée pour une question d'occupation optimale du personnel. Ce qui n'est pas toujours compatible avec les logiques d'ordonnement. Il en a résulté avec le temps des ordonnancements relativement peu rationalisés.

Références

- Allahverdi A., Gupta J.N.D. and T. Aldowaisan, 1999. A review of scheduling research involving setup considerations, *Omega*, 27, p. 219-239.
- Codenotti, B., Manzini, G., Margara, L. et Resta, G., "Perturbation: An efficient technique for the solution of very large instances of the Euclidean TSP", *INFORMS Journal on Computing*, 8, 2 (1996), 125-133.
- Conway R.W., Maxwell W.L. and L.W. Miller 1967. *Theory of scheduling*, Addison Wesley, MA.
- Corobléa, B., "Les opérations de distribution du courrier gouvernemental : analyses et voies d'amélioration". Essai de maîtrise, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, Québec, Canada (1999).
- Das S.R., Gupta J.N.D. and Khumawala B.M, 1995. A saving index heuristic algorithm for flowshop scheduling with sequence dependent set-up times, *The Journal of the Operational Research Society*, 46, p. 1365-1373.
- Deneubourg J.L. and S. Goss, 1989. Collective patterns and decision-making, *Ethology & Evolution*, 1, p. 295-311.
- Deneubourg J.L., Pasteels J.M. and J.C. Verhaeghe, 1983. Probabilistic behaviour in ants: A strategy of errors?, *Journal of Theoretical Biology*, 105, p. 259-271.
- Dorigo M. and . Di Caro, 1999. The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic, In: D. Corne, M. Dorigo and F. Glover Editors, *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill.
- Dorigo M. and L.M. Gambardella, 1997. Ant colonies for the traveling salesman problem, *BioSystems*, 43, p. 73-81.

- Dorigo M., 1992. *Optimization, learning and natural algorithms*, Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Dorigo M., Maniezzo V. and A. Colorni, 1991. *Positive feedback as a search strategy*, Technical Report No 91-016, Politecnico di Milano, Italy, 20 pages.
- Dorigo M., Maniezzo V. and A. Colorni, 1996. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE transactions on System, Man & Cybernetic*, 26 (1), p. 29-41.
- Du J. and J.Y. Leung, 1990. Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard, *Mathematics of Operations Research*, 15, p. 483-494.
- Franca P.M., Gendreau M., Laporte G. and F.M. Muller, 1996. A tabu search heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times, *International Journal of Production Economics*, 43, p. 79-89.
- Gagné C., Price W.L. and M. Gravel, 2000., Scheduling a single machine with sequence dependent setup times using Ant Colony Optimization, soumis à *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, décembre 2000.
- Gendreau, M., Hertz, A. et Laporte G., "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", *Management Science*, 40, 10 (1994), 1276-1290.
- Gendreau, M., Hertz, A. et Laporte, G., "New insertion and post-optimization procedures for the traveling salesman problem", *Operations Research*, 40 (1992) 1086-1094.
- Goss S., Beckers R., Deneubourg J.L., Aron S. and J.M. Pasteels, 1990. How trail laying and trail following can solve foraging problems for ant colonies, In: *Behavioural Mechanisms of Food Selection*, R.N. Hughes ed., NATO-ASI Series, vol. G20, Berlin: Springer-Verlag.
- Gravel M., Price W. and C. Gagné, 2000a. Scheduling jobs in a Alcan aluminium factory using a genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, 38 (13), p. 3031-3041.
- Gravel M., Price W. and C. Gagné, 2000b. Scheduling continuous casting of aluminum using a multipleobjective ant-colony heuristic, *European Journal of Operational Research* , (to appear).
- Johnson D.S. and L.A. McGeoch, 1997. *The traveling salesman problem: a case study in local optimization*, *Local Search in Combinatorial Optimization*, E.H.L. Aarts & J.K. Lenstra editors, John Wiley and Sons Ltd., pp. 215-310.
- Kelly, J. P. et Xu, J., "A set-partitioning-based heuristic for the vehicle routing problem", *INFORMS Journal on Computing*, 11, 2 (1999), 161-172.
- Koulamas C., 1994. The total tardiness problem: review and extensions, *Operations research*, 42 (6), p. 1025-1041.
- Laporte, G. et Osman I. H., "Routing problems : A bibliography", *Annals of Operations Research*, 61 (1995), 227-262.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. et Shmoys, D. B., The traveling salesman
- Mak, K.-T. and Morton, A. J., "A modified Lin-Kernighan traveling-salesman heuristic", *Operations Research Letters*, 13 (1993), 127-132.
- Nakhla M., , « Production control in the food processing industry : The need for flexibility in operations scheduling » *International Journal of Operations & Production Management. Volume 15, N°3.*(1994).

Osman I. H., "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem", *Annals of Operations Research*, 41 (1993), 421-451.

Pinedo M., 1995. *Scheduling theory, algorithms and systems*, Prentice-Hall, NJ.

Ragatz G.L., 1993. A branch-and-bound method for minimum tardiness sequencing on a single processor with sequence dependent setup times, *Proceedings: Twenty-fourth Annual Meeting of the Decision Sciences Institute*, p. 1375-1377.

problem. A guided tour of combinatorial optimisation. John Wiley & Sons, 1985.

Psaraftis, H. N., "k-interchange procedures for local search in a precedence-constrained routing problem", *European Journal of Operational Research*, 13 (1983), 391-402.

Renaud, J., Boctor, F. F. et Laporte, G., "A fast composite heuristic for the symmetric traveling salesman problem", *INFORMS Journal on Computing*, 3, 2 (1996) 134-143.

Renaud, J., Boctor, F. F. et Laporte, G., "An improved petal heuristic for the vehicle routing problem", *Journal of the Operational Research Society*, 47 (1996), 329-336.

Renaud, J., Boctor, F. F. et Ouenniche, J., "A heuristic for the pickup and delivery traveling salesman problem", *Computers and Operations Research* (2000), à paraître.

Rubin P.A. and G.L. Ragatz, 1995. Scheduling in a sequence dependent setup environment with genetic search, *Computers and Operations Research*, 22 (2), p. 85-99.

Savelsbergh, M. W. P. et Sol, M., "The general pickup and delivery problem", *Transportation Science*, 29, 1 (1995), 17-29.

Savelsbergh, M. W. P., "An efficient implementation of local search algorithms for constrained routing problems", *European Journal of Operational Research*, 47 (1990), 75-85.

Taillard, É., "Parallel iterative search methods for vehicle routing problems", *Networks*, 23 (1993), 1-13.

Tan K.C. and R. Narasimhan, 1997. Minimizing tardiness on a single processor with sequencedependent setup times: a simulated annealing approach, *Omega*, 25 (6), p. 619-634.

Tan K.C., Narasimhan R., Rubin P.A. and G.L. Ragatz, 2000., A comparison of four methods for minimizing total tardiness on a single processor with sequence dependent setup times, *Omega*, 28, p. 313-326.

Wilbrecht J.K. and W.B. Prescott, 1969. The influence of setup time on job performance, *Management Science*, 16, p. 274-280.

Wortman D.B., 1992. Managing capacity: getting the most from your firms assets, *Industrial Engineering*, 24, p.47-49.

Yang W.-H., Liao C.-J., (1999), Survey of scheduling research involving setup times, *International Journal of Systems Science*, 30 (2), p. 143-155.