

MODELE INTEGRE POUR L'ORDONNANCEMENT D'ATELIERS BATCH ET LA PLANIFICATION DE CENTRALES DE COGENERATION

R. THERY, G. HETREUX, M. AGHA

Laboratoire de Génie Chimique - ENSIACET

118 route de Narbonne

31077 Toulouse Cedex

Raphael.Thery@ensiacet.fr

RÉSUMÉ : *Les ateliers batch et/ou semi-continus sont des systèmes de production fortement consommateurs d'énergie sous différentes formes couramment appelées "utilités" (vapeur haute, moyenne et basse pression, électricité...). Pour satisfaire leurs besoins en utilités, ces ateliers disposent souvent sur le même site d'une centrale de cogénération. Traditionnellement, la gestion de ce type de système s'effectue en trois étapes successives : ordonnancement de l'atelier visant à minimiser la durée du plan (par exemple), intégration énergétique destinée à estimer les besoins en utilités de l'atelier et enfin, planification de la production des utilités par la centrale de cogénération. Cet article démontre l'intérêt d'une démarche intégrée permettant de réaliser ces tâches simultanément. Pour cela, un modèle d'ordonnancement en temps discret d'une unité de production batch est couplé à un modèle de fonctionnement d'une centrale de cogénération. Les premiers résultats montrent que l'approche intégrée permet d'obtenir une réduction notable du coût énergétique. Les activités de production et de fabrication d'utilités sont en effet mieux coordonnées. Les tâches de production sont ordonnancées de manière à consommer sur les mêmes périodes les utilités générées simultanément par la centrale de cogénération, conduisant ainsi à une réduction significative du rapport quantité de bien fabriqués / quantité de carburant consommé.*

MOTS-CLÉS : *Intégration de procédés, Ordonnancement des ateliers, Cogénération, Gestion des utilités, MILP*

1. VERS UNE GENERALISATION DES PARCS ECO-INDUSTRIELS

1.1. Contexte de l'étude

La question de l'énergie est un point majeur des réflexions de notre société et le restera sans aucun doute dans les prochaines années. En effet, face à une raréfaction de certaines sources (épuisement prévu, difficultés d'approvisionnement), aux impératifs écologiques de plus en plus présents, au développement de nouvelles sources d'énergie et à une augmentation globale de la demande, le modèle de gestion de l'énergie des prochaines années reste à établir.

Ces considérations touchent tout particulièrement le secteur industriel, important consommateur d'énergie. L'augmentation des coûts énergétiques et la volonté de ne pas dépendre d'un seul fournisseur ont conduit les entreprises à reconsidérer leur approvisionnement et leur consommation en énergie. Par ailleurs, elles sont tenues de respecter les nouvelles réglementations environnementales, mais doivent aussi conserver des solutions économiquement compétitives.

Récemment, on constate une volonté plus marquée des entreprises de se regrouper afin de constituer des réseaux leur permettant une utilisation plus rationnelle des utilités (vapeur haute, moyenne et basse pression, électricité...). Ainsi, par exemple, une expérience menée au Danemark a permis de mettre en place une « *symbiose industrielle* » entre cinq grandes entrepri-

ses d'une même région (Caddet, 1999). La construction d'un véritable réseau d'échange de flux énergétiques entre ces entreprises a ainsi permis de réduire notablement la consommation d'énergie globale de ces unités de production. C'est le concept de "parc éco-industriels" (Gibbs et Deutz, 2007). Toutefois, si cette coopération s'avère prometteuse, le manque de méthodologies et d'outils d'aide à la conception et à la gestion de ces réseaux constitue aujourd'hui un frein à la généralisation de ce type d'expériences.

1.2. Le projet PRIME

C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet **PRIME** (Projet de Recherche pour l'Intégration Multisite de l'Energie), déposé dans le cadre du programme interdisciplinaire "énergie" du CNRS. L'objectif général de ce projet qui implique le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse et le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes est de proposer aux entreprises désireuses de coopérer autour de leur approvisionnement énergétique, un prototype de système de gestion prenant en compte simultanément les échanges d'énergie et l'activité de production dans un réseau multisite. S'il existe des travaux concernant des réseaux de distribution (producteurs vers consommateurs), ce projet apporte une dimension supplémentaire par le fait que chaque site industriel a des objectifs de production propres, qu'il faut harmoniser avec l'objectif global de réduction de la consommation

d'énergie dans le réseau. Pour y parvenir, ce projet est décomposé en deux axes complémentaires :

- d'une part, l'étude du cas dit "*monosite*" qui s'intéresse principalement à des procédés constitués d'opérations discontinues et/ou semi-continues. A ce niveau, il s'agit ici de développer un modèle de gestion intégrant à la fois la production d'utilités (notamment par cogénération) et l'ordonnancement des tâches de production de l'unité et de montrer l'intérêt de cette démarche en la comparant avec une approche « classique » dans laquelle les phases d'ordonnancement et de planification énergétique sont réalisées de manière séquentielle.

- d'autre part, l'exploration du cas dit "*multisite*" qui vise à étudier les échanges d'énergie entre sites géographiquement proches (par exemple au niveau d'une agglomération). Outre la constitution d'un réseau adéquat, ces échanges nécessitent la coordination des activités des différents sites pour minimiser les coûts liés à l'énergie. Ceci demande une vision globale de la gestion de production des sites, pour que chacun atteigne ses objectifs industriels tout en économisant de l'énergie.

Dans cette contribution, seul le cas *monosite* est abordé.

1.3. Cas d'étude considéré et objectifs

De nombreuses opérations de production induisent la consommation d'énergie sous différentes formes (électricité, eau chaude, vapeur haute pression, vapeur moyenne pression, ...) regroupées sous le terme d'*utilités* ou de vecteur énergétique. Au niveau d'une unité de production industrielle, le concept d'*intégration énergétique* (Linnhoff, 1994) vise à optimiser les échanges internes à l'unité afin de réduire la consommation globale d'utilités. Cela consiste par exemple à mettre en place un réseau d'échangeurs de chaleur pour transférer l'énergie d'un point à l'autre du site de production.

Cependant, la consommation d'énergie est nécessairement corrélée à l'activité de l'unité, donc à la gestion de sa production. Or, cet aspect est rarement pris en compte. En effet, les travaux les plus fréquents concernent plutôt le dimensionnement des circuits d'échange dans le cas d'unités fonctionnant à un régime permanent donné. En revanche, l'intégration des contraintes de production des utilités au sein du système de gestion de la production d'unités batch dont la dynamique induit différents régimes de fonctionnement constitue un thème original.

Dans ce contexte, cette contribution se propose de s'intéresser aux unités de production constituées d'opérations discontinues ou semi-continues et couplés à une centrale de production d'utilités destinée à alimenter l'atelier en vapeur haute, moyenne et basse pression. Par ailleurs, cette centrale de production d'utilités étant une unité de cogénération, il permet dans le même temps de satisfaire une partie des besoins en électricité de l'atelier (cf. figure 1).

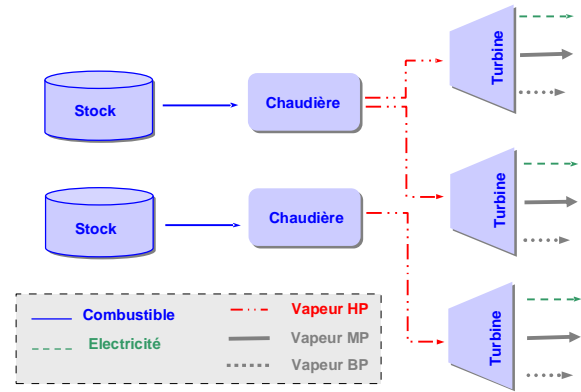


Figure 1. Schéma de principe général d'une centrale de cogénération

Dans une première partie, une analyse bibliographique relative aux problèmes d'ordonnancement d'ateliers intégrant des contraintes énergétiques, ainsi qu'à la gestion des centrales de production d'utilités et d'électricité par cogénération permet de mettre en évidence l'intérêt d'intégrer au plus tôt ces deux fonctions. Dans les parties suivantes, le cas d'étude envisagé et le modèle considéré sont détaillés. Enfin, les premiers résultats obtenus dans ce cadre sont analysés et commentés.

2. ORDONNANCEMENT DES ATELIERS BATCH ET GESTION DE L'ENERGIE

L'ordonnancement des unités batch a fait l'objet de très nombreuses études durant ces vingt dernières années. Cependant, peu de modèles d'ordonnancement ont été proposés dans lesquels la gestion des utilités est explicitement prise en compte à travers un modèle spécifique. La figure 2 résume la démarche traditionnellement rencontrée pour l'exploitation d'une unité de production et de la centrale de production d'utilités associée. Dans cette approche, trois sous-problèmes sont résolus de manière séquentielle :

- d'abord l'ordonnancement de l'atelier de production détermine les politiques de lotissement et de lancement permettant de minimiser la durée du plan ou les niveaux du stock (par exemple),
- puis, sur la base de ce plan de fabrication, la deuxième étape estime les besoins en utilités (vapeurs haute, moyenne, basse pression, électricité,...) à l'aide des méthodes d'analyse du point de pincement ou "*analyse pinch*" (Corominas et al., 1994).
- enfin, connaissant les besoins en utilités, la dernière étape permet de réaliser la planification de la centrale de cogénération, c'est-à-dire de déterminer la valeur des flux énergétiques circulant dans l'unité pour chaque période de l'horizon de planification.

Toutefois, comme le soulignent Adonyi et al. (2003), le résultat de l'intégration énergétique est fortement

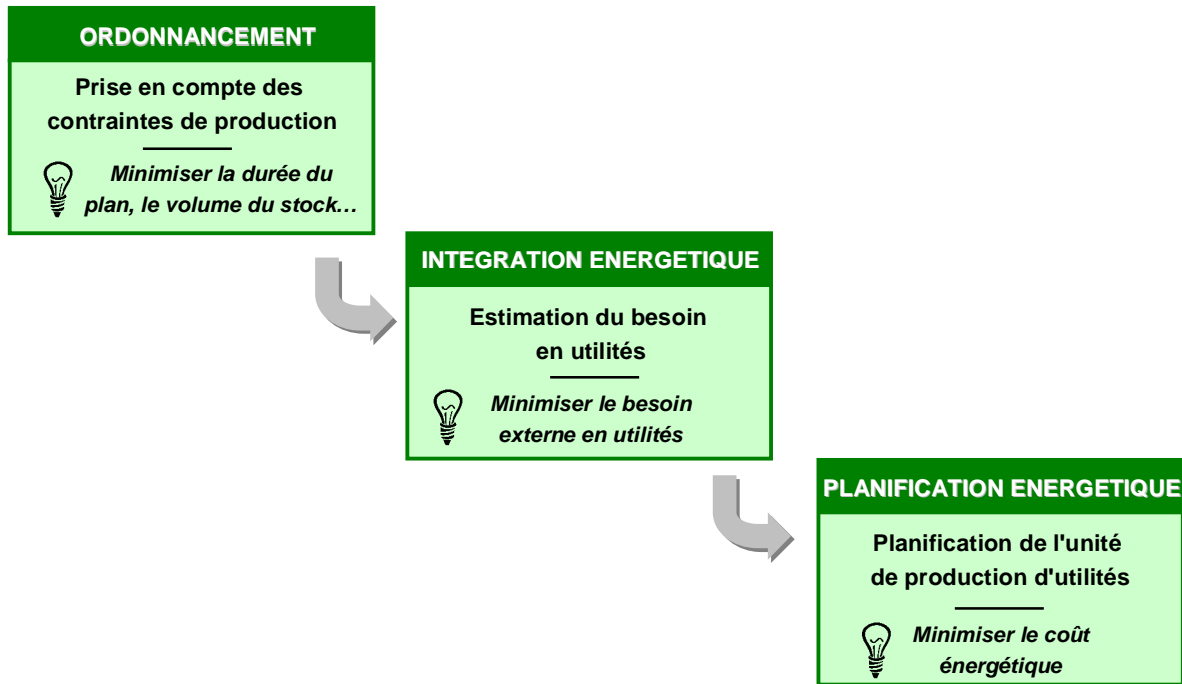


Figure 2. Approche traditionnellement rencontrée pour l'ordonnancement des ateliers et la gestion des centrales de production d'utilités associées

corrélé au plan de fabrication établi. La planification de la centrale de cogénération et par conséquent, le coût énergétique global est donc lui aussi fortement dépendant du résultat de l'étape d'ordonnancement. Une approche séquentielle conduit donc nécessairement à un coût énergétique non optimisé. A l'inverse, procéder en premier lieu à la phase d'intégration énergétique conduirait inévitablement à des infaisabilités au niveau du problème d'ordonnancement. La prise en compte des aspects relatifs à la consommation énergétique dès la phase d'ordonnancement de l'atelier de production semble donc essentielle.

2.1. Ordonnancement des ateliers sous contraintes énergétiques

De nombreux travaux traitent de l'ordonnancement d'ateliers sous contraintes énergétique. Kondili et al. (1992) ont ainsi développé un modèle visant à déterminer un plan de fabrication minimisant un critère de coût incluant la consommation énergétique. Le coût de l'énergie est supposé varier durant la journée et la consommation énergétique dépend de la nature du produit fabriqué et de l'équipement utilisé. En ce sens, ce type d'approche peut être assimilé à une démarche d'ordonnancement sous contrainte de ressource. Il faut toutefois préciser que contrairement aux ressources classiquement prises en compte dans les problèmes d'ordonnancement (machines ou encore ressources humaines), l'énergie présente des caractéristiques spécifiques qu'il convient de prendre en compte. Il s'agit en effet d'une ressource versatile qui se présente sous différentes formes (vapeur à différentes pressions, électricité, eau chaude). C'est aussi une res-

source difficilement stockable sous sa forme ultime. Des travaux plus récents s'attachent à prendre en considération ces particularités. Behdani et al. (2007) ont développé un modèle d'ordonnancement à temps continu incluant des contraintes liées à la production, à la disponibilité et à la consommation de différents types d'utilités (eau de refroidissement, électricité et vapeur). Hait et al. (2007) présentent une approche visant à minimiser la facture énergétique d'un atelier de fonderie soumis à des contraintes spécifiques relatives à la tarification électrique et reposant sur des stratégies de délestage.

Cependant, dans toutes ces approches, l'accent est mis avant tout sur l'unité consommatrice d'énergie, l'unité productrice d'énergie n'étant modélisée que de manière agrégée au travers de contraintes ou moyennant la modification du critère. Le mode de transformation de l'énergie primaire (énergie stockable) en énergie utile (non stockable) et des gains potentiels sur ce processus de transformation n'est en aucun cas pris en compte.

2.2. Planification des centrales de cogénération

Les travaux traitant de la planification des centrales de cogénération sont aussi très nombreux. Nous citerons aussi la contribution de Soylu et al. (2006) qui proposent une approche visant à calculer les flux énergétiques circulant dans une centrale de cogénération sur les différentes périodes de l'horizon de planification. Ces derniers mettent en évidence aussi les bénéfices d'une collaboration entre différentes unités de cogénération pour réduire les coûts et les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce cas, l'étude traite exclusivement de l'unité productrice d'énergie, l'unité consommatrice

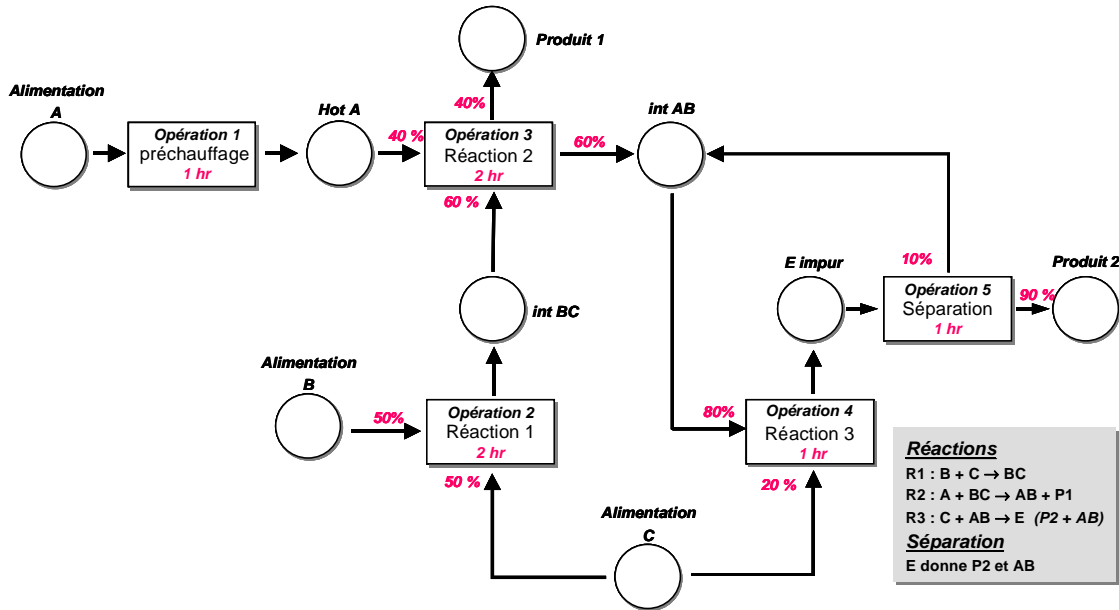


Figure 3. Représentation S.T.N de la recette mise en œuvre dans l'atelier de production

n'étant modélisée que sous la forme de demandes énergétiques externes au modèle.

2.3. Vers une intégration des deux fonctions

Les travaux les plus récents commencent toutefois à se rapprocher du concept de l'intégration de procédés tels qu'il a été défini par Moita et al. (2005) c'est-à-dire l'intégration optimale des différentes unités composant un procédé. Dans le cas des procédés considérés dans cette contribution, il s'agit donc de développer des modèles et méthodes permettant d'optimiser simultanément les problèmes de production, d'intégration énergétique et de planification des centrales de production d'utilités. Adonyi et al. (2003) proposent un modèle intégrant ordonnancement des ateliers et intégration énergétique. Moita et al. (2005) ont développé un modèle dynamique comprenant une carrière d'extraction de sel, l'unité de traitement et l'unité de cogénération associée. Enfin, Zhang et Hua (2007) ont établi un modèle MILP pour la détermination optimale des points de fonctionnement d'une raffinerie couplée à une unité de cogénération.

C'est dans ce cadre que se situe l'étude exposée dans la suite de cette contribution. Il s'agit en effet de mettre en évidence les bénéfices d'une approche intégrée pour l'ordonnancement d'ateliers de production batch ou semi-continu et la planification de la centrale de cogénération associée.

3. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

3.1. L'atelier batch de production

3.1.1. Description de l'atelier

Le système de production considéré est inspiré d'un procédé batch décrit dans Kondili et al. (1993). Il s'agit de fabriquer deux produits $P1$ et $P2$ à partir de 3

matières A , B et C selon la recette décrite par le S.T.N. (State Task Network) de la figure 3. Celle-ci est composée de 5 opérations unitaires (préchauffage, réaction 1, réaction 2, réaction 3, séparation) et génère 4 produits intermédiaires (HotA, intAB, intBC, Eimpur). Cette fabrication est réalisée sur l'unité de production batch montrée sur la figure 4. Les réacteurs 1 et 2 peuvent indifféremment réaliser les opérations 2, 3 ou 4 (partage de ressource). Par ailleurs, il existe une cuve de stockage dédiée à chacun des 9 états de la matière (matières premières, intermédiaires et produits finis). Les durées opératoires sont supposées connues et indépendantes de la taille du batch et de l'appareil utilisé. Cette hypothèse constitue une simplification du problème réel, mais n'affecte pas la validité de l'approche. En effet, la consommation énergétique est proportionnelle au volume du batch et non à sa durée. La topologie du procédé et la capacité des différents équipements sont données sur la figure 4. Notons que ces capacités tiennent compte des différences de densité des matières.

3.1.2. Modélisation

La formulation de ce problème d'ordonnancement s'appuie sur une modélisation en temps discret. L'horizon temporel est donc discrétisé en T périodes ($t=1..T$). Les durées opératoires correspondent alors nécessairement à des multiples de la durée de cette période. La nomenclature donnée en annexe donne la définition de chaque paramètres et variables. Les contraintes du modèle sont les suivantes :

Contraintes d'allocation des unités :

A un instant t donné, une unité j ne peut démarrer au plus qu'une opération i . De plus, si un lancement est effectuée en période t ($W_{i,j,t}=1$) alors cette unité j ne doit plus être disponible ($W_{i,j,t'}=0$) pendant les périodes

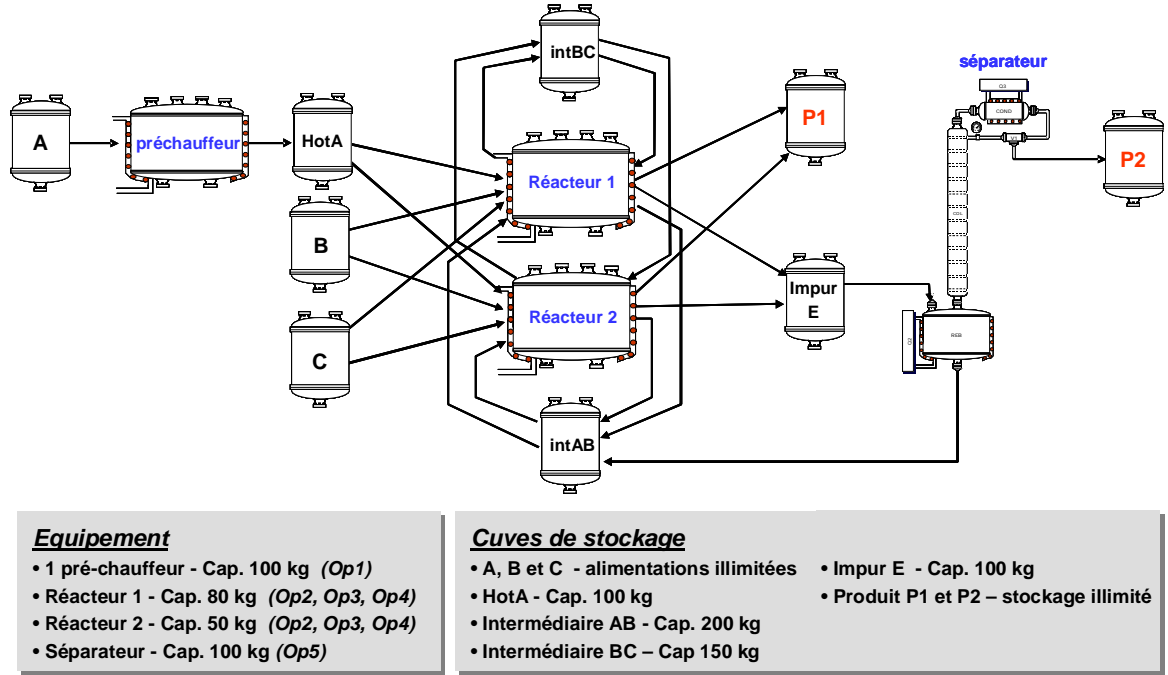


Figure 4 : Topologie de l'atelier de production

des $t'=t+1$ à $t'=t+p_i-1$ (durée de la tâche). Ceci est exprimé par les contraintes (1) :

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{t'=t-p_i+1}^t W_{i,j,t'} \leq 1 \quad \forall j, \forall t \quad (1)$$

Bilans matière :

Ces contraintes indiquent simplement que le stock net de matière dans l'état s en période t est la différence entre les quantités produites et les quantités consommées. Les stocks initiaux $S_{0,s}$ sont supposés connus. Les contraintes (2) traduisent ces bilans :

$$S_{s,t} = S_{s,t-1} + \sum_{i \in I_s^{prod}} \rho_{i,s}^{prod} \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t-p_i} - \sum_{i \in I_s^{cons}} \rho_{i,s}^{cons} \sum_{j \in J_i} B_{i,j,t} - D_{s,t} \quad \forall s, \forall t \quad (2)$$

Limitations de capacité :

Les contraintes (3) et (4) traduisent les limitations liées à la capacité des unités et des cuves de stockage.

$$W_{i,j,t} V_{i,j}^{min} \leq B_{i,j,t} \leq W_{i,j,t} V_{i,j}^{max} \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (3)$$

$$0 \leq S_{s,t} \leq C_s^{max} \quad \forall s, \forall t \quad (4)$$

3.2. La centrale de production d'énergie

3.2.1. Description de la centrale de cogénération

La centrale de cogénération considérée (voir figure 5) est inspirée de l'unité décrite dans Soylu et al. (2007). Cette centrale est constituée de deux cuves de stockage de carburant à capacité limitée, de deux chaudières qui produisent de la vapeur haute pression à partir de carburant, d'eau et d'électricité. La vapeur haute pression peut alors être fournie directement à l'unité

consommatrice ou bien servir à alimenter deux turbines dont le rôle est de produire de la vapeur moyenne et basse pression et convertir l'énergie mécanique ainsi libérée en électricité. Des simples vannes permettent aussi de détendre la vapeur haute pression (HP) en vapeur moyenne pression et la vapeur moyenne pression (MP) en vapeur basse pression (LP).

3.2.2. Modélisation

CUVES DE STOCKAGE DU CARBURANT :

* Bilan matière sur la cuve i

$$ORF_{t,i} = ORF_{t-1,i} + FP_{t,i} - \sum_j I_{t,j,i} \quad \forall t, \forall i \quad (5)$$

* Contrainte sur la quantité de carburant livrable à la cuve i

$$FP_{t,i} \leq cpt_i BFP_{t,i} \quad \forall t, \forall i \quad (6)$$

avec $BFP_{t,i} = 1$ si une commande est lancée, 0 sinon

* Contrainte de capacité de la cuve i

$$ORF_{t,i} \leq cpt_i \quad \forall t, \forall i \quad (7)$$

* Stock de sécurité de la cuve i

$$ORF_{t,i} \geq sss_i \quad \forall t, \forall i \quad (8)$$

CHAUDIÈRES :

On suppose que la chaudière j est alimentée par de l'air et de l'eau (sans limite). Le carburant issu des cuves de stockage i est utilisé pour chauffer l'eau et générer de la vapeur haute pression. Il en résulte des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de sulfures. La chaudière j est alimentée par de l'électricité et par de la vapeur MP pour chauffer l'eau entrante. La quantité de vapeur HP sortant de la chaudière j est proportionnelle à la quantité de carburant entrant. Les équations

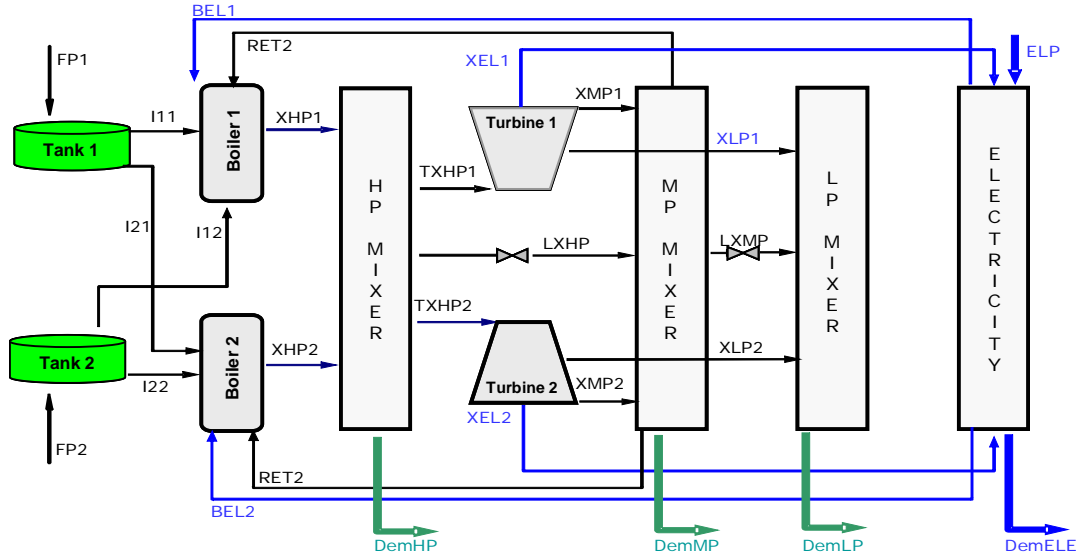


Figure 5 : Représentation schématique de la centrale de cogénération

tions descriptives du fonctionnement des chaudières sont données par :

* Production de vapeur HP par la chaudière j

$$XHP_{t,j} = \sum_i I_{t,j,i} \cdot \eta_{j,i} \cdot cc_i \quad \forall t, \forall j \quad (9)$$

* Emission de sulfures par la chaudière j

$$XSOX_{t,j} = \sum_i Sox_i \cdot I_{t,j,i} \quad \forall t, \forall j \quad (10)$$

* Emission de GES par la chaudière j

$$XGES_{t,j} = \sum_i ges_i \cdot I_{t,j,i} \quad \forall t, \forall j \quad (11)$$

* Quantité de vapeur MP nécessaire à la chaudière j

$$RET_{t,j} = a_j \cdot XHP_{t,j} \quad \forall t, \forall j \quad (12)$$

* Quantité d'électricité nécessaire à la chaudière j

$$BEL_{t,j} = b_j \cdot XHP_{t,j} \quad \forall t, \forall j \quad (13)$$

* Contraintes de fonctionnement

On suppose que sur une période t , le bouilleur j est alimenté par un seul type de carburant i .

$$AI_{t,j} + A2_{t,j} \leq I \quad (14)$$

$$I_{t,i} \leq M \cdot AI_{t,j} \quad (14a) \quad \text{et} \quad I_{t,c,2} \leq M \cdot A2_{t,j} \quad (14b)$$

TURBINES :

* Bilan matière de la turbine j

$$TXHP_{t,j} = XMP_{t,j} + XLP_{t,j} \quad \forall t, \forall j \quad (15)$$

* Production d'électricité de la turbine j

$$XEL_{t,j} = TXHP_{t,j} \cdot tel_j - XMP_{t,j} \cdot tmp_j - XLP_{t,j} \cdot tlp_j \quad (16)$$

MELANGEURS :

Les mélangeurs représentés sur la figure 5 ne modélisent pas des équipements réels de la centrale mais permettent de rendre compte de la multiplicité de moyen de production des différents vecteurs énergétiques et de l'impossibilité de stocker ces vecteurs.

$$\sum_j XHP_{t,j} = LXHP_t + \sum_j TXHP_{t,j} + DemHP_t \quad (17)$$

$$\sum_j XMP_{t,j} + LXHP_t = LXMP_t$$

$$+ DemMP_t + \sum_j RET_{t,j} \quad (18)$$

$$\sum_j XLP_{t,j} + LXMP_t = DemLP_t \quad (19)$$

$$ELP_t + \sum_j XEL_{t,j} = LXMP_t + DemEL_t + \sum_j BEL_{t,j} \quad (20)$$

ESTIMATION DU COUT :

Le coût de fonctionnement de l'unité de cogénération est composé des coûts :

- du carburant i utilisé dans les chaudières j ,

$$COF_{t,j} = \sum_i cf_i \cdot I_{t,j,i} \quad \forall t, \forall j \quad (21)$$

- d'électricité achetée à un fournisseur extérieur

$$CEL_t = ELP_t \cdot C_{elec} \quad \forall t \quad (22)$$

- de stockage du carburant i et de coûts fixes imputés à chaque livraison de carburant,

$$CSt_{t,i} = ORF_{t,i} \cdot C_{hold} + BFP_{t,i} \cdot C_{liv} \quad \forall t, \forall i \quad (23)$$

Par ailleurs, les émissions de GES et de sulfure sont pénalisées moyennant l'introduction d'un terme de coût supplémentaire :

$$CSOX_t = \sum_j XSOX_{t,j} \cdot c_{SOX} \quad \forall t \quad (24)$$

$$CGES_t = \sum_j XGES_{t,j} \cdot c_{GES} \quad \forall t \quad (25)$$

Le coût global du fonctionnement de la centrale (critère à minimiser) est donc donné par :

$$C_{glob} = \sum_t (CSOX_t + CGES_t + CEL_t) + \sum_t \sum_i CSt_{t,i} + \sum_t \sum_j COF_{t,j} \quad (Crit1)$$

3.3. Couplage des deux entités du système

Afin de lier l'atelier de production (unité consommatrice d'énergie) à la centrale de cogénération (unité productrice d'énergie), on suppose que chaque tâche de l'atelier consomme un ou plusieurs types de vecteur énergétique. Les consommations considérées dans

l'exemple présenté dans cet article sont récapitulées dans le tableau 1. Les consommations vapeur sont données en kg/hr.kg et les consommations en électricité sont données en kW/hr.kg

	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5
LP	0	0	2	0	0
MP	0	0	0	1	2
HP	8	0	0	0	0
ELE	0	2	0	1	0

Tableau 1 : Consommation énergétique de l'atelier

La consommation en vecteur v à la période t peut ainsi être déduite des équations ci-dessous. La variable $TBatch_{i,t}$ représente la taille des lots traités par chaque tâche à la période t et $Cop_{v,k}$ représente la consommation de l'opération k en vecteur v (donnée par le tableau 1).

$$TBatch_{i,t} = \sum_{j \in J_i} \sum_{\theta=t}^{t-p_{i+1}} B_{i,j,\theta} \quad (26)$$

$$CGlob_{v,t} = \sum_{k=1}^5 Cop_{v,k} \cdot TBatch_{k,t} \quad (27)$$

3.4. La démarche envisagée pour l'étude

Deux approches sont comparées : une approche dite séquentielle et une approche dite intégrée.

3.4.1. Approche séquentielle

L'approche séquentielle est illustrée sur la figure 6.

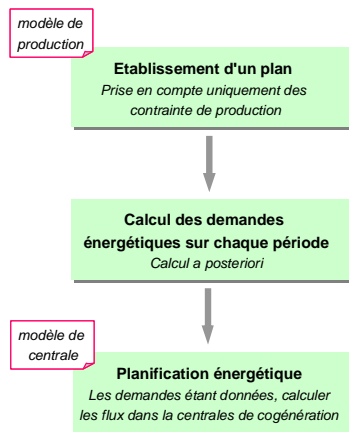


Figure 6 : Approche séquentielle

Cette approche consiste à réaliser en séquence les tâches suivantes :

a) établir le plan de fabrication en prenant en compte uniquement les contraintes de production (équations (1) à (4)). Dans le cas de cet exemple, le critère minimisé correspond au volume global des stocks.

$$C_{stock} = \sum_s h_s \cdot S_{s,t} \quad (Crit2)$$

b) La consommation énergétique engendrée par ce plan est ensuite estimée à l'aide des équations (26) et (27).

c) Enfin, connaissant ces demandes énergétiques, la planification de la centrale de cogénération est effectuée (équations (5) à (31)) en introduisant les relations suivantes pour chacun des vecteurs énergétiques (1 à 4) :

$$DemLP_t = CGlob_{1,t} \quad (28)$$

$$DemMP_t = CGlob_{2,t} \quad (29)$$

$$DemHP_t = CGlob_{3,t} \quad (30)$$

$$DemEL_t = CGlob_{4,t} \quad (31)$$

3.4.2. Approche intégrée

L'autre approche étudiée est une approche intégrée résumée sur la figure 7.

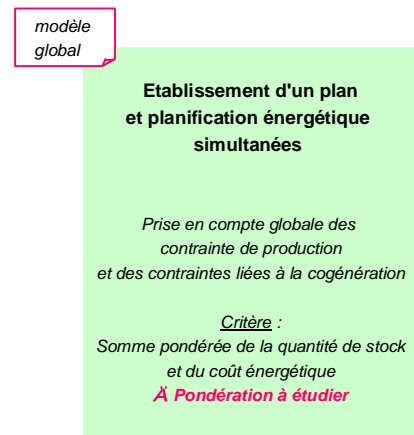


Figure 7 : Approche intégrée

Dans cette approche, un plan de fabrication intégrant les contraintes de fabrication est établi. Pour cela, le modèle global comportant l'ensemble des équations (1) à (31) est résolu. Le critère d'optimisation pris en compte dans ce cas est une somme pondérée du volume de stock global (équation Crit2) et du coût de fonctionnement de la centrale (équation Crit1).

$$CTot = \lambda \cdot C_{glob} + C_{stock} \quad (Crit3)$$

4. RESULTATS OBTENUS

L'ordonnancement de l'atelier de production est réalisé sur un horizon de 14 heures, découpé en 14 périodes de 1 heure. La demande en produit P1 et produit P2 est fixée en fin d'horizon respectivement à 136 kg et 147,4 kg et les cuves de produits intermédiaires sont supposées vides en début d'horizon.

Les données relatives au fonctionnement de la centrale de cogénération sont récapitulées dans le tableau 2.

$\eta_{1,1}$	1,69	a_1	0,11
$\eta_{1,2}$	1,74	a_2	0,12
$\eta_{2,1}$	1,67	$\eta_{2,1}$	1,68
cc_1	10,5	b_1	0,002
cc_2	9,65	b_2	0,003
sox_1	7,8	ges_1	17
sox_2	1,42	ges_2	5
cf_1	200	tel_1	0,15
cf_2	76	tel_2	0,175
tmp_1	0,07	tlp_1	0,009
tmp_2	0,08	tlp_2	0,01

Tableau 2 : Données relatives à la centrale de cogénération

Le tableau 3 donne une comparaison des résultats obtenus en terme de coût énergétique et de quantité totale en stock dans le cas de l'approche séquentielle et dans le cas de l'approche intégrée.

	Approche séquentielle	Approche intégrée
Coût énergétique (\$)	35082	31783
Stocks (kg)	1460	4000

Tableau 3 : Comparaison des résultats obtenus dans les cas des approches séquentielle et intégrée

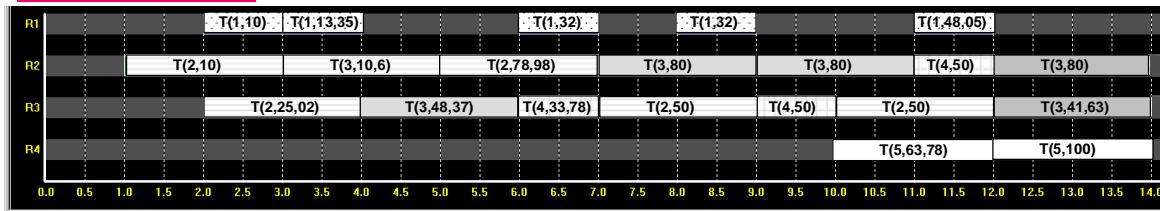
L'analyse de ce tableau permet de mettre en évidence l'intérêt de prendre en considération la planification de la centrale de cogénération dès la phase d'ordonnancement de la production. En effet, l'approche intégrée fait état d'une réduction du coût énergétique de près de 10%.

La figure 8, qui représente sous la forme d'un diagramme de Gantt les plans de fabrication obtenus respectivement par l'approche séquentielle et l'approche intégrée, fait clairement état d'un ordonnancement de tâche très différent selon que l'on prenne en compte les seules contraintes de production ou que l'on intègre des critères économiques liés au fonctionnement de la centrale de cogénération. On observe, dans le cas de l'approche intégrée, un ordonnancement visant à synchroniser les tâches qui consomment des utilités générées simultanément par la centrale de cogénération. Ainsi, il apparaît judicieux de consommer sur la même période l'électricité issue de la turbine et la vapeur basse et moyenne pression. On optimise ainsi l'utilisation de l'énergie issue de la vapeur haute pression, ce qui revient à limiter l'usage des vannes de détente ainsi que l'apport externe d'électricité.

5. CONCLUSION – PERSPECTIVES

La question énergétique va devenir un problème crucial dans les décennies à venir. Soumises à des coûts plus élevés et à des législations environnementales plus contraignantes, les entreprises doivent donc rationaliser leur consommation. Dans l'industrie de process, un axe d'amélioration provient de la gestion des utilités. La mise en place de centrale de cogénération de ces utilités est un premier pas dans cette direction. Néanmoins, il apparaît que le gain pourrait être encore plus important en couplant la planification de la production des utilités avec la gestion de l'unité consommatrice. C'est dans ce contexte qu'est développé le modèle intégré proposé dans cette communication. Les premiers résultats obtenus sont prometteurs et montrent les potentialités de l'approche.

Approche séquentielle



Approche intégrée

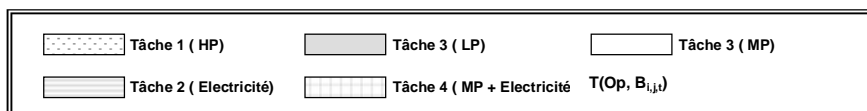
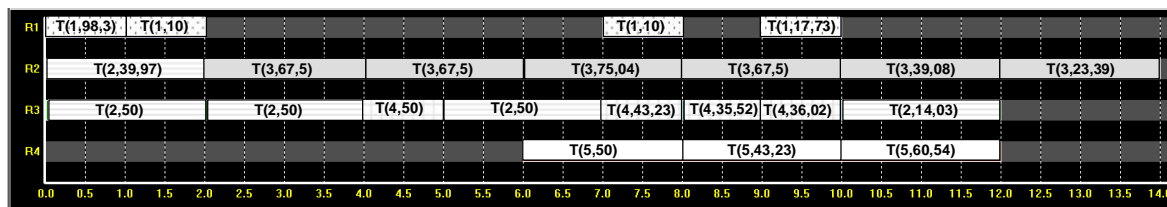


Figure 8 : Plans de fabrications obtenus par l'approche séquentielle et par l'approche intégrée

NOMENCLATURE

a_j	Coefficient permettant de calculer la quantité de vapeur MP nécessaire pour la génération de vapeur HP à la chaudière j (-)
b_j	Coefficient permettant de calculer la quantité d'électricité nécessaire pour la génération de vapeur HP à la chaudière j (W)
cf_i	Coût du carburant (\$/kg)
$B_{i,t}$	Quantité de matière traitée par la tâche i dans l'unité j au début de la période t (kg)
$BEL_{i,j}$	Quantité d'électricité apportée au bouilleur (W)
cc_i	Capacité calorifique du carburant i (kJ/kg)
C_s^{max}	Capacité de stockage maximale pour l'état s (kg)
cpt_i	Capacité du bac de stockage i (kg)
CEL_i	Coût induit par la consommation d'électricité (\$)
c_{GES}	Coefficient permettant de calculer le coût induit par l'émission de gaz à effet de serre par la chaudière (kg sox / kg vapeur HP)
$CGES_i$	Coût induit par les émissions de gaz à effet de serre (\$)
$CGlob$	Consommation totale de l'atelier en vecteur v sur la période t (kW ou kg/hr)
$COF_{i,j}$	Coût induit par la consommation de carburant par la chaudière j à la période t (\$)
$Cop_{v,k}$	Consommation de l'opération k en vecteur v (kW ou kg)
C_{sox}	Coefficient permettant de calculer le coût induit par l'émission de sulfure par la chaudière (kg sox / kg vapeur HP)
$CSOX_i$	Coût induit par les émissions de gaz à effet de serre (\$)
$CS_{i,j}$	Coût de stockage
$DemE_L$	Demande en Electricité (kW)
$DemL_P$	Demande en vapeur LP (kg/hr)
$DemM_P$	Demande en vapeur MP (kg/hr)
$DemH_P$	Demande en vapeur HP (kg/hr)

ELP_t	Quantité d'électricité achetée sur la période t (W)
ges_i	Coefficient permettant de calculer la quantité de gaz à effet de serre émis par la chaudière i (kg sox / kg vapeur HP)
$I_{i,j}$	Quantité de carburant alimentant la chaudière j issu du bac i (kg)
$FP_{i,t}$	Quantité de carburant acheté pour alimenter le bac i à la période t (kg)
$ORF_{i,t}$	Quantité de carburant disponible dans le bac de stockage j à la période t (kg)
P_i	Durée de la tâche i (hr)
$RET_{i,j}$	Quantité de vapeur MP apportée à la chaudière j pour préchauffer l'eau à la période t (kg)
$TBatch_{i,t}$	Taille des lots traités par la tâche i à la période t (kg)
$TXHP_{i,j}$	Quantité de vapeur HP alimentant la turbine (kg/hr)
tel_j	Coefficient permettant de calculer la quantité d'électricité générée par la turbine j (kW/kg)
tlp_j	Coefficient permettant de calculer la quantité de vapeur BP générée par la turbine j (kW/kg)
tmp_j	Coefficient permettant de calculer quantité de vapeur MP générée par la turbine j (kW/kg)
$S_{s,t}$	Quantité de stock à l'état s au début de la période t (kg)
Ssf	Stock de sécurité (kg)
Sox_i	Coefficient permettant de calculer la quantité de sulfure émis par la chaudière i (kg sox / kg vapeur HP)
$XEL_{i,j}$	Quantité d'électricité produite par la turbine j à la période t (kW)
$XGES_{i,j}$	Quantité de gaz à effet de serre généré par la chaudière j à la période t (kg/hr)
$XSOX_{i,j}$	Quantité de sulfure généré par la chaudière j à la période t (kg/hr)
$XHP_{i,j}$	Quantité de vapeur HP produite par la chaudière j à la période t (kg/hr)
$XMP_{i,j}$	Quantité de vapeur MP produite par la turbine j à la période t (kg/hr)
$XLP_{i,j}$	Quantité de vapeur LP produite par la turbine j à la période t (kg/hr)
$W_{i,t}$	Variable binaire de décision indiquant si l'unité j est allouée à la tâche i au début de la période t
ρ_{is}^{prod}	Proportion de produit issu de l'état s entrant dans la tâche i
ρ_{is}^{prod}	Proportion de produit entrant dans l'état s issu de la tâche i
$\eta_{i,j}$	Efficacité du bouilleur pour un carburant i donnée (kg de vapeur / kJ disponible)

Cependant, une réflexion est menée actuellement afin de définir des critères de performances ou des indicateurs permettant de mieux évaluer le gain résultant (notamment, pas uniquement le gain économique mais aussi l'impact environnemental) et surtout permettant de mettre en évidence les leviers d'action disponibles pour améliorer encore le système.

L'étape suivante serait de prendre aussi en compte l'énergie générée par les opérations de production elles-mêmes, en se rapprochant ainsi du concept d'intégration énergétique évoquée dans la section 1.3. En effet, dans les unités où plusieurs opérations se déroulent en parallèle (telles que celles étudiées ici), il pourrait être intéressant de les synchroniser afin qu'un échange énergétique puisse être assuré. Par exemple, un appareil qui dissipe de la chaleur pourrait alimenter un appareil en nécessitant et réduire ainsi encore les apports externes.

Un autre axe actuellement en cours est d'affiner les modèles aussi bien de la centrale de cogénération que de l'unité de production batch afin de s'obtenir une représentation plus fidèle du fonctionnement. Parmi les éléments à prendre en compte, on peut citer les temps et coûts d'arrêt/démarrage des chaudières et des turbines, la revente possible de l'électricité excédentaire, etc. De plus, une modélisation en temps continu devrait permettre d'intégrer plus facilement de nouvel-

les contraintes telles que les nettoyages (opérations aussi consommatrices d'utilités), des durées dépendant de la taille du batch (ce qui induira un fonctionnement encore plus évolutif de la centrale de cogénération) ou encore, l'utilisation de différentes utilités durant les phases successives d'une même opération (par exemple, une réaction nécessite souvent au départ un préchauffage puis en fin, un refroidissement). Évidemment, ceci conduira inévitablement à une complexification du modèle et donc, probablement à des problèmes de résolution. En effet, si l'exploitation de solveurs basés sur des méthodes exactes est suffisante actuellement, la mise en œuvre de méthodes stochastiques d'optimisation devra être envisagée. L'outil de simulation dynamique couplée à des modules d'optimisation pourrait aussi être une autre solution pour aborder cette complexité.

REFERENCES

Adonyi R., Romero J., Puigjaner L., Friedler F., 2003, Incorporating heat integration in batch process scheduling, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 1743-1762

Behdani B., Pishvaie M.R., Rashtchian D., 2007, Optimal scheduling of mixed batch and continuous proc-

esses incorporating utility aspects, *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 46, pp. 271-281

Caddet (Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technology), 1999, Industrial Symbiosis – waste for one company is added value for another. *Caddet energy Efficiency I.E.A./ OECD, Brochure N°R363*.

Corominas J., Espuna A., Puigjaner L., 1994, Method to incorporate energy integration considerations in multiproduct batch processes, *Comput. Chem. Engng*, Vol. 18, pp. 1043-1055

Durana Moita R., Matos H.A., Fernandes C., Pedro Nunes C., Prior J.M., 2005, Dynamic Modelling and simulation of a cogeneration system integrated with a salt recrystallization process, *Comput. Chem. Engng*, Vol. 29, pp. 1491-1505.

Gibbs D., Deutz P., 2007, Reflexion on implementing industrial ecology through eco-industrial park development, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, N°17, pp. 1683-1695.

Hait A., Artigues C., Trepanier M., Baptiste P., 2007, Ordonnement sous contraintes d'énergie et de ressources humaines, *Récents progrès en Genie des Procédés*, N°96

Kondili E., Shah N., Pantelides C.C., 1992, Production planning for the rational use of energy in multiproduct continuous plant, *ESCAPE 2*

Kondili E., Pantelides C., Sargent R.W., 1993, *A general algorithm for short-term scheduling of batch operation – I. MILP Formulation*, *Comput. Chem Engng.*, Vol.17, N°2, pp. 211-217

Linnhoff B., 1994, Use of pinch analysis to knock down capital cost and emission, *Chemical Engineering Progress*, vol.90 n°8, p 32-57.

Soylu A., Oruc C., Turkay M., Fujita K., Asakura T., 2006, Synergy analysis of collaborative supply chain management in energy systems using multi-period MILP, *European Journal of Operational Research*, Vol. 174, pp. 387-403.

Zhang B.J., Hua B., 2007, Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 15, pp.439-448.