

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

Partie II: Mise en œuvre du simulateur

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. - Après avoir présenté en détail dans la partie 1 de cet article le développement d'un modèle de simulation à événements discrets dédié à un atelier discontinu de chimie fine, nous proposons dans la partie 2 sa mise en oeuvre et l'exploitation des résultats obtenus. Les applications proposées ici nous paraissent intéressantes pour une gestion de production plus efficace mais également pour répondre à des préoccupations classiques en génie des procédés (conception d'ateliers, traitement des effluents, stockage et stabilité d'intermédiaires réactionnels).

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

Abstract. - The first part of this paper was devoted to the development of a discrete-event simulation model dedicated to fine chemistry. In the second part, some significant simulation results are presented. Some applications of the model which seem interesting from a production management viewpoint but also from chemical engineering concepts (plant design, effluent treatment, stability et storage of reaction intermediates...) are proposed and analyzed in great details.

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

* Toute correspondance devra être adressée à cet auteur

INTRODUCTION

Nous présentons dans cette partie, la mise en œuvre du simulateur pour étudier le comportement d'un système productif au cours du temps. Nous décrivons les données nécessaires à la simulation, ainsi que la gestion et l'organisation de ces données, puis nous faisons l'inventaire des résultats obtenus.

Ensuite, nous montrons comment le modèle peut servir comme outil d'aide à la production ou comme système interactif d'aide à la décision (S.I.A.D, Zaraté, (1991)). Quelques utilisations du logiciel développé, qui permettent de répondre à des préoccupations classiques de génie chimique, comme le suivi des rejets d'effluents ou les problèmes de traitement adéquat des intermédiaires réactionnels sont également présentées. Nous proposons par la suite quelques applications possibles du simulateur pour la détermination interactive de paramètres sensibles de la campagne de production.

Présentation générale de l'exemple traité

Il faut mentionner d'emblée que l'exemple présenté ici n'est pas directement issu d'un contexte industriel réel. Bien que fictif, il reproduit néanmoins différentes observations de conditions et de contraintes de fonctionnement d'ateliers discontinus du domaine chimique (Rippin (1983), Reklaitis (1992)). Il a été développé pour illustrer et intégrer les caractéristiques principales du modèle. Nous avons choisi un exemple de taille relativement importante (près de 200 produits élaborés ou recyclés pendant la campagne, 24 équipements) comparativement à ceux

généralement présentés dans la littérature, souvent de taille trop réduite par rapport à la réalité industrielle.

On précise que cet exemple est inspiré du domaine pharmaceutique, élaborant sur un même site, des produits liquides (sirops ou gouttes), et des produits solides (capsules ou cachets). L'atelier est composé de quatre zones distinctes; dans la première ont lieu les opérations de réaction et de séparation, la deuxième et la troisième sont dédiées au traitement des solides (lavage, séchage, broyage, agglomération) et la dernière est destinée à la mise en forme finale des produits, qu'ils soient liquides ou solides. Le schéma fonctionnel de la figure 1 présente globalement l'atelier de production envisagé dans cette étude. L'atelier fonctionne en continu, 7 jours par semaine, 24 heures sur 24. Les équipes d'opérateurs, identiques tant au niveau du nombre que de la polyvalence, assurent 3 rotations par jour. Enfin, on suppose que l'atelier est vide en début de simulation, c'est-à-dire sans «en cours» d'une campagne précédente.

Les unités choisies sont les suivantes: la minute pour le temps, le degré Kelvin pour la température, et le bar pour la pression. Les niveaux d'utilités sont exprimés en "unités d'utilités", sans précision supplémentaire.

LES DONNEES

Le besoin en données est important pour des simulations détaillées. La collecte de données concerne l'architecture de l'atelier, les recettes de production, les règles de décision à appliquer et la production à réaliser. Bien entendu, il faut également préciser certaines conditions de fonctionnement supplémentaires et enfin, l'horizon de simulation.

L'architecture de l'atelier, les ressources et les objets

L'ensemble des données relatives à la structure de l'atelier concerne le nombre de zones, d'équipements, de bacs de stockage, d'opérateurs, ainsi que la description de tous les réactifs, produits et sous-produits rencontrés. Pour chaque objet défini, le simulateur doit disposer de l'ensemble des attributs descriptifs nécessaires, ce qui représente un volume global de données très conséquent.

Les équipements

Nous avons réparti 24 équipements entre les quatre zones de l'atelier. Leurs caractéristiques sont regroupées dans le tableau 1. Les équipements sont définis par une capacité et des conditions opératoires limites (température et pression). Pendant la campagne simulée, les équipements 8 à 13 subiront une opération de maintenance pendant une durée de 2500 unités de temps, à partir de la date 15000, en mobilisant chacun un opérateur.

Les stockages pour intermédiaires réactionnels

Nous disposons de 30 bacs de stockage dans les trois premières zones de l'atelier pour accueillir, si besoin est, des intermédiaires. Ils sont caractérisés par une capacité et des conditions de nettoyage. Seuls les stockages de la zone 1 seront nettoyés après usage pendant une durée de 20 unités de temps, mobilisant à chaque fois un opérateur. Aucune opération de maintenance n'est affectée à ces stockages. Le tableau 2 résume les attributs des stockages pour intermédiaires réactionnels.

Les opérateurs

Sur les six opérateurs présents en permanence sur le site, quatre sont affectés spécifiquement à une zone, et les deux autres sont polyvalents sur tout l'atelier. Une indisponibilité de 1440 unités

de temps (un jour de congé) est prévue pour tous les opérateurs à la date 10080. Le tableau 3 résume les informations relatives aux opérateurs.

Les utilités

Trois sources d'utilités sont considérées, chacune d'une disponibilité maximale instantanée de 5000 unités. L'ensemble de la consommation instantanée de chacune de ces utilités pour le traitement simultané de plusieurs opérations ne pourra pas excéder 5000 unités.

Ressources consommables; produits; sous-produits

Les matières premières (MP)

Neuf matières premières sont consommées sur le site. Pour chacune d'elle, la quantité disponible au début de la campagne est égale à 2000 litres, un premier approvisionnement de 5000 litres est effectué à la date 5000 et un second approvisionnement de 7000 litres a lieu à la date 10080.

Les produits intermédiaires partagés (PIP)

Deux produits intermédiaires partagés interviennent dans l'exemple traité et seront consommés dans les opérations des recettes de produits finaux dans lesquelles ils entrent comme réactifs. Les deux stocks correspondants à ces produits sont vides au début de la simulation mais un approvisionnement d'appoint de 4000 litres est prévu à la date 8000. On suppose que 40 batches de produits intermédiaires partagés sont ainsi élaborés sur le site pendant la campagne.

Les produits finaux (PF)

Dix produits finaux différents sont élaborés pendant la campagne. Leur stock est supposé vide au départ de la simulation.

Les produits recyclés (PR)

Cinq produits recyclés de nature différente (c'est-à-dire nécessitant des traitements de recyclage différents) sont générés sur le site. Le stockage de chacun de ces 5 produits, vide au départ de la simulation, a une capacité limitée à 2000 unités.

Les produits non recyclés (PNR)

Deux produits non recyclés (nommés comme tels car ils ne sont pas traités sur le site de la production "principale" mais transférés ailleurs aux dates spécifiées) sont répertoriés sur le site. Les stocks sont initialement vides et la capacité de stockage de ces deux produits est limitée à seulement 4000 unités de volume, mais quatre vidanges (ou départs hors-site) sont prévues pendant la campagne (voir tableau 4).

Les recettes de production

Pour chaque produit final, chaque produit intermédiaire partagé et chaque produit recyclé défini, il faut décrire la recette de production ou de recyclage associé, opération par opération. Les descriptions suivantes concernent les recettes de production envisagées dans notre exemple.

Dix-sept produits nécessitent la définition d'une recette: 10 produits finaux, mais aussi 2 produits intermédiaires partagés et 5 produits recyclés. La description exhaustive de chacune de ces recettes de production ou de recyclage est présentée dans Baudet (1997). Nous avons choisi, à titre d'exemple, de détailler la recette du produit final (PF5). Ce produit final numéro 5 est élaboré en 9 opérations (voir figure 2). Cette recette n'est pas linéaire puisque deux intermédiaires élaborés indépendamment (PI3 et PI6) entrent dans la même opération (la 7). Globalement, cette recette consomme 4 matières premières (MP1, MP2, MP3 et MP7) et génère, outre le produit

final (PF5), le produit recyclé PR3. La description précise des opérations de la recette du PF5 est présentée dans les tableaux 5 et 6.

Rappelons que les volumes réactionnels (V_r) des opérations sont exprimés pour un volume de référence (soit le volume du batch à produire) de 100 litres. On définit également ses conditions opératoires (température et pression), les équipements possibles (Eq), les besoins en utilités, les temps opératoires, ainsi que les réactifs entrant et produits sortant. Les temps opératoires et besoins en utilités sont supposés être indépendants du volume traité. Les intermédiaires réactionnels sortant sont affectés à une future opération de la recette. Tous les intermédiaires réactionnels sont stables, hormis celui généré par l'opération 8, qui est stable en temps limité et doit impérativement être traité au plus tard 1440 unités de temps après sa production.

La production souhaitée

Ces données concernent la production à réaliser. On déclare le nombre de batches de chaque type (produit final ou produit intermédiaire partagé) à élaborer, ainsi que les quantités produites par chacun des batches.

Les batches de produits finaux

Cent batches de produits finaux doivent être élaborés au cours de la campagne simulée, 10 de chaque type. Les diverses quantités à produire pour chaque batch (numéroté de 1 à 100) sont spécifiées dans le tableau 7.

Les batches de produits intermédiaires partagés

Nous avons programmé l'élaboration de 40 batches (numérotés de 101 à 140) de produits intermédiaires partagés, pour assurer la production des produits finaux dans la recette desquels ils

entrent comme réactifs. En complément de l'approvisionnement prévu à la date 8000, 20 batches de PIP1 et autant de PIP2, chacun de 200 unités de volume, sont élaborés sur le site, en partageant les ressources avec les opérations de produits finaux. Cette production "parallèle" est représentée dans le tableau 8.

Les recyclages

Pour chaque produit recyclé répertorié, on définit en entrée des données un volume de recyclage (volume de produit recyclé par batch) et un mode de recyclage minimum ou maximum. Pour un mode de recyclage minimum, on recyclera une quantité minimale de produit, c'est-à-dire la quantité qui ne peut être stockée, compte tenu de la capacité des stockages. Inversement, pour un mode maximum, on recyclera le plus grand nombre possible de batches. Nous avons choisi des volumes de recyclage divers pour un mode de recyclage unique, maximum. Les données concernant les recyclages sont présentées dans la section relative au prétraitement des données.

Conditions opératoires et heuristiques

Le simulateur doit disposer des règles de décision (ou heuristiques) pour gérer les conflits, ainsi que d'informations relatives à l'ordre de lancement (libre ou imposé), ou les regroupements d'opérations (autorisés ou non). On stipule aussi d'éventuelles dates d'en cours, dates auxquelles seront effectuées des bilans intermédiaires sur la campagne de production. Bien entendu, il faut finalement fixer une durée limite à la campagne de simulation, c'est-à-dire un horizon de simulation.

La collecte et l'entrée de ces données dans le simulateur est un travail important; il faut tout de même noter que la majorité de ces données reste identique d'une simulation à la suivante, notamment celles concernant l'architecture de l'atelier et les recettes de production. Généralement, d'une simulation à l'autre, on modifie seulement la production souhaitée, et éventuellement les conditions de fonctionnement et l'horizon de simulation.

Nous présentons maintenant les conditions opératoires générales, ainsi que les heuristiques utilisées.

Conditions opératoires générales

La durée ou l'horizon de simulation est fixée à 50 000 minutes, soit environ 5 semaines. Aucune priorité n'est affectée aux batches et aucun regroupement d'opérations n'est autorisé. Enfin, l'ordre de lancement des batches n'est pas imposé et sera soumis aux heuristiques appliquées pour le chargement des opérations. Un récapitulatif des conditions générales de simulation est présenté dans le tableau 9.

Les heuristiques appliquées

Des heuristiques sont utilisées pour gérer les éventuels conflits entre événements concurrents à une même date. On spécifie d'abord un ordre de priorité entre type d'événements, puis pour les événements de type identique, des heuristiques pour la sélection de l'événement prioritaire. L'ordre de priorité entre types d'événements est présenté dans le tableau 10. Il favorise les congés opérateurs mais également les maintenances, pour éviter les retards de ces opérations. Ensuite, d'un point de vue organisationnel, on favorise les événements ayant trait aux équipements devant ceux liés aux stockages pour intermédiaires.

Les heuristiques choisies pour gérer les conflits entre événements de même type sont représentées dans le tableau 11. Pour les maintenances et les nettoyages, on choisira l'équipement

ou le bac de stockage qui attend depuis le plus longtemps. Pour le choix des équipements à charger ou à décharger parmi tous ceux envisageables, on choisira celui devant lequel la charge totale de travail en attente est la plus grande. Pour le choix d'une opération à charger dans la file d'attente d'un équipement sélectionné pour le chargement, on choisira le produit pour lequel le temps opératoire est minimum. Enfin pour sélectionner les opérateurs requis pour l'exécution d'une tâche, on choisira en premier lieu les moins polyvalents habilités à intervenir, puis parmi eux, l'opérateur dont la charge de travail déjà effectuée est maximale.

LE PRETRAITEMENT DES DONNEES

Préalablement au démarrage de la simulation, le modèle effectue un certain nombre de tests pour préparer les données et vérifier en particulier leur cohérence.

Tests de cohérence

Les données sont pour la plupart interdépendantes et le simulateur doit tout au long de l'entrée initiale des données ou de modifications de certaines d'entre elles, veiller à la cohérence des valeurs et des paramètres proposés. Bien sûr, certains tests sont triviaux mais d'autres s'avèrent plus délicats à réaliser. Par exemple, lors de la définition d'une recette, on doit simplement vérifier que les équipements déclarés pour effectuer une opération sont bien définis dans l'architecture de l'atelier, mais lors de la suppression d'un équipement de l'architecture, on doit veiller à ce qu'aucune recette n'utilise cet équipement, ce qui est nettement plus long.

Bilan matière et préparation des batches de recyclage

Après avoir défini la production souhaitée, les états initiaux des différents stockages, l'ensemble des approvisionnements et les départs hors-site de produits non recyclés sur site, le simulateur effectue un bilan matière complet. Il détermine alors si les réactifs sont en quantité suffisante pour assurer la production et si les sous-produits pourront être stockés (les PNR). Il détermine également le nombre de batches de recyclage de chaque produit recyclé qui devront être effectués, en fonction du mode de recyclage choisi. Ainsi, pour un mode de recyclage maximum, on programmera un nombre de batches de recyclage égal à la partie entière de la division de la quantité totale du sous-produit généré par la quantité recyclée par batch. A partir du bilan matière effectué dès l'entrée des données, le modèle calcule le nombre de batches de chaque type nécessaires pendant la campagne. L'ensemble de ces données est consigné dans le tableau 12. Les 40 batches de recyclage programmés sont numérotés de 141 à 180.

En conclusion, 180 batches doivent être traités (élaborés ou recyclés) sur le site, chacun selon sa recette et ses spécifications de quantité.

Préparation des piles d'événements prédéterminés

Les événements prédéterminés doivent être chargés dans les piles d'événements prédéterminés qui vont servir d'échéancier au simulateur. Ces piles sont au préalable vidées d'éventuels contenus antérieurs. Pour l'exemple traité, la préparation des piles consiste à programmer l'arrêt congé prévu pour chaque opérateur (tableau 3), l'opération de maintenance des équipements 8 à

13, les deux approvisionnements prévus en MP et PIP, ainsi que les quatre départs hors-site de PNR (tableau 4).

Préparation finale de la simulation

En fonction de l'ordre de lancement choisi, le simulateur place un, plusieurs ou la totalité des batches dans l'état 'en attente', ainsi que toutes les opérations de ce(s) batch(es) sans intermédiaire réactionnel entrant. Après cet ensemble de tests, le simulateur actionne le modèle développé, pour générer un ensemble de résultats représentatifs du déroulement de la campagne.

RESULTATS DE LA SIMULATION

Les résultats fournis par le modèle sont nombreux et disponibles sous forme de graphiques, de tableaux ou de listes diverses. Le simulateur fonctionne sur une machine IBM 3012, de capacité 98 Mips Vax, cadencée à 66 Mhz, fonctionnant sur réseau Ethernet. La notion d'interactivité est acceptée généralement pour des temps d'exécution n'excédant pas la minute. L'exemple, d'une taille déjà conséquente (24 équipements, 180 batches) est exécuté en 22 secondes CPU, ce qui place le logiciel dans le cadre des outils interactifs d'aide à la production et à la décision.

Les résultats sur la production souhaitée

Pour cet exemple, les produits finaux sont tous élaborés à la fin de la simulation. Un tableau général présente les statistiques globales sur la production de ces batches, date de début et de fin de traitement ou encore temps de cycle. La date de fin de traitement permet de prévoir la disponibilité du produit pour le client, quant au temps de cycle, il mesure l'efficacité du système productif. Si des dates d'attente étaient spécifiées en entrée des données, ce tableau proposerait également les résultats concernant les éventuels retards des produits sortant. Ce tableau peut être manipulé à façon pour présenter les différents résultats dans la configuration souhaitée, par date de début ou de fin de traitement croissante ou décroissante, en fonction des temps de cycle respectifs des produits, ou simplement par numéro de batch, comme présenté dans le tableau 13. La date d'achèvement des tâches, qui est la date de fin de traitement du dernier produit, est ici la date 48600, pour le batch numéro 34.

On dispose également d'informations précises sur chacun des batches. A titre d'exemple, le tableau 14 décrit l'élaboration du batch de produit final numéro 45. On peut remarquer pour ce batch un temps d'attente très important entre l'opération 3, sortie à la date 5795, et l'opération 4, chargée seulement à la date 33018. Cette attente de 27223 unités de temps constitue presque 90 % du temps de cycle de ce batch (temps de cycle du batch numéro 45: 30434 unités de temps).

Le temps de cycle des batches permet d'évaluer l'attente des produits pendant le déroulement de leur production. La figure 3 propose les temps de cycle des batches de produits finaux 1 à 30, avec en comparaison, leurs temps opératoires minimum et maximum. Le temps opératoire minimum d'un batch est la somme des temps d'entrée et de traitement de chacune des opérations de la recette, traitée sur les équipements les plus performants (les plus rapides), alors que le temps

opérateur maximum concerne les équipements les moins rapides. Sur la figure 3, on remarque que les batches numéro 3, 11, 21 et 24 ont des temps de cycle très élevés, significatifs d'attente importante dans l'atelier.

On dispose d'informations identiques concernant les batches de produits intermédiaires partagés ou de recyclage, même si les résultats les plus importants concernent bien évidemment les produits finaux (temps de cycle, date de fin de traitement ou retard par rapport à une date d'attente spécifiée).

Résultats sur les ressources utilisées

Les équipements

Les équipements sont les ressources les plus étudiées du système productif. En général, on décrit leur activité, au moyen d'un classique diagramme de Gantt. Ce diagramme permet de visualiser d'un simple coup d'œil le déroulement global d'une campagne de production, en présentant sur le même graphe, équipements et produits. On constate ainsi l'activité de traitement d'opération de chacun des équipements au cours du temps de simulation, ainsi que les produits traités pendant chacune de ces activités. On peut ainsi détecter ainsi rapidement les équipements dont la charge de travail est très élevée (goulets d'étranglement) et qui mériteront une étude plus approfondie.

Chaque équipement est également décrit très précisément dans divers tableaux et graphiques représentatifs de son activité. La figure 4 montre un ensemble de ces résultats disponibles. On peut détailler aussi finement que souhaité l'activité de l'équipement au cours de la campagne et observer la succession des opérations traitées. On dispose enfin de divers résultats statistiques comme le taux d'utilisation, le nombre d'opérations traitées...

Concernant l'organisation effective de la campagne, on peut éditer des listes pour chaque équipement, où sont consignés les détails de chaque activité, de traitement d'opération (chargement ou déchargement) mais aussi de nettoyage ou de maintenance, avec éventuellement, les opérateurs mobilisés. Ces listes complètes ou agrégées peuvent être utilisées directement comme "planning" de production de la campagne à réaliser.

Les opérateurs

L'activité respective de chacun des opérateurs de l'atelier peut être observée, de la même façon que pour les équipements. On dispose des mêmes résultats statistiques, que ce soit le nombre d'interventions (par zone, pour les opérateurs), le taux global d'activité... La figure 5 présente les interventions d'opérateurs pendant la campagne. Au total, 2065 interventions sont effectuées pendant la campagne, dont 670 par les deux opérateurs polyvalents 5 et 6, qui suppléent les opérateurs à une seule zone d'habilitation en cas de besoin.

On dispose également de figures représentant les statistiques sur le taux d'activité de chaque opérateur et sur le suivi de leur activité au cours du temps de simulation. On peut de la même façon que pour les équipements éditer les listes détaillées des activités à réaliser pour chaque opérateur, véritable cahier des charges pour la gestion de la production à assurer.

Quelques résultats typiques pour des problèmes de génie des procédés

Suivi du niveau de rejet pendant la simulation

Dans le cas où certains équipements rejettent des produits secondaires polluants ou toxiques, on dispose d'un graphique de suivi de la quantité totale générée simultanément, au cours du temps de

simulation. On peut alors visualiser les périodes critiques, pendant lesquelles le niveau de rejet atteint le seuil maximum toléré et peut alors induire des refus de chargement d'opérations.

Nous avons ajouté un rejet polluant dans l'exemple traité, généré par les opérations de réaction (équipements 1 à 4). Nous ne présentons pas de façon détaillée les niveaux de rejets associés à chaque opération de réaction, pour des raisons de concision. Nous précisons simplement qu'il est nul dans certains cas, pour atteindre 625 unités au maximum.

Dans un premier temps, le rejet n'est pas limité (pas de contrainte de seuil maximum); la figure 6.a présente le niveau de rejet entre les dates 0 et 10 000. Il atteint un maximum pendant quatre périodes rapprochées entre les dates 3375 et 4105, avec un rejet de 1260 unités de rejet. Pendant la période considérée, le rejet est pratiquement toujours supérieur à 500 (92.5 % du temps), et assez fréquemment supérieur à 1000 (42.1 % du temps). La date d'achèvement de la campagne reste inchangée (48600 minutes), puisque qu'aucune contrainte n'est imposée.

Dans un second temps, nous avons imposé un seuil maximum de rejet, fixé à 1000 unités de rejet (figure 6.b). Cette contrainte imposée perturbe le fonctionnement de la campagne, en interdisant tout chargement d'opération qui conduirait à un rejet total supérieur au seuil maximum admissible. Cependant, cette contrainte est peu pénalisante puisque la date d'achèvement de la campagne est repoussée seulement de 360 minutes (date d'achèvement: 48960 minutes). Le niveau de rejet 'libre' (sans contrainte de rejet, figure 10.a) excède 1000 pendant 42.1 % du temps, mais pour des valeurs peu supérieures, hormis les quatre 'pics de pollution' entre les dates 3375 et 4105. La contrainte de seuil, fixée à 1000 n'impose finalement qu'une réorganisation mineure de la campagne.

Enfin, nous avons abaissé ce seuil maximum admissible à 500 unités de rejet. Dans ce cas (figure 6.c), le déroulement de la campagne est nettement perturbé, puisque la campagne n'est pas

achevée à la fin de la simulation (après 50 000 minutes), avec plus de 30 batches de produits finaux encore en cours de réalisation. Sans contrainte, le niveau total de rejet est presque exclusivement supérieur à 500 (92.5 % du temps), voisin de 1000, la plupart du temps. Imposer ce niveau de rejet maximum pénalise donc fortement le déroulement de la campagne.

Sans contrainte sur le niveau de rejet maximum, la sortie graphique permet d'évaluer et visualiser les rejets toxiques ou polluants générés pendant la campagne et permet ainsi de détecter les 'pics de pollution'. D'autre part, si un niveau de rejet maximum est fixé, on peut évaluer l'impact de cette contrainte sur le déroulement de la campagne, sur la date d'achèvement des tâches ou sur d'autres critères techniques envisageables (temps de cycle, retards des batches...).

Contrôle des retards d'intermédiaires

Le temps total d'attente des intermédiaires réactionnels entre deux opérations de la recette est en général significatif de l'efficacité du système productif. De même, quand plusieurs intermédiaires entrent dans une même opération, la différence entre la date d'élaboration du premier et du dernier de ces intermédiaires est appelée 'retard de synchronisation'. Ces retards sont également caractéristiques du fonctionnement de l'atelier. On dispose de l'ensemble des résultats concernant ces retards, de synchronisation pour les recettes non linéaires ou simplement d'attente entre les opérations.

Ces résultats permettent d'identifier les opérations limitantes (générant des attentes), pour chacun des batches à réaliser au cours d'une campagne de production. Ils mettent également en évidence les éventuels problèmes de synchronisation d'intermédiaires réactionnels, si la recette de production suivie n'est pas linéaire. On peut ainsi évaluer les performances de production d'une campagne, au regard de l'importance des différents retards enregistrés.

Autres résultats disponibles

Résultats statistiques

Tous les autres objets du système productif sont également observés pendant le déroulement de la campagne. Ainsi, on dispose de statistiques de nature identique à celles détaillées précédemment, sur les stockages pour intermédiaires réactionnels ou les niveaux d'utilités.

Résultats graphiques divers

Pour chaque utilité, on dispose de deux figures représentant respectivement le suivi de son niveau et son taux de disponibilité au cours du temps de simulation. Un ensemble de graphiques représentatifs des niveaux de chacun des stocks de l'atelier tout au long de la simulation peut être également édité en sortie. On peut aussi disposer en sortie de simulation, des plannings de production (ou de réalisation), soit par équipement, soit par opérateur, sur lesquels est listée la suite des activités à effectuer pendant la campagne. Ces plannings sont extrêmement concis et explicites et permettent d'organiser facilement la production. A des dates spécifiées en entrée des données, le simulateur effectue des photographies de l'état instantané de l'atelier, que l'on peut consulter a posteriori pour des analyses diverses. Notons que le logiciel peut être relancé à partir d'un état d'en cours de la simulation précédente.

En conclusion, l'ensemble des résultats fournis par le modèle permet de décrire précisément le fonctionnement du système pendant la campagne, en caractérisant l'ensemble des éléments du système, des ressources aux produits.

LES UTILISATIONS POSSIBLES DU SIMULATEUR

Le simulateur est par définition un outil prédictif. Il peut néanmoins être utilisé de manières diverses, selon les besoins de la gestion de production.

Un outil prédictif d'aide à la production

Le logiciel peut être mis en oeuvre pour fixer des délais de production dans un contexte donné. Par exemple, on peut déterminer au préalable les dates d'achèvement de chacun des batches d'une campagne à réaliser, en effectuant une simulation. On peut ainsi visualiser le déroulement d'une campagne et détecter des mauvais fonctionnements, des lacunes de l'organisation de production (manque de matières premières, retards excessifs...), ou les goulets d'étranglement du système. Il peut également servir à la détermination de la capacité maximale de production d'un atelier donné.

Une aide directe à la production

Nous avons mentionné entre autres résultats, le diagramme de Gantt et les plannings de réalisation. Pour un système de production bien rodé, avec des règles de fonctionnement bien définies, et pour une durée de campagne spécifiée, le simulateur peut être une aide directe à la production, en éditant au préalable les listings détaillés des tâches à réaliser. Dans ce contexte, il devient alors l'organisateur réel de la production, qui propose les procédures à suivre pendant la campagne, en respectant les politiques imposées lors de l'entrée des données.

Réactions aux aléas de production

Dans le modèle, nous n'avons pas pris en compte les aléas de production, comme les pannes d'équipements par exemple. Le simulateur ne traite en effet que les événements du système prévisibles a priori. L'incidence d'un aléa sur la campagne et sur les délais de production en particulier, peut néanmoins être évaluée en utilisant le modèle de simulation et la notion d'état d'en cours de l'atelier.

Pour prendre en compte une panne d'équipement à une date donnée d , on procède alors comme suit: on lance une simulation avec une date d'en cours demandée à la date d . On élimine ensuite l'équipement en panne de l'architecture du système (on peut lui affecter une maintenance par exemple) puis on relance une nouvelle simulation à partir de l'état d'en cours précédent, pour obtenir une réactualisation du planning, qui tient compte à partir de la date d , de l'indisponibilité de l'équipement en panne.

On procède de façon analogue pour les aléas de commande. Chaque produit commandé en cours de campagne peut alors être intégré à la production totale initialement prévue, à partir de la date de sa commande, prise comme date d'en cours. Cette notion permet d'envisager des ordonnancements dynamiques, avec la prise en compte des produits au fur et à mesure de leur commande.

Une aide à la conception d'un atelier

Le simulateur peut être utilisé pour la conception d'un atelier discontinu de chimie. Sous une forme un peu agrégée (en conception, on ne prend pas en compte les activités des opérateurs ou les stockages pour intermédiaires), on peut ainsi évaluer les performances de production d'une configuration d'atelier envisagé, au niveau de la capacité de production notamment. L'utilisation du modèle de simulation permet ainsi d'étudier plusieurs architectures d'ateliers envisageables, afin de déterminer la plus favorable, au regard d'un critère de performance donné.

"Optimisation interactive"

Sous cette appellation un peu abusive, on désigne l'aptitude du simulateur à contribuer à la mise au point de paramètres de fonctionnement d'un système. Le logiciel permet d'évaluer l'impact de modifications des paramètres de fonctionnement sur les indicateurs de performance de production du système. On peut par exemple tester l'influence de l'ajout d'un équipement supplémentaire à un endroit donné de l'atelier, ou l'augmentation des capacités des stockages... On peut aussi l'utiliser pour déterminer les périodes de maintenance les moins pénalisantes pour le déroulement de la campagne ou les dates d'approvisionnements au plus tard, ne générant pas de retards de production. Nous présentons ci-après quelques applications possibles d'optimisation interactive.

Une fonction d'évaluation des performances de production

Le modèle de simulation peut être utilisé pour évaluer l'efficacité d'une configuration de production choisie, avec un critère (ou "fonction d'évaluation") de nature technique. Ce critère peut par exemple être la date d'achèvement de la campagne à réaliser, une fonction des temps de cycle des batches ou encore des retards de production par rapport à des dates d'attente spécifiées.

QUELQUES CONSIDERATIONS SUR L'EXEMPLE ETUDIE

L'aspect combinatoire du problème

L'ordonnement à court terme d'un atelier de taille réelle constitue évidemment un problème au caractère combinatoire très marqué. Nous illustrons cet aspect combinatoire, sur la figure 7, relative à l'exemple étudié. Dès la date initiale, pour un atelier vide et un ordre de lancement des produits laissé libre, 180 opérations sont en compétition pour le premier chargement. Une arborescence représentative de l'ensemble des combinaisons possibles pour l'ordonnement commencerait donc par 180 sommets. Par la suite, on peut observer 50, voire 100 événements envisageables à une même date (soit autant de noeuds possibles à développer).

Sur la figure 7, on peut remarquer qu'en dehors de la date initiale, la combinatoire la plus importante semble se situer au milieu de la campagne de simulation, c'est-à-dire lorsque le nombre de produits en cours dans l'atelier atteint son maximum.

L'énumération de toutes les combinaisons possibles pour ordonner cette seule production de 180 batches semble donc rédhibitoire. Dans cet exemple, nous avons effectué les choix à ces

différents instants déterminants en utilisant les heuristiques décrites en entrée des données, sachant que le fait de sélectionner et exécuter un événement à une date peut supprimer les conditions d'occurrence de nombreux autres à cette même date.

«Optimisation interactive» du fonctionnement

Nous avons présenté les utilisations possibles du simulateur pour des conditions opératoires fixées. Si ces dernières sont à déterminer ou susceptibles d'être modifiées, le simulateur peut alors permettre d'optimiser les paramètres de fonctionnement d'une campagne. De façon interactive, en évaluant au fur et à mesure l'impact sur l'efficacité de production des modifications effectuées, on peut ainsi mettre au point les conditions opératoires quasi-optimales (ou tout au moins favorables). Nous présentons ici quelques exemples qui illustrent cette démarche.

Nous avons donc effectué une nouvelle simulation de la campagne de production avec des ressources supposées illimitées, hormis équipements et récipients de stockage pour intermédiaires réactionnels. Les opérateurs, les utilités, les matières premières, les produits intermédiaires partagés, les stockages de sous-produits ne génèrent alors aucune contrainte, et aucun événement prédéterminé de maintenance ou de congé n'est prévu. La date d'achèvement de cette campagne est alors ramenée à 30115 unités de temps (contre 48600 dans le cas précédent). On étudie ensuite l'influence de chaque paramètre l'un à la suite de l'autre pour se ramener au fur et à mesure, aux contraintes réelles de production. Nous suggérons ici quelques utilisations du simulateur pour augmenter les performances de production d'une campagne.

L'affectation des dates de maintenance

Les opérations de maintenance sont affectées a posteriori, après une simulation préalable ne tenant pas compte de ces événements. En utilisant les diagrammes de Gantt relatifs aux équipements, on affecte les maintenances aux instants d'inactivité des équipements. Les actions de maintenance mobilisant souvent des opérateurs, on doit néanmoins vérifier la justesse des affectations par une nouvelle simulation. On réalise ainsi les événements prédéterminés contraignants pour la réalisation de la production, en ne pénalisant pas le déroulement de la campagne, puisque le temps de campagne obtenu reste égal à 30115 unités de temps.

Détermination des dates d'approvisionnements au plus tard

Supposons des matières premières en quantité non pas infinie, mais limitée à 2000 unités, et approvisionnées 2 fois. Le problème consiste à déterminer la date au plus tard du premier approvisionnement.

Pour cela, à chaque essai fixant une date d'approvisionnement, nous comptabilisons les refus d'opérations liés à l'indisponibilité des matières premières, au cours du temps de simulation.

Sur la figure 8, on présente le nombre des refus de chargement liés à l'indisponibilité des matières premières, pour un approvisionnement de 5000 unités de volume, fixé à la date 10080. Pour la configuration testée, 3500 chargements d'opération sont refusés et la date d'achèvement est alors repoussée à 34500 unités de temps (30115 sans contrainte sur les matières premières). Les refus commencent à partir de la date 3000 (quelques centaines de refus sont enregistrés); ils atteignent 3500, au moment de l'approvisionnement.

On effectue un nouvel essai avec cette fois le premier approvisionnement avancé à la date 3000. La figure 9 présente la nouvelle courbe de refus obtenue, avec seulement 42 refus enregistrés et une date d'achèvement à 30500 unités de temps.

On peut réaliser de cette façon autant d'essais que nécessaires, pour obtenir le meilleur compromis entre les contraintes techniques de production et certaines contraintes extérieures, souvent de nature économique.

Détermination des dates de départ "hors-site"

On souhaite réaliser un départ hors-site unique pendant la campagne, avec une capacité des stockages pour produits non recyclés limitée à 2500 unités de volume. Le critère technique utilisé pour tester les différents essais envisagés est encore le nombre de refus de chargements, lié dans ce cas à l'indisponibilité des stockages de PNR. On effectue un essai de départ hors-site à la date 20160. Les résultats concernant les refus et le suivi du stock du PNR1 sont représentés sur les figures 10 et 11.

On observe immédiatement 2 phénomènes. Tout d'abord, le départ hors-site est tardif: le stock de PNR1 est totalement rempli environ à la date 5000 et on enregistre des refus jusqu'à la vidange du stock à la date 20160 (plus de 13000 refus). D'autre part, il apparaît qu'une vidange unique du stock de PNR1 est insuffisante puisqu'il est à nouveau rempli, après la vidange, et que l'ensemble des opérations restantes, générant ce sous-produit, ne pourront être réalisées. On peut conclure que deux départs hors-site seront nécessaires et essayer d'optimiser "interactivement" ces deux départs pour minimiser le nombre de refus liés à cette contrainte de stockage.

Optimisation du nombre et de la qualité des ressources

Grâce au simulateur, on peut envisager de tester l'impact de modifications du nombre de ressources, pour augmenter les performances de production notamment (ajout d'un équipement, d'un opérateur, augmentation des niveaux d'utilités...). Certes, le simulateur ne fournit que des résultats techniques sur l'impact des essais envisagés et n'intègre pas de critères économiques. La figure 12 présente les refus d'événements liés à la disponibilité des ressources, avec dans un

premier temps 4 opérateurs chacun avec une zone d'habilitation, puis dans un deuxième temps, avec 4 opérateurs polyvalents sur les quatre zones de l'atelier. Ces refus concernent tout autant des chargements d'opérations que des déchargements, des nettoyages ou des maintenances, c'est-à-dire tous les événements nécessitant l'intervention d'un opérateur au moins.

Le nombre de refus est très largement inférieur dans le cas d'une polyvalence accrue du personnel, qui se suppléent mutuellement en cas de besoin. On note avec les quatre opérateurs polyvalents, deux périodes d'insuffisance, aux environs des dates 7000 et 21000, alors que dans le premier cas, l'insuffisance des ressources "opérateur" est manifeste tout au long de la simulation. Ces résultats techniques pour prévisibles qu'ils soient, peuvent cependant permettre de quantifier le gain de productivité obtenu par l'accroissement de la polyvalence des opérateurs. Notons que la décision d'augmenter ou non la polyvalence des opérateurs étudiés dépendra évidemment d'autres critères, comme le coût nécessaire à la formation de ces opérateurs par exemple.

On pourrait tout autant évaluer les modifications de performances de production liées à l'implantation d'équipements nouveaux, aux endroits stratégiques, ou à l'augmentation du niveau de disponibilité des utilités, ou encore à la capacité d'accueil des stocks tampons pour intermédiaires réactionnels.

Nous avons abordé possibilités d'optimisation interactive d'une campagne de production. Sous cet aspect, le simulateur est un véritable système interactif d'aide à la décision (S.I.A.D), en permettant l'évaluation technique de l'impact de modifications simulées de certains paramètres de production.

CONCLUSIONS

Ce travail nous a amené à utiliser des concepts de productique pour résoudre un problème complexe d'ordonnancement rencontré en génie des procédés. Au terme de cette étude, le prototype développé permet d'appréhender avec précision le déroulement d'une campagne de production dans un atelier discontinu de chimie fine. Nous avons souhaité un degré de détail important, pour conserver un caractère assez général et pour se rapprocher le plus possible du fonctionnement réel d'un atelier. Le modèle de simulation développé n'est cependant pas figé, mais susceptible de s'adapter à des contextes de production particuliers, notamment au niveau des règles de gestion des conflits.

Il est apparu que les impondérables de production ne peuvent être considérés de façon générale, mais doivent être intégrés au cas par cas du site considéré, pour une utilisation performante du simulateur. Le couplage de l'outil développé avec un logiciel de suivi de production, avec une assimilation permanente des données instantanées du système (concernant notamment l'occurrence des pannes d'équipements), permettrait une utilisation du simulateur en temps réel, avec une réactualisation des plannings en fonction des aléas de production les plus importants.

Enfin, nous avons montré comment le simulateur pouvait être utilisable de différentes façons selon les besoins de l'organisation, comme un outil prédictif d'aide à la production ou un système interactif d'aide à la décision (S.I.A.D).

Nomenclature

MP : Matière première

PF : Produit final

PIP : Produit intermédiaire partagé

PNR : Produit non recyclé sur le site

PR : Produit recyclé

Vr : Volume réservé de matière première

Eq : Equipement

Références

Baudet P. , Thèse de doctorat INPT- 7 Janvier 1997, *Ordonnancement à court terme d'un atelier discontinu de chimie; cas du fonctionnement job-shop.*

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).

Zararé P. , Thèse de doctorat, U.E.R Sciences des organisations, Paris IX Dauphine, 1991, *Conception et mise en œuvre de systèmes interactifs d'aide à la décision: application à l'élaboration des plannings de repos du personnel naviguant.*

Liste des figures

- Figure 1:** Schéma fonctionnel de l'atelier
- Figure 2:** Représentation graphique de la recette du PF5
- Figure 3:** Temps de cycle des batches de produits finaux 1 à 3
- Figure 4:** Divers résultats concernant les équipements
- Figure 5:** Statistiques sur les interventions des opérateurs
- Figure 6:** Suivi du niveau de rejet
- Figure 7:** Nombre d'événements conditionnels à chaque date de la campagne simulée
- Figure 8:** Suivi des refus au cours du temps (cas1)
- Figure 9:** Suivi des refus au cours du temps (cas2)
- Figure 10:** Suivi des refus de chargement liés à l'indisponibilité des stockages de PNR
- Figure 11:** Suivi du niveau du bac de stockage pour PNR1
- Figure 12:** Etude de l'impact de la polyvalence des opérateurs

Liste des tableaux

Tableau 1:	Données de définition des équipements de l'atelier
Tableau 2:	Données de définition des stockages pour intermédiaires réactionnels
Tableau 3:	Habilitation et congés des opérateurs
Tableau 4:	Départs « hors site » des PNR
Tableau 5:	Recette du PF 5 ; Opérations 1 à 6
Tableau 6:	Recette du PF 5 ; Opérations 6 à 9
Tableau 7:	Production souhaitée en produits finaux
Tableau 8:	Production souhaitée en produits intermédiaires partagés
Tableau 9:	Conditions générales de la simulation
Tableau 10:	Ordre de priorité entre types d'événements
Tableau 11:	Heuristiques appliquées pour gérer les conflits
Tableau 12:	Recyclages programmés pendant la campagne
Tableau 13:	Résultats sur l'élaboration des batches de PF
Tableau 10:	Résultats relatifs à l'élaboration du batch N°45

