

Ordonnancement sous contraintes d'énergie et de ressources humaines

HAIT Alain^{a*}, ARTIGUES Christian^b, TREPANIER Martin^c et BAPTISTE Pierre^c

^a Université de Toulouse

INPT ENSIACET / LGC Département Procédés et Systèmes Industriels

118 route de Narbonne 31077 Toulouse cedex 4

^b LAAS-CNRS

7 avenue du Colonel Roche 31077 Toulouse cedex 4

^c École Polytechnique de Montréal

Département de mathématiques et de génie industriel

C.P. 5079 Succ. Centre-ville, Montréal (Québec), Canada H3C3A7

Résumé

Ce travail s'intéresse à l'ordonnancement dans un atelier de fonderie. Il s'inspire du cas d'une usine de fabrication de tubes. La spécificité de cet exemple vient d'un objectif et de contraintes liés à la consommation d'électricité, de la variabilité des durées opératoires en fonction de la puissance allouée aux fours, ainsi que de la présence d'opérateurs en nombre limité. L'objectif est de minimiser la facture énergétique. Un premier modèle, basé sur une discrétisation fine, a été exposé dans Trépanier et al (2005), suite à l'étude d'une politique de délestage. Nous présentons ici un nouveau modèle en temps continu.

Mots-clés : ordonnancement, énergie, ressources humaines.

1. Introduction

La maîtrise de la consommation d'énergie est une préoccupation de plus en plus présente dans tous les secteurs industriels. L'augmentation des coûts énergétiques, les préoccupations environnementales, les difficultés d'approvisionnement ont un impact sur l'activité des entreprises et les systèmes de production sont affectés en premier lieu. Ces problèmes se déclinent du long terme (ex. installation d'unités, mise en place d'un réseau d'approvisionnement) au court terme (ex. puissance disponible à un instant donné).

En génie des procédés, le lien entre les contraintes énergétiques et l'activité d'un système de production peut être particulièrement fort. Ce problème est abordé de différentes manières. Une première démarche consiste à optimiser l'outil de production lui-même. L'intégration énergétique vise à réduire la consommation en optimisant les échanges au niveau d'une unité continue (Linnhoff, 1994). Pour une unité discontinue, une démarche similaire consiste à mettre en place un système énergétique flexible capable de répondre à une demande changeante (Verheyen et Zhang, 2006, Sarimveis et al 2003). Dans ce dernier cas, on constate cependant que la consommation dépend aussi de l'activité de l'unité. L'intégration des aspects énergétiques dans la planification et l'ordonnancement de la production devient alors intéressante (Corominas et al 1994, Grau et al 1996, Zhang et Hua, 2005).

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : Alain.Hait@ensiacet.fr, artigues@laas.fr

Cette démarche d'intégration des contraintes d'énergie dans la planification et l'ordonnancement de la production se retrouve pour d'autres types de ressources dont la disponibilité peut poser problème. C'est en particulier le cas des ressources humaines (Baptiste et al, 2005a). Lorsqu'on trouve simultanément des contraintes liées à l'énergie et aux ressources humaines, il y a donc des chances de trouver des interactions entre la production et ces ressources (Trepanier et al, 2003, Baptiste et al, 2005b).

La complexité des problèmes est un obstacle majeur à l'intégration des contraintes de ressources dans la gestion de la production. En génie des procédés comme ailleurs, l'ordonnancement a donné lieu à de nombreux travaux (Pinto et Grossmann 1998, Méndez et al 2006), proposant divers modèles et méthodes de résolution. Les progrès dans ce domaine permettent maintenant d'envisager un ordonnancement intégré (Méndez et Cerda 2004).

Après avoir présenté le contexte qui a donné naissance à ce travail, nous proposons un modèle global d'ordonnancement qui intègre les aspects énergétiques et de ressources humaines, puis des résultats obtenus pour différents cas d'étude. Enfin, des pistes d'évolution sont proposées.

2. Présentation du problème

2.1 Contexte

Le cas étudié est la partie "fonderie" d'une usine de fabrication de tubes et de barres de cuivre située dans l'est de l'île de Montréal. L'atelier renferme trois fours dans lesquels sont fondus des alliages de cuivre qui sont ensuite coulés en billettes servant à la tuberie et à la tréfilerie (fig. 1). Ces fours consomment de grandes quantités d'électricité, ce qui a forcé l'ingénieur d'usine à installer un mécanisme de délestage pour lisser les pics de puissance (kW). Le chargement et la coulée sont effectués par une ou plusieurs équipes, qui ne peuvent travailler que sur une seule opération à la fois.

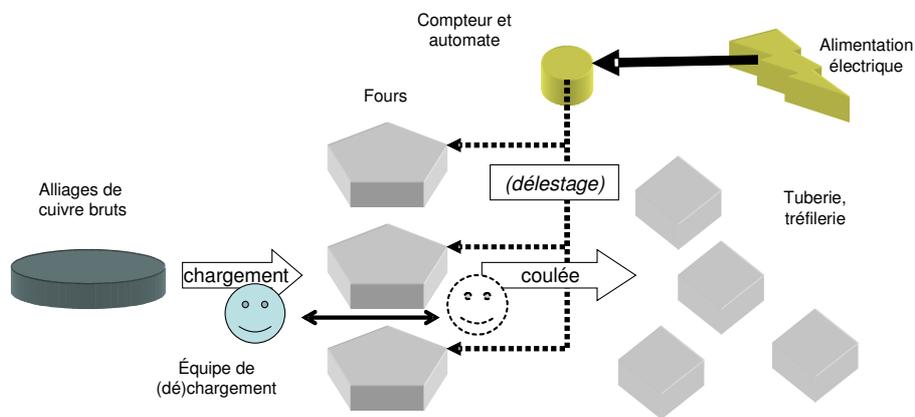


Figure 1. Schéma de l'atelier étudié.

2.2 Tarification électrique

L'opération de délestage est rendue nécessaire par la politique tarifaire du distributeur d'électricité (Hydro-Québec), qui vise à lisser la consommation énergétique en taxant fortement la puissance demandée (kW) par rapport à l'énergie consommée (kWh). Le tarif mensuel est donné par :

$$F = f_1 P + f_2 E + f_3 P_D$$

$$P_D = (P' - 1.1 \cdot P) \text{ si } P' \geq 1.1 \cdot P$$

Où f_1 est le tarif mensuel d'abonnement (10,95\$/kW), P la puissance demandée (kW), f_2 le tarif de consommation (0,0242\$/kWh), E l'énergie consommée (kWh), f_3 le tarif de dépassement qui atteint 32\$ pour chaque kW au-delà de 110% de la puissance demandée. Les consommateurs ont donc tout intérêt à éviter les dépassements de leur abonnement. Il y a cependant du jeu amené par la manière dont le distributeur mesure cette pointe, ce qui est expliqué dans la section suivante.

2.3 Délestage

Le délestage a été mis en place pour éviter que la pointe de la puissance demandée par les fours ne cause un dépassement de la puissance d'abonnement de toute l'usine. Le distributeur d'électricité vérifie ces dépassements par intervalles fixes de 15 minutes à l'aide de signaux (tics) envoyés dans le réseau électrique (ce mode de fonctionnement semble être commun en Amérique du Nord). Le nombre de tics est proportionnel à l'énergie consommée (kWh). Il est donc possible pour le consommateur de dépasser momentanément la puissance demandée au cours d'un intervalle pour autant que le réseau électrique de l'usine le permette et que la quantité d'énergie consommée durant ces 15 minutes (kWh) ne dépasse pas celle permise (kW de la puissance demandée x 15 minutes). Le taux de délestage est donc régulé pour s'assurer que ce dépassement n'aura pas lieu.

En pratique, un automate programmable vérifie, toutes les dix secondes, le nombre de tics utilisés et le compare au nombre de tics permis depuis le début du quart d'heure. Si le nombre utilisé dépasse le seuil permis, le délestage est mis en place : baisse de la puissance fournie d'un taux pouvant aller jusqu'à concurrence de 50% de la puissance. La simulation du comportement de l'automate a été présentée par Trépanier et al (2005). Cette étude a permis de constater la pertinence de l'approche de délestage vis-à-vis de la facture énergétique (déjà démontrée par l'implantation effective du délestage dans l'usine). Elle a également mis en évidence l'intérêt d'une politique de délestage ciblée (et non homogène sur l'ensemble des fours comme cela était mis en œuvre), en fonction de la charge prévue sur chaque four.

2.4 Problématique

La réponse apportée par le délestage au problème de facture énergétique est satisfaisante dans le sens où elle limite effectivement les dépassements de puissance. En revanche, il s'agit d'une démarche a posteriori, qui se contente de réagir à la consommation d'énergie constatée pour limiter la consommation moyenne dans un intervalle de 15 minutes. Son action a pour conséquence le rallongement des durées opératoires de fusion, ce qui a un impact sur l'activité de l'atelier et de ses opérateurs.

L'intérêt du délestage ciblé montre l'avantage d'une connaissance de l'activité de l'atelier pour orienter le délestage. Pour aller plus loin dans cette direction, nous proposons une vision globale de l'atelier, qui intègre l'ordonnancement des travaux et leur affectation aux fours, la détermination des dates de début et de fin des travaux, ainsi que les contraintes de disponibilité des opérateurs, dans le but de minimiser la facture énergétique.

3. Modèle d'ordonnancement avec contraintes d'énergie et de ressources humaines

Nous présentons un modèle de programmation linéaire en variables mixtes pour optimiser la facture énergétique, qui prend en compte les contraintes liées aux travaux (affectation, succession, dates de disponibilité et de livraison), à l'énergie (répartition, limites) et aux ressources humaines (disponibilité). Le modèle présenté dans Trépanier et al (2005) reposait sur une discrétisation fine de l'horizon : les intervalles de 15 minutes étaient subdivisés en périodes d'une minute. L'inconvénient de cette discrétisation est le nombre important de variables binaires nécessaire pour repérer les débuts et fins des

travaux (Floudas et Lin, 2004). Nous proposons ici un modèle en temps continu, dans lequel la discrétisation par intervalles n'est utilisée que pour les contraintes liées à l'énergie.

3.1 Représentation des travaux

L'atelier de fonderie possède une structure de type machines parallèles. Dans ce modèle, nous considérons que les fours sont identiques et qu'ils peuvent recevoir n'importe quel travail.

Un travail i est constitué de trois opérations : chargement dans le four, fusion et déchargement (Fig. 2). Les opérations de chargement et déchargement ont une durée connue (resp. Dc_i et Dd_i) et font appel à de la main d'œuvre spécifique, dont la disponibilité peut être une contrainte. L'opération de fusion a une durée variable en fonction de la quantité d'énergie E_i nécessaire pour assurer la fusion et de celle apportée par le four (la puissance du four peut varier entre P_{min} et P_{max}). De plus, lorsque la fusion est terminée, si l'opérateur qui doit effectuer le déchargement n'est pas disponible, il faut maintenir le four en température en lui apportant de l'énergie à une puissance fixée P_{maint} (Fig. 2).

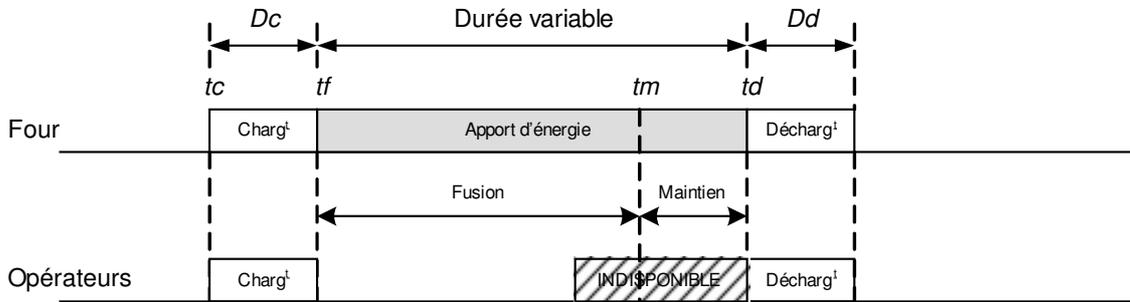


Figure 2. Modèle en temps continu : description d'un travail.

Pour représenter les travaux et leur ordonnancement, nous avons choisi une formulation en temps continu. Les travaux sont définis par les dates tc , tf , tm et td , respectivement dates de début du chargement, de la fusion, du maintien et du déchargement. L'affectation des travaux aux fours et la séquence de passage sont représentées par les variables binaires suivantes :

$aff(i,j)$ égale 1 si le travail i est affecté au four j , 0 sinon.

$prec(i_1,i_2)$ égale 1 si le travail i_1 précède le travail i_2 sur la même machine.

Les contraintes d'affectation et de séquencement sont présentées ci-dessous :

$$\sum_{j \in J} aff(i,j) = 1 \quad \forall i \in I \quad (1)$$

$$prec(i_1,i_2) + prec(i_2,i_1) \leq 1 \quad \forall i_1 \in I, i_2 \in I, i_1 \neq i_2 \quad (2)$$

$$prec(i_1,i_2) + prec(i_2,i_1) \geq aff(i_1,j) + aff(i_2,j) - 1 \quad \forall i_1 \in I, i_2 \in I, i_1 \neq i_2, j \in J \quad (3)$$

L'équation (1) garantit qu'un travail n'est affecté qu'à un four. L'équation (2) traduit l'antisymétrie de la relation de précédence. L'équation (3) assure que si deux travaux sont affectés à la même machine, une relation de précédence existe entre eux.

Les dates de début et de fin des travaux sont contraintes par les dates de disponibilité et de livraison $Tdispo$ et $Tlivr$, ainsi que par les contraintes de précédence :

$$tc_i \geq Tdispo_i \quad \forall i \in I \quad (4)$$

$$td_i + Dd_i \leq Tlivr_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$tf_i = tc_i + td_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$td_i \geq tf_i + E/P_{max} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$tc_{i_2} \geq td_{i_1} + Dd_{i_1} - M(3 - aff(i_1, j) - aff(i_2, j) - prec(i_1, i_2)) \quad \forall i_1 \in I, i_2 \in I, i_1 \neq i_2, j \in J \quad (8)$$

L'équation (6) lie les valeurs de tc et tf , car la fusion débute immédiatement après le chargement. La date de déchargement dépend de la durée de la fusion et du maintien, mais la durée minimale du travail correspond à un apport d'énergie à puissance maximale (7). La contrainte (8), associée à (2) et (3), traduit la disjonction de précedence de deux travaux sur le même four. M correspond à l'horizon.

3.2 Contraintes d'énergie

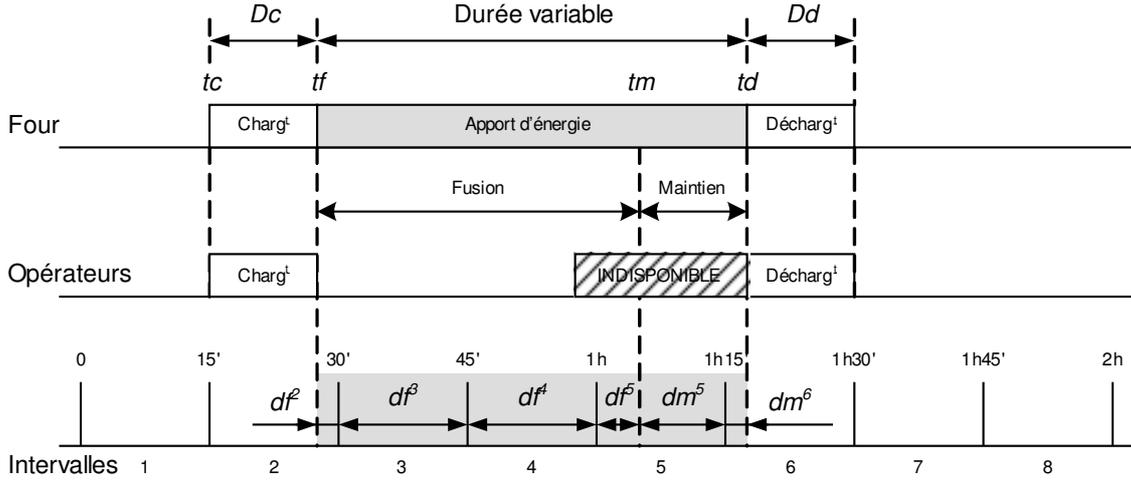


Figure 3. Découpage en intervalles.

L'horizon de temps est divisé en U intervalles u de durée $D=15$ minutes, utilisés pour évaluer la consommation d'énergie. Lorsque la fusion a lieu, une quantité d'énergie ef_i^u est apportée au travail i à chaque intervalle u . L'énergie ef_i^u dépend de la puissance du four (constante sur l'intervalle et comprise entre P_{min} et P_{max}) et de la durée de l'apport sur l'intervalle, notée df_i^u (Fig. 3). Le travail se termine lorsqu'on a apporté la totalité de l'énergie E_i nécessaire. A ce moment-là, si l'équipe de déchargement n'est pas disponible, le four doit être maintenu en température, avec une puissance P_{maint} (l'énergie de maintien em_i^u est de l'énergie perdue). Sur un intervalle, la durée du maintien est notée dm_i^u .

La détermination des durées df_i^u et dm_i^u nécessite de repérer la position de tf , tm et td par rapport aux intervalles. Pour cela, des variables binaires sont utilisées. Elles servent à identifier les intervalles au cours desquels un apport d'énergie (fusion ou maintien) peut avoir lieu. Le passage à 1 de la variable zf_i^u indique que la fusion a commencé durant l'intervalle u , et celui de zd_i^u que le déchargement a commencé durant l'intervalle $u-1$. De même, le passage à 1 de zm_i^u indique que la transition entre la fusion et le maintien a lieu durant l'intervalle $u-1$. Les contraintes utilisées pour déterminer zf_i^u sont les suivantes :

$$tf_i \geq D.u(1-zf_i^u) \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (9)$$

$$tf_i \leq D.u + M(1-zf_i^u) \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (10)$$

$$zf_i^U = 1 \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$zf_i^{u+1} \geq zf_i^u \quad \forall i \in I, u \in 1..U-1 \quad (12)$$

Les équations (9) et (10) situent tf_i par rapport à l'intervalle u . La valeur de M correspond à l'horizon complet, soit $D.U$. Les cas où tf_i correspond exactement à la limite entre deux intervalles sont traités lors de la détermination de df_i^u et dm_i^u (zf_i^u peut donc indifféremment valoir 0 ou 1). Les valeurs de zd_i^u et zm_i^u sont déterminées de manière similaire.

Les variables zf_i^u , zm_i^u et zd_i^u sont liées par l'enchaînement des dates (équ. 13 et 14). De même, les relations de précedence entre travaux peuvent donner lieu à des contraintes liant leurs variables binaires.

$$zf_i^u \geq zm_i^u \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (13)$$

$$zm_i^u \geq zd_i^u \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (14)$$

La durée de l'apport d'énergie pour la fusion sur un intervalle est déterminée par les équations suivantes :

$$\sum_{u=1}^U df_i^u = tm_i - tf_i \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$df_i^u \leq D(zf_i^u - zm_i^u) \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (16)$$

$$df_i^u \geq D.u(zf_i^u - zf_i^{u-1}) - tf_i - D.zm_i^{u+1} \quad \forall i \in I, u \in 2..U-1 \quad (17)$$

$$df_i^u \geq tm_i - D(u-1)(zm_i^{u+1} - zm_i^u) - D.U(1 - (zm_i^{u+1} - zm_i^u)) - D(1 - zf_i^{u-1}) \quad \forall i \in I, u \in 2..U-1 \quad (18)$$

$$df_i^u \geq D(zf_i^{u-1} - zm_i^{u-1} + zf_i^{u+1} - zm_i^{u+1} - 1) \quad \forall i \in I, u \in 2..U-1 \quad (19)$$

L'apport d'énergie a lieu lorsque $zf_i^u - zm_i^u = 1$ (16). Les équations (15) à (18) garantissent que df_i^u prend les bonnes valeurs entre tf_i et tm_i (Fig. 3), c'est-à-dire D si tf_i et tm_i sont hors de l'intervalle (19) et une valeur inférieure dans les autres cas. Les valeurs de dm_i^u sont calculées de manière similaire.

La quantité d'énergie apportée pour la fusion est déterminée pour chaque intervalle en respectant les valeurs min/max de la puissance des fours (équ. 20 et 21). Le total correspond à E_i , énergie nécessaire pour le travail i (22) :

$$ef_i^u \geq P_{min}.df_i^u \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (20)$$

$$ef_i^u \leq P_{max}.df_i^u \quad \forall i \in I, u \in 1..U \quad (21)$$

$$\sum_{u=1}^U ef_i^u = E_i \quad \forall i \in I \quad (22)$$

3.3 Contraintes liées aux ressources humaines

Les contraintes de ressources humaines sont représentées par des périodes d'indisponibilité des opérateurs de chargement et déchargement. Une indisponibilité k est caractérisée par son affectation à un four $AffI(k,j)$ (binaire), sa date de début $Tdeb_k$ et sa date de fin $Tfin_k$.

Il y a trois positions possibles d'une indisponibilité par rapport à un travail affecté au même four : avant le chargement, entre le chargement et le déchargement, après le déchargement. Ces positions sont représentées par les variables binaires $preIc(i,k)$ et $preId(i,k)$.

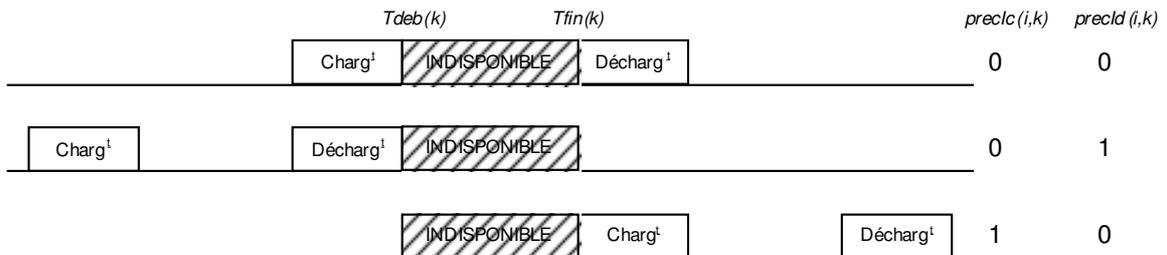


Figure 4. Position relative travail/indisponibilité.

Les contraintes qui traduisent ces relations sont les suivantes :

$$precIc(i,k) + precId(i,k) \leq 1 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (19)$$

$$tf_i \leq Tdeb_k + M(2 - aff(i,j) - aff(k,j) + precIc(i,k)) \quad \forall i \in I, k \in K, j \in J \quad (20)$$

$$tc_i \geq Tfin_k - M(3 - aff(i,j) - aff(k,j) - precIc(i,k)) \quad \forall i \in I, k \in K, j \in J \quad (21)$$

$$td_i + Dd_i \leq Tdeb_k + M(2 - aff(i,j) - aff(k,j) + precId(i,k)) \quad \forall i \in I, k \in K, j \in J \quad (22)$$

$$td_i \geq Tfin_k - M(3 - aff(i,j) - aff(k,j) - precId(i,k)) \quad \forall i \in I, k \in K, j \in J \quad (23)$$

Ainsi, les indisponibilités sont traitées comme des activités qui ont la particularité de pouvoir s'intercaler entre le chargement et le déchargement d'un travail. Lorsque c'est le cas, l'indisponibilité peut décaler la date de déchargement au-delà de la fin de la fusion. C'est alors qu'apparaît le maintien (Fig. 3).

3.3 Objectif

L'objectif (27) consiste à minimiser la facture énergétique présentée au §2.2. Le premier terme correspond à l'énergie consommée (24), le second aux dépassements de puissance. L'évaluation des dépassements s'effectue en moyenne par intervalle, en divisant la consommation globale par la durée de l'intervalle. Un dépassement correspond à 110 % de la puissance souscrite P (équ. 25 et 26).

$$se^u = \sum_{i=1}^I (ef_i^u + P_{maint} dm_i^u) \quad \forall u \in 1..U \quad (24)$$

$$dep^u \geq se^u / D - 1,1 P \quad \forall u \in 1..U \quad (25)$$

$$dep^u \geq 0 \quad \forall u \in 1..U \quad (26)$$

$$Min \sum_{u=1}^U (f_2 \cdot se^u + f_3 \cdot dep^u) \quad (27)$$

3. Résultats expérimentaux

L'exemple présenté ci-dessous est issu de Trépanier et al (2005). Il a été adapté pour mettre en évidence les effets des indisponibilités. Nous considérons trois fours identiques d'une puissance maximale de 1200kW chacun. La puissance minimale et la puissance de maintien correspondent à la moitié de la puissance maximale. Les tarifs du distributeur sont ceux donnés au §2.2.

Le premier cas consiste à réaliser douze travaux identiques dans une journée. Chaque travail nécessite 1500 kWh pour être réalisé et peut être affecté à n'importe quel four. Les opérations de chargement et déchargement durent un quart d'heure. La journée dure 9 heures et comprend des périodes durant lesquelles les opérateurs sont indisponibles : une pause d'un quart d'heure le matin et l'après midi et une pause d'une heure et demi pour le repas de midi. Le reste du temps, un opérateur est disponible pour chaque four.

L'ordonnancement obtenu est présenté sur la figure 5. On note que la majorité des travaux est placée de manière à enjambrer une période d'indisponibilité. Le placement des pauses et les durées mini/maxi des travaux oblige cependant à placer trois travaux en parallèle avec une puissance maximale durant les deux premières heures, ce qui entraîne un dépassement dans cette période. Pour les autres travaux en parallèle, une énergie moindre est fournie à au moins l'un d'eux, ce qui permet d'éviter les dépassements mais allonge la durée de fusion. Abonnement non compris, la facture correspondant à ce résultat est de 30835,6\$, dont 30400\$ dus au dépassement !

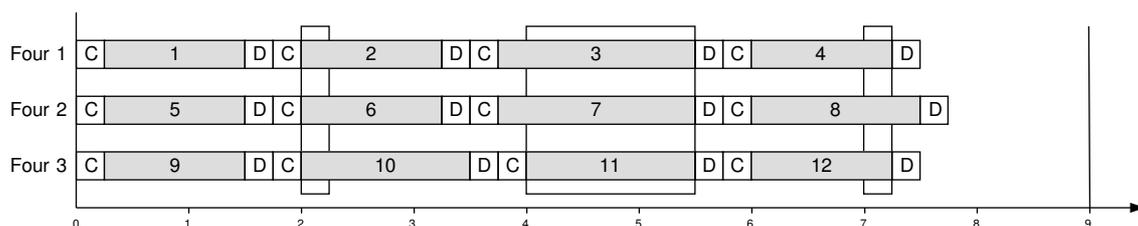


Figure 5. Cas à trois fours avec pauses fixes.

Afin de tenter de faire disparaître le dépassement, nous considérons maintenant que les pauses du matin et de l’après-midi, dont la durée reste fixée à un quart d’heure, peuvent se situer dans un intervalle d’une demi-heure commençant le matin à l’heure 2 et l’après-midi à l’heure 7. Ce simple relâchement sur la position des pauses permet d’obtenir une solution sans dépassement (fig. 6), en décalant la pause du matin sur le four 1. La facture revient à 435,6 \$, correspondant à la facturation de l’énergie dépensée.

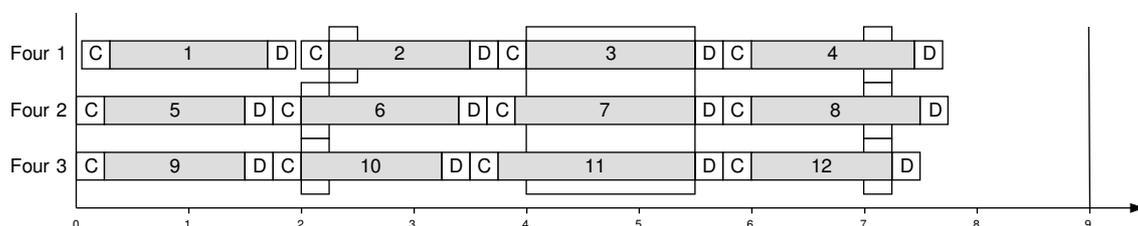


Figure 6. Cas à trois fours avec pauses mobiles.

4. Conclusion

Nous avons étudié, avec le cas d’une unité de fonderie, l’ordonnancement d’un atelier soumis à des contraintes d’énergie et de ressources humaines. Le modèle de programmation linéaire en variables mixtes établi à ce propos permet une résolution globale du problème. La représentation en temps continu a permis de diminuer sensiblement le nombre de variables par rapport au modèle précédemment proposé.

Les premiers résultats obtenus donnent satisfaction. Nous avons présenté un exemple à douze travaux et trois machines pour lequel les dépassements sont limités par la répartition des travaux et de l’énergie qu’on leur apporte. Nous avons ensuite mis en évidence l’intérêt de laisser de la liberté sur les positions des pauses. Le positionnement judicieux des travaux et des pauses permet alors d’éviter une période de dépassement.

Le modèle offre de nombreuses possibilités de tests qui restent encore à explorer. Le niveau de complexité reste cependant un souci lorsqu’on souhaite représenter une situation réelle. Afin d’améliorer les temps de résolution, la mise en oeuvre d’une approche hybride programmation linéaire / programmation par contraintes est une perspective de poursuite de ce travail.

Références

- Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., 2005a, Gestion de production et ressources humaines. Méthodes de planification dans les systèmes productifs, Presses Internationales Polytechnique, Montréal.
- Baptiste, P., Trépanier, M., Piraux, S. et Quessy, S., 2005b, Difficultés liées à l'intégration de la gestion des ressources dans le pilotage des opérations, *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 38, n° 7/8, 773-795.
- Corominas, J., Espuña, A. et Puigjaner, L., 1994, Method to incorporate energy integration considerations in multiproduct batch processes, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 18 n°11/12, 1043-1055.
- Floudas, C. A. et Lin, X., Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, 2109-2129.
- Grau, R., Graells, M., Corominas, J., Espuña, A. et Puigjaner, L., 1996, Global strategy for energy and waste analysis in scheduling and planning of multiproduct batch chemical processes, *Computers and Chemical Engineering*, vol 20, n°6/7, 853-868.
- Linnhoff B., 1994, Use of pinch analysis to knock down capital cost and emission, *Chemical Engineering Progress*, August 1994.
- Méndez, C. A. et Cerdá, J., 2004, An MILP framework for batch reactive scheduling with limited discrete resources, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, 1059-1068.
- Méndez, C. A., Cerdá, J., Grossmann, I. E., Harjunkoski, I. et Fahl, M., 2006, State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 30, 913-946.
- Pinto, J. M. et Grossmann, I. E., 1998, Assignment and sequencing models for the scheduling of process systems, *Annals of Operations Research*, vol. 81, 433-466.
- Sarimveis, H. K., Angelou, A. S., Retsina, T. R., Rutherford et S. R., Bafas, G.V., 2003, Optimal energy management in pulp and paper mills, *Energy Conversion and Management*, vol. 44 n°10, 1707-1718.
- Trépanier, M., Baptiste, P. et Quessy, S., 2003, Intégration de la gestion de l'énergie et des ressources humaines dans le pilotage d'un système de gestion de production, *Actes du 5^e Congrès International de Génie Industriel*, Québec.
- Trépanier, M., Baptiste, P., Haït, A. et Arcienagas Alvarez, I. D., 2005, Modélisation des impacts du délestage énergétique sur la production, *Actes du 6^e Congrès International de Génie Industriel*, Besançon.
- Verheyen W. et Zhang N., 2006, Design of flexible heat exchanger network for multi-period operation, *Chemical Engineering Science*, 61, 7730-7753.
- Zhang, B. J. et Hua, B., 2005, Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization, *Journal of Cleaner Production*, vol 15, n°5, 439-448.