

Ordonnancement à court terme d'un atelier discontinu de chimie fine

Partie I: Développement du modèle

Philippe BAUDET, Catherine AZZARO PANTEL, Serge DOMENECH et Luc PIBOULEAU*

Laboratoire de Génie Chimique - UMR CNRS 5503

ENSIGC INPT

18, Chemin de la Loge

31078 TOULOUSE Cedex - France

Tél.: 335 62 25 23 00 - FAX : 335 62 25 39 03

email : Luc.Pibouleau@ensigct.fr

Résumé. - Cette étude a pour but d'utiliser certains concepts de productique pour résoudre des problèmes d'ordonnancement en génie des procédés. Nous étudions le cas de l'atelier discontinu multitâches-multiproduits ou jobshop de chimie fine, qui présente des contraintes très complexes: diversité des produits et de leurs procédés d'élaboration, intermédiaires réactionnels, politiques de stockage particulières, vérification de bilans matières, consommations d'utilités, limitation du taux de rejet de produits polluants... Cet article est composé de deux parties. Dans la partie 1, nous développons un modèle de simulation détaillé du fonctionnement d'un atelier discontinu de chimie fine. La mise en oeuvre du modèle et l'exploitation des résultats seront présentées dans la seconde partie.

Mots clés: simulation à événements discrets, atelier discontinu, chimie fine, ordonnancement

Abstract. - The objective of this paper is to use production engineering concepts to solve scheduling problems encountered in chemical engineering. The studied case is the multipurpose-multiobjective (or job-shop) chemical batch plant involving the most complex specific constraints which can be found practically: various products to be manufactured, different synthesis sequences, presence of intermediate products, various storage policies, mass balances, utilities, effluent limitation, ... This paper is composed of two parts. The first part is devoted to the development of a discrete-event simulation model of a fine chemistry plant. Use of the model and simulation results will be greatly analyzed in the second part.

Keywords: discrete-event simulation - batch processes - fine chemistry - scheduling

* Toute correspondance devra être adressée à cet auteur

INTRODUCTION

Dans le domaine de la productique, un grand nombre d'études a été mené sur la modélisation et la simulation des systèmes de nature discrète. Plus particulièrement, cette approche a été largement utilisée dans des secteurs différents comme la mécanique, l'informatique, le transport ou le traitement des surfaces... Au premier abord, le problème d'ordonnancement peut se formuler de façon identique, quel que soit le domaine d'application: ordonnancer un ensemble de tâches consiste (Gotha, 1993) à programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début. Mais si l'on peut aborder cette problématique avec une méthodologie générale, il faut développer des algorithmes particuliers adaptés au domaine d'application, ce qui nécessite une expertise préalable du contexte, comme le prouvent les nombreux travaux de recherche effectués depuis plusieurs années, comme ceux de Bel et Dubois (1985), Gotha (1993) ou Caux et al. (1995).

L'objectif que nous nous sommes fixé dans cette étude est d'utiliser certains concepts de productique pour résoudre des problèmes d'ordonnancement rencontrés en génie des procédés. Nous nous sommes intéressés au cas de l'atelier discontinu multitâches-multiproduits ou jobshop de chimie fine, qui présente les contraintes spécifiques les plus complexes: diversité des produits et de leurs procédés d'élaboration, présence d'intermédiaires réactionnels, politiques de stockage particulières, vérification de bilans matières, consommations d'utilités, limitation du taux de rejet de produits polluants...

En raison de l'importance grandissante des procédés discontinus en génie chimique, il est clair que la résolution de problèmes d'ordonnancement devient un thème de recherche stratégique (Reklaitis, 1991, Rippin, 1993). Les spécialistes de génie des procédés les abordent le plus

souvent par des méthodes d'optimisation utilisant la programmation en variables mixtes, linéaire ou non (Grossman et Sargent (1979), Rippin (1983), Egli et Rippin (1986), Espuña et Pugjaner (1989), Rajagolapan et Karimi (1989), Birewar et Grossman (1990), Yamalidou et al. (1990), Wellons et Reklaitis (1991)). L'analyse de la bibliographie montre que de telles procédures s'avèrent difficiles à mettre en œuvre pour atteindre un niveau de description assez fin et pour des problèmes de taille réelle au caractère combinatoire très marqué (Mauderli et Rippin, (1979), Musier et Evans (1980)). C'est pourquoi nous avons choisi dans ce travail de développer un modèle de simulation par événements discrets du fonctionnement d'un atelier discontinu de chimie fine. Cette méthodologie a déjà été suivie pour simuler le comportement d'un atelier de fabrication de composants électroniques (Peyrol et al. 1991a-b-c).

Cet article est composé de deux parties.

Dans la première, nous présentons tout d'abord le bilan de l'expertise du domaine chimique et ses contraintes spécifiques qui nous ont amené à développer cette approche (Baudet (1995a-b), Baudet (1996a)).

Conformément aux concepts classiques des systèmes à événements discrets, la première partie de la modélisation consiste à inventorier l'ensemble des objets du système productif, puis à décrire avec le degré de finesse souhaité leurs caractéristiques physiques fixes ou variables, i.e., les attributs, ainsi que leurs diverses possibilités d'évolution dynamique. Les objets les plus simples à définir sont caractérisés par quelques attributs alors que les objets les plus complexes (pouvant prendre différents états logiques avec certaines transitions possibles entre ces états) sont modélisés par une machine à états, à laquelle on affecte les attributs fixes ou variables nécessaires.

Dans la phase suivante, nous présentons les relations existant entre les objets du modèle, et notamment les recettes de production qui mobilisent et relient les différents types d'objets. Après la définition des composantes du modèle, nous décrivons l'ensemble des états possibles (i.e., l'ensemble de tous les attributs variables) du système et son état instantané (i.e., l'ensemble des états de tous les objets à un instant donné) (Bel et Dubois, 1985).

L'évolution dynamique du système global d'un état à un autre, caractérisée par la définition d'une logique de changement d'états et par celle de règles de décision (ou heuristiques) utilisées sur le site productif, est ensuite précisément décrite.

L'ensemble de ces éléments permet l'élaboration complète d'un modèle de simulation à événements discrets, avec une approche par événements. La seconde partie de l'article sera axée sur la mise en œuvre et l'utilisation de ce logiciel.

Les contraintes spécifiques au domaine chimique

Rappelons que dans un atelier discontinu de chimie fine de type jobshop, sont généralement élaborés en petites quantités (production par lot ou de type « batch » selon le terme anglo-saxon consacré) des produits divers, souvent à très haute valeur ajoutée, selon des procédures de synthèse complexes qui nécessitent un contrôle strict des conditions opératoires.

Les contraintes spécifiques au domaine chimique sont liées essentiellement à la manipulation des intermédiaires réactionnels. Qu'ils soient liquides, ou gazeux, ils peuvent générer des contraintes de deux types, contraintes spatiales de stockage, d'une part, et contraintes temporelles, d'autre part.

- S'il est stable, l'intermédiaire réactionnel doit pouvoir être stocké entre deux opérations successives de sa recette et doit alors disposer de la capacité de stockage requise (exprimée en volume ou en masse). Des intermédiaires réactionnels de nature particulière, corrosive par exemple, peuvent nécessiter certains types de stockage (acier inox, verre, polypropylène...). De plus, le stockage successif de deux intermédiaires dans un même bac nécessite un nettoyage préalable de la ressource (ceci est aussi valable pour l'équipement entre deux traitements d'opérations successifs).
- S'il est instable, l'intermédiaire réactionnel doit être traité à une date déterminée. S'il est stable pendant une durée limitée, il doit être traité à une date au plus tard.

Globalement, nous traitons toutes les politiques de stockage envisageables pour les intermédiaires réactionnels. D'un point de vue temporel, la stabilité de l'intermédiaire peut couvrir le domaine de zéro à l'infini. D'un point de vue spatial, les contraintes de place peuvent être nulles (définition de bacs de stockage de capacité illimitée) ou très importantes (capacité des bacs de stockage limitée, spécifications de type éventuelles). On couvre ainsi l'ensemble des politiques rencontrées la plupart du temps séparément dans les études de la littérature, traitant d'une capacité de stockage illimitée (US, 'unlimited storage'), limitée (FIS, 'finite intermediate storage'), ou nulle (ZW, 'zero wait policy') (Mauderli et Rippin (1979), Musier et Evans (1980), Karimi et Reklaitis (1985), Ku et Karimi (1988), Rajagolapan et Karimi (1989), Ku et Karimi (1990), Ku et Karimi (1991)).

Les difficultés engendrées par cette spécificité du domaine chimique se décomposent en deux niveaux:

- Au premier niveau, le degré de détail dans la description des objets du modèle et en particulier des bacs de stockage doit être important (capacité, type, zone d'appartenance...)

et certaines opérations supplémentaires doivent impérativement être considérées, comme leur nettoyage ou celui des équipements.

- Par contre, au second niveau concernant les contraintes temporelles, il faut effectuer des réservations de ressources pour assurer le traitement des opérations consommant les intermédiaires réactionnels non stables aux dates spécifiées. Ces éléments compliquent considérablement la logique de changement d'état du modèle et les conditions de disponibilité de l'ensemble des ressources du système.

Définition des objets du modèle

Les ressources consommables

Les matières premières (MP)

Les matières premières, dont on définit le nombre en fonction des réactifs utilisés sur le site, sont stockées en entrée d'atelier, dans des bacs de stockage de capacité supposée illimitée. Elles sont consommées en quantité connue dans les opérations dans lesquelles elles entrent comme réactifs mais peuvent également être restituées par des opérations de recyclage. Chaque matière première est alors caractérisée à chaque instant par trois attributs variables, un volume disponible et deux calendriers, l'un "d'approvisionnement", l'autre "de réservation". Le calendrier de réservation prévoit les consommations de matières premières à venir (date, quantité) et dépend donc de l'évolution dynamique du modèle. Une partie du calendrier d'approvisionnement est fixée dès l'entrée des données, concernant les approvisionnements externes (date, quantité de matière première reçue à chaque approvisionnement) mais la partie concernant les approvisionnements internes (matières premières recyclées) dépend de l'évolution dynamique du modèle. Le volume

disponible de la matière première est ainsi actualisé de date d'approvisionnement en date de réservation. Sur la figure 1, nous présentons à une date donnée l'état instantané de la matière première, à laquelle sont affectés trois approvisionnements différents et quatre réservations. Les quantités en jeu sont caractérisées par la hauteur des segments de la figure.

Les produits intermédiaires partagés (PIP)

Nous avons défini des produits intermédiaires partagés, produits sur le site pour être consommés (ou "partagés") dans plusieurs recettes de production dans lesquelles ils entrent comme réactifs. Ils possèdent les caractéristiques d'une matière première, soit un stockage en entrée d'atelier, de capacité supposée illimitée et trois attributs variables de description, le volume disponible, le carnet des approvisionnements (externes et internes) et le carnet des réservations. Ces produits intermédiaires partagés peuvent également être élaborés pendant la campagne de production. Ces apports complémentaires des approvisionnements externes sont considérés dans le calendrier des approvisionnements dès que la date d'arrivée en stock est connue (c'est-à-dire au plus tôt pendant le traitement de la dernière opération de la recette). On présente à titre d'illustration, une chaîne de réactions chimiques représentative de la production, puis de la consommation d'un produit intermédiaire partagé, pour l'élaboration de deux produits finaux différents (PF1 et PF2). Les autres produits symbolisés dans les réactions sont des matières premières.



Le PIP est ici élaboré selon la réaction 1, puis intervient comme réactif dans une réaction d'élaboration de deux produits finaux, le PF1 et le PF2 (réactions 2 et 3).

Les ressources à seuil de disponibilité

Les ressources à seuil de disponibilité sont soit des utilités chaudes pour le préchauffage de réacteurs ou la chauffe de bouilleurs, soit des utilités froides pour le refroidissement de certains appareillages. Que l'utilité soit de l'huile, de la vapeur ou tout autre fluide caloporteur (voire même l'électricité), elle est partagée par tous les équipements de l'atelier mais est caractérisée par un seuil de disponibilité, c'est-à-dire un seuil de consommation maximum qui ne pourra être dépassé. Ce seuil génère des contraintes d'utilisation simultanée des équipements. Chaque utilité modélisée est dans la réalité consommée pendant le traitement de l'opération dans laquelle elle intervient, mais du point de vue de la modélisation, la quantité utilisée pendant l'opération redevient utilisable à la fin du traitement, comme une ressource renouvelable, utilisée par blocs (un bloc représente une quantité d'utilité consommée entre une date de début et une date de fin de traitement sur un équipement) sous la contrainte que la quantité totale utilisée simultanément n'excède pas le seuil défini en entrée des données. Un attribut fixe caractérise ce seuil, un attribut variable représente la quantité instantanément disponible de l'utilité (ainsi que les dates et quantités restituées pour les blocs utilisés) et un carnet spécifique représente les réservations de blocs affectées à l'utilité. Sur la figure 2, nous avons schématisé un exemple d'état instantané pour une utilité.

Les ressources renouvelables

Les ressources renouvelables sont les objets les plus complexes de l'atelier, susceptibles de s'engager dans des activités diverses selon le déroulement du modèle. Nous avons défini les différentes activités possibles, les transitions entre ces activités et l'ensemble des attributs fixes ou variables associé, par une "machine à états", qui représente globalement l'ensemble des caractéristiques physiques de l'objet mais aussi ses possibilités d'évolution dynamique. Un objet ne peut être engagé que dans une seule activité en même temps et il pourra évoluer seulement par franchissement de transitions autorisées. Nous distinguons deux transitions entre activités:

- 1- les transitions conditionnelles sont soumises à des conditions d'occurrence, pouvant éventuellement mettre en jeu d'autres objets du modèle;
- 2- les transitions prédéterminées sont franchies sans condition, à une date connue.

Notons que les réservations peuvent générer le passage de certaines transitions d'un état à un autre pour l'exécution aux dates spécifiées des tâches réservées et que certaines transitions, a priori conditionnelles, peuvent devenir prédéterminées si certaines ressources sont supposées en quantité illimitée (par exemple les opérateurs).

Les machines à états «équipements»

La machine à états développée pour la représentation des équipements comprend sept états différents, caractérisant l'ensemble des activités considérées pour cet objet. Dix transitions (dont six conditionnelles) sont autorisées entre les états, représentant les possibilités d'évolution dynamique d'un état au suivant. La figure 3 représente la modélisation d'une machine à état "équipement". D'autres attributs variables supplémentaires sont néanmoins associés à certains états de la machine pour définir complètement l'activité en cours. Nous les présentons dans le tableau 1, ainsi que les activités et transitions de la machine développée.

Attributs fixes supplémentaires:

L'atelier étant divisé en zones, il faut définir en premier lieu la zone d'appartenance de l'équipement. Le traitement des opérations nécessite la définition de la capacité des équipements (pour déterminer si une opération est envisageable en une seule passe ou requiert plusieurs traitements sur l'équipement) mais aussi ses conditions opératoires limites, température et pression maximales admissibles. Nous avons également considéré les opérations de maintenance. Par conséquent, nous avons affecté à chaque équipement un carnet de maintenance où sont consignés les arrêts maintenance prévus (date, durée et nombre d'opérateurs requis pour chaque arrêt).

Autre attribut variable:

Comme toutes les ressources, l'équipement peut être réservé à une date fixée pour l'exécution d'une tâche spécifiée. Notons que l'équipement ne peut être affecté que d'une seule réservation à la fois car sa date de libération n'est pas connue a priori, au moment du chargement réservé.

Les machines à états «stockages pour intermédiaires réactionnels»

L'objet «stockage pour intermédiaires» modélise les bacs tampons destinés au stockage des intermédiaires réactionnels stables, entre deux opérations de leur recette de production. Ils sont affectés par zone et ne seront accessibles qu'à partir des équipements de leur zone d'appartenance. Eventuellement caractérisés par un type, les stockages peuvent en fonction de leur capacité, accueillir plusieurs intermédiaires réactionnels de même nature et doivent généralement être nettoyés entre deux stockages successifs. Comme les équipements, ces objets peuvent être soumis à la maintenance pendant la campagne de production et peuvent être réservés.

La machine à états représentative des stockages pour intermédiaires réactionnels comporte six états, caractéristiques des différentes activités de ces objets. Onze transitions ont été envisagées entre ces états, dont seulement deux sont prédéterminées par nature. La figure 4 et le tableau 2

représentent la machine à états «stockage pour intermédiaires», avec les transitions possibles et les variables supplémentaires associées aux états.

Attributs fixes de définition de l'objet «stockage»:

On peut dresser la liste de variables suivantes, nécessaires à la caractérisation de chaque stockage: zone d'appartenance, capacité, type et temps de nettoyage avec le nombre d'opérateurs impliqués.

Signalons que nous avons choisi de définir le temps de nettoyage des stockages indépendamment de leur contenu précédent. Ce n'est pas le cas pour les équipements, pour lesquels le temps de nettoyage et le nombre d'opérateurs requis dépend de l'opération précédemment traitée.

Attributs variables de l'objet «stockage»:

La maintenance sera caractérisée par un carnet spécifique où sont consignés pour chaque arrêt, la date, la durée et éventuellement le nombre d'opérateurs requis. Pour les réservations, un carnet contient l'identification des intermédiaires réactionnels à stocker, ainsi que la date de réservation et le volume correspondant. Notons que plusieurs intermédiaires réservés dans le même stock sont nécessairement de même nature (même recette, même stade d'élaboration). La figure 5 présente un exemple d'état instantané d'un objet stockage, occupé par trois intermédiaires et réservé par deux autres. Les intermédiaires stockés IR1, IR2 et IR3, ainsi que les intermédiaires qui réservent, IR4 et IR5 sont de même nature.

Les machines à états «opérateurs»

La littérature montre que les opérateurs sont rarement pris en compte dans la phase de modélisation d'un système productif, bien qu'ils constituent souvent des ressources limitées. La difficulté de modélisation engendrée par leur considération vient du fait que certaines transitions entre états des équipements et des stockages deviennent alors conditionnelles à la disponibilité des opérateurs requis, ce qui rend le déroulement de la simulation bien plus complexe. Nous

avons considéré de surcroît que les opérateurs peuvent être plus ou moins polyvalents, affectés à une ou plusieurs zones de l'atelier. Notons qu'un opérateur habilité dans une zone peut y effectuer n'importe quelle tâche, secondaire ou principale. Une activité dite principale concerne une intervention sur un équipement, contrairement à une intervention sur un bac de stockage, dite secondaire. Comme les équipements et les stockages pour intermédiaires, les opérateurs peuvent également être réservés.

Quatre états suffisent à la description des activités des opérateurs et six transitions possibles ont été inventoriées. Les transitions de début d'activité sont conditionnelles et les transitions de retour prédéterminées puisque l'opérateur s'engage toujours pour des durées préfixées. La figure 6 et le tableau 3 résument les activités, transitions et variables associées à la machine à états «opérateurs».

Attribut fixe de l'objet : Sa polyvalence, définie en entrée des données.

Attributs variables de l'objet :

Nous avons défini un état de congé de l'opérateur dans un calendrier spécifique, contenant la date et durée de chaque congé. Quant aux réservations des opérateurs, elles sont consignées dans un carnet, spécifiant la date et la durée de chaque réservation. Un opérateur peut être affecté de plusieurs réservations, nécessairement disjointes puisqu'il ne peut exercer qu'une seule activité à la fois. La figure 7 présente un exemple de carnet de réservation «opérateur».

La notion de niveau de rejet maximum toléré

Certaines opérations génèrent des produits secondaires ou sous-produits de réaction qui peuvent être toxiques ou polluants. Le niveau de rejet dans les eaux ou l'atmosphère est

sévèrement contrôlé et peut induire des contraintes sur la campagne de production. Dans le cas par exemple où plusieurs équipements fonctionnent instantanément en parallèle et génèrent des sous-produits en quantité totale limitée au regard d'un taux de rejet maximum admissible, aucune autre opération de ce type ne pourra démarrer, même si les équipements et autres ressources nécessaires sont disponibles.

La modélisation de cette contrainte de plus en plus fréquemment rencontrée in situ est analogue à celle des ressources à seuil de disponibilité (ou utilités), hormis le fait que l'une est consommée et l'autre rejetée. En effet, on peut modéliser un niveau de rejet d'opération par blocs (un bloc représente une quantité rejetée par l'opération entre la date de début et de fin d'opération), sous la contrainte que la quantité totale rejetée simultanément n'excède pas le seuil (ou taux) de rejet maximum autorisé. On caractérise alors une contrainte de rejet maximum par un attribut fixe représentant le seuil maximum toléré, un attribut variable caractérisant le niveau de rejet instantané de l'atelier et un carnet spécifique, descriptif des blocs relatifs aux éventuelles opérations réservées (quantité rejetée, dates de début et de fin de ce rejet).

Les produits et sous-produits de l'atelier

Les produits

Les produits élaborés sur le site sont principalement les produits finaux, mais aussi les produits intermédiaires partagés. Ils sont stockés dans des bacs spécifiques, de capacité supposée illimitée. Un produit final est caractérisé à chaque instant par son volume en stock et par un ensemble d'attributs fixes en majorité relationnels constitués par sa recette de production.

Les sous-produits

Les sous-produits de l'atelier représentent l'ensemble des produits restitués par certaines opérations. Nous avons pris en compte d'une part, les produits recyclés sur le site (notés PR) et d'autre part, ceux qui ne le sont pas (notés PNR). Qu'ils soient recyclés ou non, ils sont stockés hors-zone dans des stockages de capacité limitée, que nous appelons des "ressources de stockage".

- Les produits recyclés

Les produits recyclés partagent les ressources de l'atelier pour leur traitement. La capacité limitée des ressources de stockage engendre des contraintes de disponibilité et chaque opération générant des produits à recycler (ou recyclés) doit réserver la place nécessaire en stock. La modélisation d'une ressource de stockage comprend de ce fait un attribut fixe, la capacité du stockage, mais aussi trois attributs variables, à savoir le volume effectif en stock, le volume total 'en cours', le volume total réservé. Le volume 'en cours' représente le total des volumes du produit recyclé générés par les opérations en cours de traitement et le volume total réservé désigne la quantité du produit recyclé qui sera générée par les opérations réservées. L'état instantané d'une ressource de stockage est schématisé sur la figure 8.

- Les produits non recyclés sur le site

On admet pour les produits non recyclés qu'ils sont traités en utilisant des ressources indépendantes ou bien qu'ils sont traités sur un autre site. Ils sont stockés hors-zone dans des stockages de capacité limitée et les contraintes de disponibilité des ressources sont similaires à celles des stockages de produits recyclés. Les produits non recyclés peuvent être caractérisés par un attribut spécifique supplémentaire: le calendrier de départ hors-site. A des dates prédéterminées, consignées dans un calendrier approprié, ces stockages peuvent en effet subir des vidanges partielles ou totales.

Définition des relations entre objets: les recettes

Le terme recette désigne l'ensemble des procédés que doit subir un produit dans un état initial pour aboutir au produit final souhaité. Une recette est associée spécifiquement à un produit, qu'il soit recyclé ou non, et se compose d'un nombre d'opérations fixé a priori. On définira une recette pour chaque produit final, produit intermédiaire partagé et produit recyclé recensé dans l'atelier.

Volume de référence et conditions opératoires

Le volume de référence

Une recette est définie par rapport à un produit principal. Dans le cas d'une recette de production, le produit principal est le produit final ou le produit intermédiaire partagé généré par la dernière opération de la recette, alors que dans le cas des recettes de recyclage, le produit principal est le produit recyclé entrant dans la première opération de la recette.

Les volumes réactionnels

Les volumes réactionnels de chacune des opérations de la recette sont définis pour un volume de 100 litres, à produire ou à recycler. Par exemple, la dernière opération d'une recette de produit final générant 50 % de produit principal et 50 % de sous-produits est affectée d'un volume réactionnel égal à 200.

Les température et pression réactionnelles

Les opérations d'élaboration ou de recyclage de produits, peuvent nécessiter des conditions opératoires différentes d'une opération à l'autre. Nous nous sommes limités à la définition de deux paramètres, les température et pression réactionnelles.

Description d'une opération

Les équipements envisagés

Les équipements et les opérations sont liés par la relation 'utilisé pour'. On spécifie ainsi le(s) équipement(s) envisageable(s) pour le traitement de l'opération définie. Si plusieurs équipements sont spécifiés, ils sont "en parallèle". De l'équipement choisi peuvent dépendre la consommation en utilités et les différents temps opératoires. Pour chacun, on définit alors les conditions de traitement de l'opération qui comprennent :

- Les besoins en utilités;
- Le temps d'entrée des réactifs;
- Le temps de traitement de l'opération;
- Le temps de déchargement de l'équipement;
- Le temps de nettoyage de l'équipement .

Ces valeurs définies sont des constantes ou des fonctions des paramètres de l'opération (volume, température et/ou pression). La relation entre utilité, équipement et opération est également la relation 'utilisé pour'.

Les opérateurs requis

Il s'agit de la liaison entre opérateurs et opération (relation 'utilisé pour'). On affecte à chaque opération, un nombre d'opérateurs pour entrer les réactifs, sortir les produits et nettoyer l'équipement après l'opération.

Le type de l'opération

Chaque opération est définie par un type, définissant ses caractéristiques d'entrée/sortie et ses relations avec les ressources consommables, les ressources de stockage et les produits. Elle peut ainsi être mono-entrée ou multi-entrées et de la même façon, mono-sortie ou multi-sorties.

Les réactifs entrant

Quatre types de réactifs sont susceptibles d'entrer dans une opération, les matières premières, les produits intermédiaires partagés, les intermédiaires réactionnels et les produits recyclés. Les produits recyclés entrent uniquement dans la première opération de leur recette, en quantité spécifiée par le mode de recyclage choisi. Les réactifs, liés à l'opération par la relation 'consommé pour' sont identifiés et les volumes correspondants sont exprimés en pourcentage du volume réactionnel.

Les produits sortant

Les produits 'principaux'

Si l'opération n'est pas la dernière de la recette, le produit principal sortant de l'opération est l'intermédiaire réactionnel. Sinon, dans le cas d'une recette de production, le produit principal est le produit de référence (produit final ou produit intermédiaire partagé), alors que dans le cas d'une recette de recyclage, le produit principal (produit recyclé), n'est pas généré mais consommé.

Cas de l'intermédiaire réactionnel

L'intermédiaire sortant d'une opération peut être stable, pendant une durée illimitée ou limitée et même instable. En cas de stabilité limitée, un attribut fixe spécifie sa durée maximale de stockage avant dégradation. S'il est stable, il peut nécessiter des types de stockages de nature particulière, soit simplement préférés, voire même obligés. Dans ce cas, il faut identifier le type de stockage requis. Notons que la quantité d'un intermédiaire réactionnel produite par une

opération est intégralement consommée dans l'opération suivante de la recette, qui peut néanmoins être effectuée en plusieurs passes.

Les produits secondaires

Toute opération multi-sortie peut générer un produit secondaire, mais aussi une matière première, un produit final ou un produit intermédiaire partagé rendu de façon secondaire. Quels que soient les produits secondaires sortant, il faut les identifier et spécifier le volume correspondant, en pourcentage du volume réactionnel.

La figure 9 présente les différentes configurations possibles pour les opérations d'une recette de production ou de recyclage.

Enchaînement des opérations et règles de précedence

Les opérations sont liées entre elles par des relations de précedence, modélisées par l'affectation de chaque intermédiaire réactionnel sortant à une opération suivante de la recette. Plusieurs intermédiaires réactionnels peuvent ainsi être affectés à la même opération, ce qui induit des possibilités de recettes non linéaires. Notons également que des équipements identiques pouvant intervenir dans le traitement de la recette à différents stades d'élaboration, il est possible de modéliser des recettes cycliques de l'atelier.

Tests de cohérence sur les relations définies

La définition d'une recette et de l'ensemble de ses relations avec les autres objets du modèle est délicate, et l'on doit veiller à la cohérence des données entrées. Un ensemble de tests est effectué

pendant la définition des recettes, tant au niveau des ressources demandées que des produits et sous-produits générés. On vérifie également la cohérence entre les différents volumes déclarés lors de la définition et de l'enchaînement des opérations.

Modélisation des batches

Définition d'un batch et relations produits-recettes-batches

Un produit est lié unilatéralement à une recette à laquelle peut correspondre un certain nombre de batches à élaborer ou recycler pendant la campagne de production. Notons que dans le cas des recyclages, le nombre de batches à réaliser pendant la campagne est calculé par le modèle en fonction du volume total de chaque produit recyclé et du volume choisi pour les batches de recyclage. Pour un produit recyclé considéré, ce calcul tient compte d'un mode de recyclage choisi, qui peut être minimum ou maximum: dans le cas d'un mode de recyclage maximum, on traite le plus grand nombre possible de batches du produit recyclé; inversement, pour un mode de recyclage minimum, on ne traite que les quantités de produit qui ne peuvent être accueillies dans leur bac de stockage, de capacité limitée.

Les attributs d'un batch

Un batch est caractérisé par deux attributs fixes, l'un relationnel par sa recette de production ou de recyclage, le second descriptif du volume à élaborer ou à recycler. Ces attributs fixes ne

suffisent pas à décrire totalement le batch, dont on doit connaître à chaque instant l'état d'avancement.

La représentation logique de l'état d'avancement d'un batch

Nous avons modélisé l'état d'un batch par une représentation logique, caractéristique de l'état d'avancement. Cette représentation est sensiblement différente de la machine à états définie précédemment dans le sens où le franchissement d'une transition est irréversible et qu'un état quitté ne pourra plus se reproduire. La modélisation du batch complet se scinde en trois parties, concernant l'état global du batch (figure 10), de chaque opération et chaque intermédiaire réactionnel du batch (figures 11 et 12). L'état 'à venir' représente un batch prévu pendant la campagne, mais dont l'ordre de 'mise en attente' n'a pas encore été effectué. Un batch 'en attente' peut entrer dans l'atelier, et devient 'en cours' dès que la première de ses opérations d'élaboration est chargée. Il est terminé à la date de fin de traitement de la dernière de ses opérations. L'état 'à venir' d'une opération est caractéristique d'un batch également 'à venir' ou d'une opération dont les intermédiaires entrant ne sont pas élaborés. Une opération 'en attente', peut être chargée si toutes les conditions requises pour le traitement sont satisfaites. Elle devient alors 'en cours', jusqu'à la fin du traitement où elle devient 'réalisée', pour devenir finalement 'déchargée' à la fin de la sortie des produits de l'équipement. Les états représentatifs de l'intermédiaire réactionnel sont de même nature, 'à venir', puis 'en cours' dès que l'opération qui le génère commence, 'réalisé' en fin de traitement, 'stocké' ou non selon le déroulement du modèle, 'consommé' dans tous les cas par l'opération suivante.

Nous avons modélisé l'ensemble des objets du modèle, avec leurs attributs de description mais aussi relationnels. La figure 13 présente schématiquement les relations existant entre les principaux objets modélisés.

Dynamique du modèle

Hypothèses générales sur le fonctionnement dynamique

Les hypothèses générales qui régissent le fonctionnement du système productif étudié sont les suivantes:

1. L'atelier de production fonctionne en continu, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.
2. Le chargement d'une opération n'est autorisé que sous des hypothèses strictes, concernant les différents besoins en ressources nécessaires (opérateurs, équipements, utilités, matières premières....) mais également le devenir des produits générés. Ces derniers doivent pouvoir être stockés en sortie d'opération, tout comme l'intermédiaire réactionnel sortant, s'il n'est pas consommé directement. Le fait de manipuler des intermédiaires instables ou stables seulement pendant une durée limitée conduit à réserver les ressources nécessaires à leur traitement, pour éviter leur dégradation.
3. Les tâches sont non préemptives: une opération entamée quelle qu'elle soit ne sera pas interrompue.
4. Selon les quantités respectives des différents batches de même nature à élaborer, on pourra associer plusieurs opérations dans un même équipement, pour un traitement simultané (si l'autorisation a été donnée pour le regroupement).

5. Inversement, si la capacité de l'équipement est insuffisante, on réalisera l'opération en plusieurs passes.
6. Une opération éclatée est intégralement réalisée avant le chargement de l'opération suivante (même si celle-ci est également éclatée).
7. On ne regroupe pas d'opérations générant des intermédiaires non stables. De même, les opérations multi-passes sont proscrites pour ce genre d'opérations.
8. Une opération consomme un intermédiaire non stable au maximum et ne peut dans ce cas générer qu'un intermédiaire stable. En effet, on n'autorise pas deux instabilités d'intermédiaires pour deux opérations successives.
9. Le traitement des opérations s'opère dans des conditions opératoires préalablement déterminées, avec une date d'achèvement connue.
10. Le déchargement et le nettoyage ne dépendent que de la disponibilité des opérateurs requis pour l'exécution de la tâche.
11. Le temps de nettoyage d'un équipement est dépendant de l'opération précédemment traitée. Le nettoyage peut cependant être évité, si l'opération suivante à traiter est de nature identique à celle qui vient d'être déchargée.
12. La maintenance des équipements est réalisée en respectant au mieux le calendrier de maintenance défini, à condition que l'équipement soit vide, que les opérateurs requis soient disponibles et que la maintenance n'affecte pas une éventuelle réservation de l'équipement.
13. Les hypothèses concernant le nettoyage et la maintenance des stockages pour intermédiaires sont les mêmes que pour les équipements. Chaque stockage peut contenir autant d'intermédiaires réactionnels de même nature que sa capacité le permet.

14. Un opérateur ne peut partir en congé que s'il n'est pas engagé dans une activité. Inversement, un opérateur ne peut être réservé à des dates de congés prévues dans son calendrier d'arrêt.

15. La possibilité de lancement d'un ou plusieurs batches de recyclage est évaluée à chaque fois qu'on ajoute une quantité en stock, en tenant compte des conditions de recyclage prévues.

16. Chaque ressource réservée peut être utilisée si l'on peut garantir sa disponibilité pour la ou les réservations qui lui sont affectées. Ainsi, un équipement réservé pour le traitement d'un intermédiaire non stable pourra indifféremment être utilisé pour la maintenance, le nettoyage ou même le traitement d'une opération, à condition que sa disponibilité pour l'exécution réservée soit assurée.

La logique de changement d'état : une approche par événements

Nous avons choisi de modéliser la dynamique du système par une approche par événements. Cette méthode est la plus couramment employée et, sans doute, la plus simple à mettre en œuvre. Les événements en constituent ainsi le moteur dynamique et peuvent être de natures différentes : **conditionnels, prédéterminés ou réservés.**

Les événements conditionnels

Les événements dits conditionnels ne peuvent être exécutés que si toutes leurs conditions d'occurrence sont satisfaites. Ces dernières concernent généralement la disponibilité des ressources requises pour l'exécution d'une tâche, comme par exemple la disponibilité des opérateurs pour charger une opération dans un équipement. Si un tel événement est à la fois

possible et exécuté, on effectue alors une analyse de son impact sur le système. Les modifications engendrées peuvent être immédiates sur l'état des objets concernés (un opérateur mobilisé pour une tâche devient "occupé") mais aussi différées (l'opérateur mobilisé redevient disponible à la fin de l'activité dans laquelle il s'engage). Les modifications différées de l'état des objets sont déterminées à des dates fixées dès l'exécution de l'événement et constituent "des événements prédéterminés". En résumé, un événement conditionnel est caractérisé par ses conditions d'occurrence, par la logique de changement d'état liée à son occurrence et par la génération d'événements prédéterminés induits. Les événements conditionnels recensés sont au nombre de 7 :

1. - Arrêt congé d'un opérateur;
2. - Maintenance d'un stockage pour intermédiaire réactionnel;
3. - Nettoyage d'un stockage pour intermédiaire réactionnel;
4. - Maintenance d'un équipement
5. - Nettoyage d'un équipement
6. - Déchargement des produits d'un équipement
7. - Chargement d'une opération dans un équipement

Les événements prédéterminés

Ces événements ont lieu à des dates préfixées ou prédéterminées. Ils peuvent être induits par l'exécution d'événements conditionnels, mais peuvent également représenter des événements prévus dans les calendriers spécifiques associés à certains objets. Un approvisionnement de matière première est ainsi un événement prédéterminé exécuté à la date spécifiée dans le

calendrier associé à la ressource. Un événement prédéterminé ne concerne en général qu'un seul et unique objet du système. Qu'elle soit induite pendant le déroulement du modèle, ou prévue en entrée des données, l'occurrence de ces événements provoque de la même façon que pour les événements conditionnels, une logique de changement d'état sur les objets concernés.

Nous présentons ci-après l'ensemble de ces événements prédéterminés en les classant par type d'objets du système auxquels ils se rapportent. Chaque événement prédéterminé présenté est caractérisé en premier lieu par sa date d'occurrence, date à laquelle il sera exécuté par le modèle. Nous commentons, à titre d'exemple, le cas des événements prédéterminés «équipements» et ceux associés aux batches.

Evénements prédéterminés "opérateurs"

Demande d'arrêt congé : Prédéterminée en entrée des données

Remise en disponibilité : Induite par le déroulement du modèle

Evénements prédéterminés "stockages pour intermédiaires"

Demande de maintenance : Prédéterminée en entrée des données

Remise en disponibilité : Induite par le déroulement du modèle

Fin de déchargement : Induite par le déroulement du modèle

Evénements prédéterminés "produits hors-zone"

Approvisionnement extérieur : Prédéterminé en entrée des données

Départ hors-site : Prédéterminé en entrée des données

Approvisionnement interne : Induit par le déroulement du modèle

Evénements prédéterminés "équipements"

Demande de maintenance : Prédéterminée en entrée des données

Remise en disponibilité : Induite par le déroulement du modèle

Alarme fin de traitement : Induite par le déroulement du modèle
Fin de déchargement : Induite par le déroulement du modèle

La demande de maintenance, prévue en entrée des données, permet l'occurrence de l'événement conditionnel associé. La remise en disponibilité ramène l'équipement à l'état libre propre (état 0), après une maintenance ou un nettoyage. La fin de déchargement conduit l'équipement à l'état libre sale (état 4). L'alarme fin de traitement permet l'occurrence de l'événement conditionnel de déchargement, en signifiant que le traitement est achevé. En outre, l'opération et l'éventuel intermédiaire sortant deviennent "faits". Si tous les intermédiaires entrant dans l'opération qui consomme l'intermédiaire généré sont "faits" ou "stockés", l'occurrence de l'alarme fin de traitement induit la mise "en attente" de cette opération. Enfin, les quantités d'utilités consommées par le traitement qui s'achève redeviennent disponibles à cette date.

Evénements prédéterminés associés aux batches

Mise en attente : Prédéterminé en entrée des données
Date d'achèvement : Induite par le déroulement du modèle

L'ordre de lancement en production des batches à élaborer peut être libre ou imposé. S'il est imposé, on peut spécifier les dates de lancement de chacun d'entre eux. Lors de l'occurrence de cet événement, le batch passe alors de l'état à venir à l'état "en attente", ainsi que toutes les opérations de la recette ne consommant pas d'intermédiaire réactionnel. Enfin, la date d'achèvement d'un batch correspond à la date de fin de déchargement de la dernière opération de sa recette. Le batch est alors "terminé" (état 3).

Les événements réservés

Les réservations compliquent considérablement la dynamique de fonctionnement du système, en imposant des événements également déterminés mais plus complexes que les précédents. Un événement réservé est à la fois prédéterminé (il est occurrence sans condition à une date prévue), et conditionnel (avec une logique de changement d'état concernant plusieurs objets et l'induction d'un ou plusieurs événements prédéterminés). L'événement réservé majeur est le chargement d'une opération pour le traitement d'intermédiaires instables ou stables en temps limité, à une date spécifiée, pour éviter la dégradation des produits.

Chargement prédéterminé d'une opération : Induit par le déroulement du modèle

Libération prédéterminée d'un équipement : Induite par le déroulement du modèle

Le chargement prédéterminé d'une opération est identique au chargement conditionnel, au niveau de la logique de changement d'état associée à son occurrence. Les ressources nécessaires sont identifiées dans les paramètres associés à l'événement et sont déjà réservées par le modèle. Les réservations des ressources mobilisées instantanément par l'occurrence de cet événement sont d'ailleurs annulées. La libération prédéterminée d'un équipement consiste à décharger l'équipement et éventuellement à le nettoyer pour le restituer dans les conditions requises pour un chargement d'opération réservé. Le nettoyage ne sera pas effectué si l'opération qui réserve l'équipement après sa libération prédéterminée est de même nature que l'opération déchargée lors de l'événement de libération prédéterminée.

L'horloge de la simulation

Nous avons choisi une horloge de simulation qui fonctionne par saut d'événements. Cette progression du temps nécessite une gestion adéquate des événements prédéterminés et réservés. On réalise alors des piles d'événements, où est classée par type et par date d'occurrence croissante, la totalité des événements prédéterminés et réservés. Ces piles sont initialisées en début de simulation par les événements prédéterminés prévus dans les calendriers spécifiques, et sont ensuite sans cesse actualisées par la génération des événements prédéterminés et réservés induits. Lors de la recherche d'une nouvelle date courante, on extrait parmi les différentes piles la date d'occurrence minimale, qui devient donc date courante. L'événement prédéterminé ou réservé correspondant est exécuté et éliminé de la pile, comme tous les événements non conditionnels prévus à cette date. Nous avons réalisé six piles d'événements prédéterminés ou réservés:

1. La pile d'événements prédéterminés «opérateur»
2. La pile d'événements prédéterminés «équipement»
3. La pile d'événements prédéterminés «stockage pour intermédiaire»
4. La pile d'événements prédéterminés «produit»
5. La pile d'événements prédéterminés «batch»
6. La pile des événements réservés.

Chaque nouvelle date courante est donc chaque fois issue de l'une de ces six piles.

Construction d'une base d'heuristiques

Pour simuler une campagne de production, il faut superposer aux règles opératoires, des règles de décision, qui permettent de gérer les conflits de l'atelier. En effet, à un instant donné, plusieurs événements conditionnels peuvent être exécutables. Or, leur ordre d'exécution peut influencer directement sur l'évolution de la simulation. Il faut donc aider le modèle à effectuer les choix entre les événements conditionnels concurrents. Ces problèmes de décision constituent un point crucial du problème de l'ordonnancement, car pour des conditions de fonctionnement imposées, l'efficacité de la gestion de production dépend des choix effectués pour régler chaque conflit rencontré. Sur site, on aborde le problème en utilisant des règles plus ou moins empiriques, i.e., des heuristiques. Pour notre modèle de simulation, la base de règles de décision sera donc composée d'un ensemble d'heuristiques plus ou moins complexes.

La base a été élaborée selon deux axes principaux de préoccupations: d'une part modéliser les modes de décision utilisés sur site et d'autre part, pouvoir tester d'autres alternatives de fonctionnement. L'implantation des différentes règles a été effectuée d'une manière modulaire, qui permet de façon très aisée de modifier ou d'ajouter de nouvelles règles de décision.

Six des sept événements conditionnels répertoriés peuvent avoir des ressources communes. En effet, seul le départ en congé des opérateurs sera effectif dès que toutes les conditions d'occurrence sont satisfaites. Les six autres types d'événements peuvent donc être concurrents à un instant donné et générer des conflits. La première partie de la base d'heuristiques consiste donc à donner un ordre de priorité entre les six types d'événements possibles et le modèle les choisit alors selon l'ordre spécifié. Ensuite, il convient de déterminer des heuristiques pour les événements concurrents de même type. Nous ne détaillerons pas l'ensemble des heuristiques

implantées. A titre d'exemple, nous donnons uniquement celles concernant le chargement d'une opération dans un équipement. La base sélectionne en priorité l'équipement "disponible pour chargement" selon une des dix règles suivantes:

1. Au hasard;
2. Celui disponible depuis le plus longtemps;
3. Celui disponible depuis le moins longtemps;
4. Celui dont la charge de travail déjà effectuée est maximale;
5. Celui dont la charge de travail déjà effectuée est minimale;
6. Celui qui a la charge de travail en attente la plus importante;
7. Celui qui a la charge de travail en attente la moins importante;
8. Celui qui a le nombre d'opérations dans sa file d'attente le plus important;
9. Celui qui a le nombre d'opérations dans sa file d'attente le moins important;
10. Une des neuf règles précédentes choisie au hasard.

Fonctionnement global du modèle

En fonction de tous les éléments présentés précédemment, l'algorithme de résolution est le suivant:

a> Au départ, on lit et initialise les données. On prépare également les piles d'événements prédéterminés, que l'on charge avec les événements prévus en entrée des données. La date courante est initialisée à zéro.

b> A la date courante, on exécute tous les événements prédéterminés et réservés prévus à cette date et on exécute la logique de changement d'état associée, en chargeant éventuellement les piles avec les événements prédéterminés induits.

c> On fait ensuite l'inventaire de tous les événements conditionnels possibles à cette date.

Si aucun événement conditionnel n'est envisageable, on teste les piles d'événements prédéterminés. Si elles sont vides, le déroulement du modèle est terminé, sinon, la date d'occurrence minimale parmi tous les événements prédéterminés stockés dans les piles devient date courante et l'on retourne en a>.

Si plusieurs événements conditionnels sont possibles, on utilise la base d'heuristiques pour en sélectionner un, que l'on exécute avec la logique de changement d'état associée. Les événements prédéterminés ou réservés induits sont stockés dans les piles. On retourne alors faire un nouvel inventaire des événements conditionnels possibles.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons développé un modèle de simulation d'un atelier discontinu de chimie fine, basé sur une approche à événements discrets avec un degré de détail important. La prise en compte des contraintes, notamment celles concernant l'instabilité des intermédiaires réactionnels a été effectuée. Nous avons également intégré des notions peu souvent considérées comme le travail des opérateurs, les opérations de maintenance ou de nettoyage, ou encore les nécessités de recyclage.

L'approche modulaire dans la structure du modèle, tant au niveau de la gestion des événements, que des piles ou des heuristiques permet des modifications aisées des conditions de fonctionnement. Par exemple, on peut facilement modifier les opérations de maintenance en les effectuant non pas à des dates préfixées mais après un certain temps d'utilisation. On peut aussi aisément fixer le nombre d'opérations regroupables non pas à deux mais à un nombre limite choisi. De la même façon, l'hypothèse contraignant une opération éclatée à être complètement réalisée avant le début de la suivante peut purement être supprimée...

En fait, le modèle développé permet, après quelques légères adaptations à un contexte particulier de production, de modéliser finement le fonctionnement réel d'un site productif et peut ainsi être utilisé de façons diverses en simulation.

Les perspectives d'évolution, d'un point de vue théorique, consistent à élargir encore les possibilités de description du modèle, en ce qui concerne en particulier les hypothèses de fonctionnement retenues. On pourrait par exemple envisager un fonctionnement de l'atelier, avec des arrêts de production en fin de journée. Cette modification n'est pas triviale et nécessite l'implantation de règles de fonctionnement ad hoc.

On pourrait aussi décrire des opérations qui consomment ou produisent plusieurs intermédiaires non stables, ou à traiter la génération successive de plusieurs intermédiaires non stables. La prise en compte du temps de "set-up", ou temps de réglage nécessaire entre deux opérations successives, sur le même équipement, serait aussi une voie judicieuse.

Par ailleurs, il serait intéressant de mettre en place des conditions de fonctionnement alternatives. Par exemple, une maintenance pourrait être réalisée en mobilisant, selon les disponibilités des ressources, un nombre $N1$ d'opérateurs pendant une durée $T1$ ou $N2$ opérateurs

pendant une durée T_2 . De la même façon, une opération pourrait être traitée pour différents niveaux d'utilités disponibles, avec des temps opératoires dépendant de ces niveaux.

La mise en œuvre de ce modèle de simulation est illustrée dans la deuxième partie de cet article, où un exemple de grande taille (comportant 24 équipements et 180 batches à élaborer ou recycler) est traité de façon détaillée. Les problèmes liés à l'introduction des données, les résultats fournis par le simulateur ainsi que les diverses utilisations possibles de ce logiciel y sont également précisées.

Nomenclature

- Da** : Date d'approvisionnement
- Dd** : Date de début de réservation de l'utilité
- Dr** : Date de restitution du bloc d'utilité
- Dirésa** : Date de réservation de l'opérateur
- Durésa** : Durée de l'activité réservée
- IR** : Intermédiaire réactionnel
- MP** : Matière première
- Nrésa** : Nombre de réservations de l'opérateur
- PF** : Produit final
- PIP** : Produit intermédiaire partagé
- PNR** : Produit non recyclé sur le site
- PR** : Produit recyclé
- Va** : Volume reçu par approvisionnement
- Vr** : Volume réservé de matière première
- VR** : Volume réactionnel

Références

Baudet P. , Azzaro-Pantel C., Domenech S., Pibouleau L., Simulation d'ateliers discontinus de chimie fine, Proceedings of the "5ème Congrès de Génie des Procédés, Lyon, 19-20-21 September 1995

Baudet P. , Azzaro-Pantel C., Domenech S., Pibouleau L., A discrete-event simulation model for batch chemical plant scheduling, ADEDOPS Workshop (workshop on analysis and design of event-driven operations in process systems), Imperial College , Londres, 10-11 avril 1995

Baudet P. , Azzaro-Pantel C., Domenech S., Pibouleau L., Un modèle de simulation à événements discrets pour la gestion de production d'un atelier de chimie fine, Colloque modélisation des systèmes réactifs, AFCET, 28-29 mars 1996

Bel G., Dubois D, Modélisation et simulation des systèmes automatisés, RAIRO, APII, Vol. 19, n°1, 42-52 (1985)

Birewar D.B., I.E. Grossman, Simultaneous production planning and scheduling in multiproduct batch plants, Ind. Eng. Chem. Res., 29, 570 (1990).

Caux C., Fleury G., Gourgand M., Kellert P., Couplage méthodes d'ordonnancement-simulation pour l'ordonnancement de systèmes industriels de traitement de surface, RAIRO Recherche opérationnelle, Vol. 29 n°4, 391-413, (1995)

Egli U.M., Rippin D. W. T., Short term scheduling for multiproduct batch chemical plants, Comput. Chem. Engng, 10, 303 (1986).

Espuna A., Puigjaner L., On the solution of the retrofitting problem for multiproduct batch semi-continuous chemical plants, *Comput. Chem. Engng*, 13, 483 (1989).

Gotha, Les problèmes d'ordonnancement, *RAIRO Recherche opérationnelle*, Vol. 27 n°1, p. 77-150 (1993)

Grossman I.E., R.W.H. Sargent, Optimal design of multipurpose chemical plants, *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop.* , 18, 343 (1979).

Karimi I.A., Reklaitis G.V., Intermediate storage in continuous processes involving stages of parallel units, *AIChE Journal*, 31, 44 (1985).

Ku H., Karimi I.A., Scheduling in serial multiproduct batch processes with finite intermediate storage : A mixed integer linear program formulation, *Ind. Eng..Chem. Res.*, 27, 1840 (1988)

Ku H., Karimi I.A., Scheduling in serial multiproduct batch processes with due-date penalties, *Ind. Eng.Chem. Res.*, 29, 580 (1990)

Ku H., Karimi I.A., An evaluation of simulated annealing for batch process scheduling, *Ind. Eng.Chem. Res.*, 30, 163 (1991)

Mauderli A.M., D.W.T. Rippin, Production planning and scheduling for multi-purpose batch chemical plants, *Comput. Chem. Engng.*, 3, 199 (1979).

Musier R., Evans L., Batch process management, *Chem. Eng. Prog.*, 4, 37, (1980)

Peyrol E., Pibouleau L., Couderc J.P., Domenech S., Semiconductor circuit fabrication plant management by discrete simulation, *Comm. 4th Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Devices and Processes*, Zurich,12-14 septembre (1991), *Simulation of Semiconductor Devices and Processes*, ed. by W. Fichtner and D. Aemmer, Hartung -Gorre Verlag, Vol. 4, pp.571-577

Peyrol E., Couderc J.P., Pibouleau L., Domenech S., Gestion des ressources dans un atelier de fabrication de composants électroniques, *Comm. 3ème Congrès Français de Génie des Procédés*,

Compiègne, 4-6 septembre (1991), Récents Progrès en Génie des Procédés, Vol. 16, Génie des réacteurs et des réactions, éd. par Tech. Doc. LAVOISIER, Paris, pp. 309-314

Peyrol E. - Thèse de Doctorat INPT- 15 décembre 1992, Gestion d'un atelier de fabrication de composants électroniques

Rajagolapan D., I.A. Karimi, Completion times in a serial mixed-storage multiproduct processes with transfer and set-up times, Comput. Chem. Engng, Vol. 13, 175 (1989)

Reklaitis G.V., Overview on scheduling and planning of process operations, NATO Advanced Study Institute on Batch Processing Systems Engineering, Antalya, Turkey, (1992).

Rippin D.W.T., Simulation of single- and multiproduct batch chemical plants for optimal design and operation, Comput. Chem. Engng., 7, 137 (1983).

Rippin D.W.T., Batch process systems engineering : a retrospective and prospective review, Comput. Chem. Engng, 17, Suppl. S531-S536 (1993)

Wellons M.C., Reklaitis G.V., Scheduling of multipurpose batch chemical plants-multiple-product campaign formation and production planning, Ind. Eng.Chem. Res., 30, 688 (1991)

Yamalidou E.C., E.P. Patsidou, J.C. Kantor, Modeling discrete-event dynamical systems for chemical process control- a survey of several new techniques, Comput. Chem. Engng, 14, 281 (1990).

Liste des figures

- Figure 1:** Etat instantané de la matière première
- Figure 2:** Etat instantané d'une utilité
- Figure 3:** La machine à états «équipements»
- Figure 4:** La machine à états «stockages»
- Figure 5:** Etat instantané d'un stockage «occupé»
- Figure 6:** La machine à états «opérateurs»
- Figure 7:** Tableau de réservations de l'opérateur i
- Figure 8:** Etat instantané d'une ressource de stockage
- Figure 9:** Opérations de production et de recyclage
- Figure 10:** Etats logiques d'un batch
- Figure 11:** Etats logiques d'une opération
- Figure 12:** Etats logiques d'un intermédiaire
- Figure 13:** Relations entre les objets du modèle

Liste des tableaux

Tableau 1: La machine à états «équipements»

Tableau 2: La machine à états «stockages»

Tableau 3: La machine à états «opérateurs»