

UN MODELE DE SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS POUR LA GESTION DE PRODUCTION D'UN ATELIER DE CHIMIE FINE

A DISCRETE EVENT SIMULATION MODEL FOR BATCH CHEMICAL PLANT SCHEDULING

P. Baudet, C. Azzaro-Pantel, S. Domenech, L. Pibouleau

Laboratoire de Génie Chimique - URA 192 du CNRS
ENSIGC INPT

18, Chemin de la Loge - 31078 Toulouse Cedex - FRANCE
Tel: 62 25 23 00 Fax : 62 25 23 18

Résumé : La résolution des problèmes d'ordonnancement des ateliers discontinus de chimie et de ses contraintes spécifiques a été peu abordée par la simulation à événements discrets. Notre étude décrit la modélisation du comportement dynamique d'un tel atelier utilisant ce type de formalisation, avec une approche par événements, très souple pour la description des caractéristiques et contraintes inhérentes à ces ateliers.

Abstract : Simulation models are scarcely used to solve batch chemical plant scheduling problems. Our study describes a discrete event simulation model, built on an event approach, to represent the dynamic behavior of a batch chemical plant during a production campaign. With this formalism, which allows a high description level, specific characteristics and constraints of batch chemical plants are taken into account.

1. Position du problème Les systèmes industriels de chimie fine sont très flexibles pour l'élaboration dans des ateliers multiproduits-multitâches de produits de natures diverses, en quantités variables selon les besoins du marché. L'organisation d'une campagne de production sur ces sites "job-shop" est très complexe (affectation convenable des ressources aux tâches), très contrainte (manipulations de produits liquides, volumineux, parfois réactifs ou dégradables, qui induisent des contraintes de production spécifiques) et nécessite l'utilisation d'outils d'aide à la production et à la décision spécifiques.

Dans le domaine de la chimie fine, les problèmes d'ordonnancement sont le plus souvent abordés par des méthodes utilisant la programmation en variables mixtes, linéaire ou non (Mixed Integer Linear Programming, Mixed Integer Non Linear Programming, [Birewar 89], [Sahidin 91]). L'analyse de la bibliographie montre que ces méthodes s'avèrent difficiles à mettre en oeuvre pour atteindre un niveau de description assez fin et pour des problèmes de taille réelle, au caractère combinatoire très marqué, c'est pourquoi nous avons utilisé une approche différente décomposant le problème général de l'ordonnancement en deux parties.

La première est une phase de modélisation utilisant la simulation par événements discrets, qui présente une plus grande souplesse dans les possibilités de description des caractéristiques et contraintes spécifiques au domaine chimique. Dans la seconde phase, le modèle développé est couplé à un algorithme génétique, particulièrement adapté à la résolution de problèmes combinatoires, afin de satisfaire un critère d'optimisation donné (temps de cycle moyen des produits, respect des dates d'attente,...).

Nous consacrerons cet article à la première partie de notre approche, c'est à dire à la représentation du comportement dynamique d'un site de production discontinu dans le domaine de la chimie par un modèle de simulation à événements discrets utilisant une approche par événements.

2. Formulation du modèle de simulation

Cette modélisation consiste en une représentation logico-mathématique des éléments du système et des relations existant entre ces éléments. Le comportement dynamique du système est ensuite modélisé par l'évolution interdépendante de ces divers éléments au cours du temps. Dans une approche par événements, on décrit complètement le fonctionnement du système à travers les

événements qui s'y produisent au cours d'une campagne de production, en s'attachant aux conditions d'occurrence et aux conséquences de l'occurrence de ces événements. Une analyse détaillée du fonctionnement d'un atelier discontinu de chimie permet d'inventorier les différents événements occurrents sur le site (ayant une influence sur les performances de production). On prend également en compte les différents éléments impliqués dans les événements répertoriés et les différents types de contraintes liées à la production. Deux types d'événements sont occurrents sur le site, conditionnel et prédéterminé. Un événement conditionnel est caractérisé par un ensemble de conditions d'occurrence (relatives aux éléments impliqués dans l'événement) qui doivent être simultanément satisfaites pour que l'événement puisse avoir lieu. Un événement prédéterminé n'a aucune condition d'occurrence et est exécuté à une date prédéfinie. Conditionnel ou non, un événement occurrent induit des modifications sur le système, soit des modifications immédiates sur l'état des éléments concernés, soit la génération de nouveaux événements prédéterminés. Ces événements prédéterminés induits sont conservés et classés dans un échéancier, l'horloge de la simulation. A une date donnée, le modèle exécute les événements conditionnels dont les conditions d'occurrence sont satisfaites, puis recherche dans la pile d'événements prédéterminés celui dont la date d'occurrence est minimale. Il exécute cet événement prédéterminé et la logique de changement d'état associée, actualise la date courante à la date d'occurrence de l'événement prédéterminé et recherche les nouveaux événements conditionnels rendus possibles... Ainsi le modèle évolue de façon itérative, d'une date d'événement à la suivante, jusqu'à la fin de la simulation. Dans notre modèle, sept événements conditionnels présentés dans la suite de l'article ont été répertoriés sur un site de production discontinu de chimie, les autres événements étant prédéterminés.

2.a Les machines à états

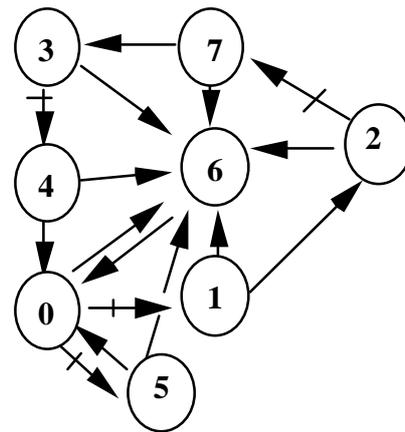
Les éléments du système pris en considération sont modélisés comme des machines à états. Cette représentation des éléments consiste à inventorier les états considérés pour l'élément (chaque état étant représenté par un cercle) et à répertorier chaque transition possible entre chacun des états (représentée par une flèche dans le sens du passage d'un état à un autre). Les transitions autorisées sont conditionnelles (c.a.d correspondant à un événement conditionnel) si la flèche liant les deux états successifs est coupée d'un segment, sinon, la transition de l'état courant au suivant après un temps déterminé, est sans conditions.

On schématise ainsi l'ensemble des états et toutes les transitions possibles entre les états pour chaque type d'élément modélisé. Chaque machine à états

sera alors représentée par un attribut variable dans le temps: son état (qui peut évoluer sous certaines conditions dans le sens des transitions autorisées) et par un ensemble d'attributs fixes qui représentent les caractéristiques physiques et/ou contraintes de l'élément modélisé. Les équipements, les bacs de stockage pour intermédiaires réactionnels, les opérateurs et les produits sont modélisés de cette façon.

2.a.1 La machine à états "équipement"

On a répertorié huit états possibles pour l'équipement, présentés sur le graphe de la figure 1.



Etats de l'équipement :

- | | |
|------------------|----------------------------|
| 0 : Libre-propre | 1 : En cours de traitement |
| 2 : Alarme fin | 3 : Libre sale |
| 4 : En nettoyage | 5 : En maintenance |
| 6 : En panne | 7 : En sortie de produits |

Fig.1 : Machine à états "équipement"

Seize transitions sont possibles, dont seulement quatre sont conditionnelles et constituent quatre des événements très importants du modèle de simulation: l'événement "chargement d'une opération dans un équipement" (transition 0-1), "sortie des produits de l'équipement" (transition 2-7), et les "nettoyage" et "maintenance" des équipements (transitions 3-4 et 0-5).

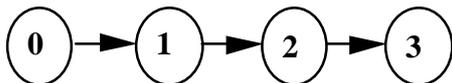
Un binaire représente également l'état de réservation de l'équipement. En effet, la présence d'intermédiaires instables implique la réservation de séquences entières de fabrication (réservation des équipements et des opérateurs nécessaires à l'exécution de la séquence). Un équipement réservé ne pourra pas être utilisé tant que la séquence qui lui est affectée n'aura pas été exécutée (et sa réservation annulée). Notons que la panne n'est en l'état actuel du modèle qu'un événement prédéterminé, prévu tant en date qu'en durée dans un calendrier de panne. A une date prédéterminée, l'équipement devient "en panne", quel que soit son état, et ce, pendant une durée d'indisponibilité prévue (si l'équipement était en cours de traitement d'une opération au moment du déclenchement de la

panne, le produit est perdu). Le retour en service de l'équipement se fait à l'état "libre-propre", quel que soit l'état de l'équipement au moment du déclenchement de la panne. Le modèle a été conçu de façon à pouvoir introduire des données statistiques sur les pannes (MTBF par exemple) et considérer la panne comme un événement conditionnel, avec des conditions d'occurrence qui dépendront de probabilités de panne... La maintenance des équipements est également prévue dans un calendrier spécifique où l'on note, pour chaque arrêt de maintenance demandé, la durée de l'arrêt et le nombre d'opérateurs mobilisés.

Les attributs fixes représentant les caractéristiques physiques de l'équipement sont la zone d'appartenance, la capacité maximale ainsi que les température et pression maximales admissibles. Une opération prévue à une température ou une pression supérieure à la limite sera irréalisable sur l'équipement. Dans le cas d'une capacité de l'équipement inférieure au volume réactionnel, l'opération sera selon le cas, abandonnée sur l'équipement ou réalisée en plusieurs passes.

2.a.2 La machine à états "produit"

La machine à états "produit" prend en compte l'état global d'avancement du produit, la description de l'état des opérations nécessaires à sa fabrication, et la description des intermédiaires réactionnels du procédé d'élaboration. L'état global d'avancement du produit, représenté sur la figure 2, montre quatre états successifs avec un sens de progression unique et irréversible de l'état initial "à venir" au stade final "terminé".



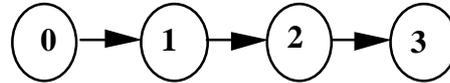
Etats du produit :

- | | |
|--------------|----------------|
| 0 : A venir | 1 : En attente |
| 2 : En cours | 3 : Terminé |

Fig.2 : Machine à états "produit global "

Les transitions entre états sont toutes consécutives à l'occurrence d'autres événements (ayant trait à l'équipement, chargement et fin de traitement notamment). L'état "à venir" est important dans le cas d'un ordre de lancement obligatoire (choisi par l'utilisateur) des produits dans l'atelier. Un produit ne deviendra "en attente" que lorsque le précédent dans la liste ordonnée des produits sera "en cours" (si l'ordre de lancement des produits est spécifié). Un produit "en attente" deviendra "en cours" dès qu'une des opérations de son procédé de fabrication aura débuté, et sera "terminé", dès la fin du temps de traitement de sa dernière opération.

La description d'une opération est rigoureusement identique à celle du produit envisagé globalement (fig.3). L'état "à venir" représente les opérations des produits dans l'état "à venir" mais aussi toutes les opérations des produits "en attente" ou "en cours" pour lesquelles au moins un des intermédiaires réactionnels entrants n'a pas encore été élaboré.

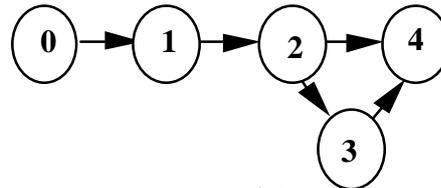


Etats de l'opération :

- | | |
|--------------|----------------|
| 0 : A venir | 1 : En attente |
| 2 : En cours | 3 : Terminé |

Fig.3 : Machine à états "opération des produits "

Le graphe d'états des intermédiaires réactionnels (fig.4) prend en compte le fait que ceux-ci peuvent être stockés ou non dans des bacs réservés à cet effet (si leur spécification de stockage le permet et selon le déroulement de la production). Toutes les transitions entre états de ce graphe ne sont que des changements logiques associés à l'occurrence d'autres événements conditionnels.



Etats de l'intermédiaire :

- | | |
|-------------|--------------|
| 0 : A venir | 1 : En cours |
| 2 : Fait | 3 : Stocké |
| 4 : Utilisé | |

Fig.4: Machine à états "intermédiaire réactionnel "

Quand l'état d'une opération devient "terminé", l'état de l'intermédiaire associé (si l'opération n'est pas la dernière) devient "fait". Ensuite, au moment de la sortie des produits de l'équipement, l'intermédiaire peut être stocké (état "stocké") dans un bac de stockage ou directement réutilisé (état "utilisé") pour l'opération suivante du produit.

Ce niveau de description suffirait à la modélisation grossière d'une campagne de production, où il s'agirait de faire passer l'ensemble des produits de l'état "à venir" à l'état final "terminé" en utilisant les ressources équipements (c.a.d en respectant les transitions entre états possibles de ces éléments). Nous avons choisi de modéliser les opérateurs qui sont rarement considérés dans les études d'ordonnancement, bien qu'ils soient souvent des ressources critiques) ainsi que les bacs de stockages pour intermédiaires réactionnels. En

effet, les problèmes de stockage, très fréquents dans le domaine de la chimie induisent des retards du fait du nombre et de la capacité limitée des bacs de stockage. De plus, la présence d'intermédiaires réactionnels instables ou stables pendant une durée limitée peut imposer des contraintes temporelles très gênantes.

2.a.3 La machine à états "bac de stockage"

Les bacs de stockage ont été considérés et leur graphe représentatif est donné sur la figure 5.

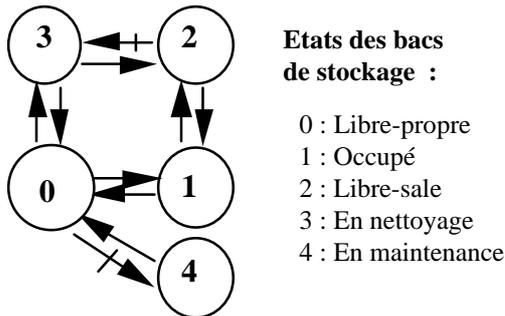


Fig.5 : Machine à états "bac de stockage"

Cinq états possibles ont été inventoriés pour les bacs de stockage. Les événements "nettoyage" (transition 2-3) et "maintenance" (transition 0-4) sont deux événements conditionnels associés aux bacs de stockage. Toutes les autres transitions sont des événements prédéterminés ou des changements d'états immédiats liés à l'occurrence d'un autre événement. Les attributs fixes associés aux bacs concernent leur zone d'appartenance (nous avons choisi de répartir les bacs de stockage pour intermédiaires par zones, comme les équipements), leur capacité maximale et leur type. Différents types de bacs sont effectivement rencontrés sur site (acier, verre, polyéthylène,...), selon les spécifications de stockage des intermédiaires. Pour limiter les besoins (déjà importants) de données nécessaires à la simulation, nous avons considéré le temps de nettoyage et le besoin en main d'oeuvre requis pour cette tâche, indépendants de l'intermédiaire précédemment stocké. Le temps et le nombre d'opérateurs nécessaires pour le nettoyage sont donc deux attributs fixes supplémentaires de la machine à états "bacs de stockage".

2.a.4 La machine à états "opérateur"

La machine à états opérateur (fig.6) présente quatre états différents et six transitions possibles entre états.

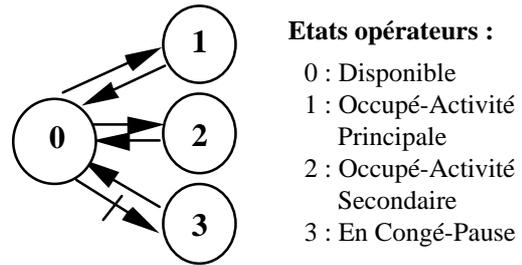


Fig.6 : Machine à états "opérateur"

Dans le sens du retour à l'état "disponible", les événements sont prédéterminés. Les événements conduisant l'opérateur vers un état d'activité sont simplement des changements d'états logiques liés à l'occurrence d'autres événements. Le départ "en congé" d'un opérateur est conditionnel. Les événements conduisant l'opérateur soit vers un état d'activité, soit en congé sont des événements de durée fixée (un opérateur s'engage, sous conditions, dans une activité donnée pour une durée déterminée). Un binaire est également utilisé pour caractériser l'état de réservation des opérateurs. Un opérateur réservé ne pourra effectuer une activité que si sa date de libération est inférieure à sa date de réservation. Nous avons pris soin de séparer les activités de l'opérateur concernant une intervention sur des équipements (dites principales) de celles ayant trait aux bacs de stockage (dites secondaires). Les arrêts "congé-pause" des opérateurs sont prévus dans un calendrier spécifique, où l'on note la date et la durée de l'arrêt demandé. Un seul attribut fixe concernant le degré de polyvalence sur une, plusieurs ou toutes les zones de l'atelier a été affecté à l'opérateur. Un opérateur habilité à intervenir dans une zone pourra y effectuer toute intervention demandée, c'est à dire que l'on ne considère une affectation du travail de l'opérateur, ni par équipements, ni par activités (pas de séparation opérateurs de production-opérateurs de maintenance par exemple).

2.b Autres ressources; autres contraintes

Les quatre types d'éléments considérés nous semblent les plus importants pour la description du comportement dynamique d'un atelier discontinu de chimie. La modélisation complète et réaliste du système suppose néanmoins la prise en compte d'autres ressources et contraintes que nous allons détailler.

Les matières premières (MP) sont des ressources consommables utilisées comme réactifs d'une opération. Elles peuvent être négligées si la quantité en stock est toujours largement suffisante pour assurer la production souhaitée. Souvent, pour des productions importantes, et pour des horizons de simulation assez grands, les matières premières peuvent être des ressources limitantes entre deux approvisionnements et doivent alors être considérées dans la modélisation du système. Les

MP seront alors caractérisées par leur volume disponible et leur(s) approvisionnement(s) prévu(s) dans un calendrier spécifique. Les MP sont stables et stockées hors-zone dans des bacs de stockage spécifiques supposés de capacité illimitée (ce qui permet d'envisager les approvisionnements sans contraintes de place).

Les produits finaux (PF) sont la base de la modélisation et de toute cette étude. Ce sont les produits que l'on souhaite élaborer avec la meilleure gestion de production possible. Chaque produit final est caractérisé par son volume en stock, sa recette de fabrication (caractérisant la succession des opérations d'élaboration du produit) et sa quantité demandée. Cette quantité à élaborer sera réalisée en certain nombre de lots que l'usage désigne sous le nom anglo-saxon de "batches". Les volumes des batches, non nécessairement identiques, sont spécifiés par l'utilisateur. Les PF sont stables, stockés en sortie d'atelier dans des bacs de stockage spécifiques de capacité supposée illimitée.

Le produit intermédiaire partagé (PIP) est un produit mixte, à la fois réactif et produit final que l'on rencontre parfois sur site. C'est le cas de produits élaborés dont une partie est directement valorisable et dont une autre est réutilisée pour former un produit de plus haute valeur ajoutée. C'est également le cas d'intermédiaires communs à plusieurs recettes différentes. Le PIP est donc un produit de type intermédiaire entre MP et PF. Il est MP dans le sens où il entre comme réactif dans la recette d'élaboration de produits finaux. Il est stocké hors-zone dans des stocks de capacité supposée illimitée et peut être reçu par approvisionnements, prévus dans un calendrier spécifique. Il est PF dans le sens où il est élaboré par batches et suivant sa propre recette de fabrication. Chaque PIP est donc défini par son volume en stock, ses approvisionnements prévus (comme une MP), par sa recette de fabrication et sa production souhaitée pendant la campagne (comme un PF).

Nous avons envisagé deux types de sous-produits, les produits non recyclés sur site (PNR) et les produits à recycler sur site (PAR). Les PNR sont stables et stockés dans des stocks de capacité limitée en attendant des départs hors-site prévus dans un calendrier préétabli. Chaque PNR répertorié est alors caractérisé par un volume en stock et une capacité maximale de stockage. La contrainte liée au PNR prendra effet quand la quantité en stock atteindra la capacité maximale possible, ce qui pourra interdire le chargement de toute opération générant ce sous-produit. Les PAR sont considérés seulement s'ils sont traités sur site, pendant la campagne de production simulée et en utilisant les mêmes ressources que la production principale. Les PAR sont définis par un volume en stock, une capacité maximale de stockage, et une recette de recyclage, de même type que les recettes

de PF et de PIP. Pour ces recyclages, on doit choisir un volume de batch et un mode de recyclage qui peut être minimum ou maximum compte tenu des capacités de stockage (on stocke au maximum ou on recycle au maximum les PAR). Les PAR sont stables et stockés hors-zone dans des bacs de capacité limitée.

L'intermédiaire réactionnel (PI) d'une recette relative à un PF, un PIP ou un PAR est le produit principal sortant d'une opération (si l'opération n'est pas la dernière de la recette) qui sera intégralement utilisé lors d'une opération suivante de la recette. Notons que les recettes ne sont pas forcément "linéaires" et que plusieurs intermédiaires peuvent entrer dans une même opération (opération "multi-entrées"). Comme nous l'avons vu lors de la définition de la machine à états "bac de stockage pour intermédiaires", un intermédiaire réactionnel peut être stable, instable ou stable pendant une durée limitée. Si un PI est instable, l'opération dans laquelle il entre comme réactif doit débiter immédiatement. Au contraire, pour un PI stable en temps limité, on peut attendre la libération d'un équipement pendant une certaine durée limitée. Les PI stables sont stockables dans un ou plusieurs bacs, sans contrainte temporelle mais des spécifications de type sont possibles (les PI peuvent avoir un matériau de stockage obligatoire ou préférable).

Les utilités sont des ressources renouvelables utilisées en quantité discrète pendant une durée déterminée par tous les équipements de l'atelier, sans distinction de zones, pour la réalisation d'une opération. Une utilité est représentée par un niveau de disponibilité qui sera une condition d'occurrence de l'événement "chargement d'une opération".

2.c Définition des recettes et des batches

La recette, attribut fixe de la machine à états "produit", est le terme approprié à la définition de la succession des opérations dans l'élaboration d'un produit. Elle est entièrement définie à partir d'un volume de référence à produire ou à recycler. On définit la succession des opérations de la recette comme suit. Pour chaque opération, le volume réactionnel est établi en pourcentage du volume de référence. On définit également la température et la pression réactionnelles. Les règles de précedence entre opérations sont formalisées par l'identification de l'opération dans laquelle entrera comme réactif le PI sortant de l'opération courante. Le ou les équipements requis pour réaliser une opération sont identifiés ainsi que tous les réactifs entrants et les produits sortants. Plusieurs équipements possibles pour réaliser une même opération sont dits "en parallèle". Les volumes des réactifs entrants et des produits sortants sont donnés en pourcentage par rapport au volume réactionnel. Les différents temps (temps d'entrée des réactifs, temps opératoire, temps de sortie des produits, temps de nettoyage

des équipements possibles après l'opération) et les besoins en utilités de chaque équipement sont fixés ou exprimés en fonction du volume, de la température et de la pression réactionnels. Les besoins en opérateurs pour les tâches élémentaires associées aux opérations (entrée des réactifs, sortie des produits, nettoyage de l'équipement) sont aussi définis dans la recette. On spécifie de cette façon l'ensemble des recettes de l'atelier, pour la production des PF ou des PIP ou pour le recyclage des PAR.

Des tests de cohérence sur les données d'entrée sont effectués tout au long de la définition des recettes, en particulier sur les précédences entre opérations et les volumes réactionnels.

Le module d'entrée des données requiert également la définition de la production souhaitée et du mode de recyclage choisi. Pour la production, on identifie les batches souhaités avec le volume à produire par batch, c'est à dire le volume de référence dans la définition des recettes. Le programme procède alors à un traitement complet des données d'entrée pour effectuer les tâches suivantes.

- Un bilan matière tenant compte de la définition de la production souhaitée en PF et PIP, pour le calcul du nombre de batches de recyclage nécessaires pour chaque PAR.
- Un calcul des valeurs réelles des différentes fonctions temps (temps d'entrée des réactifs, de sortie des produits, temps opératoire et temps de nettoyage des équipements) et des différents besoins en utilités.
- Une détection des équipements dont les conditions de fonctionnement rendent leur utilisation impossible pour une opération, et une identification des opérations non réalisables en une seule passe.

3. Exécution de la simulation; gestion des conflits; ordre de lancement des produits

Le moteur de simulation entraîne la progression du système, d'événements en événements. Toutefois, le passage d'un événement à un autre implique souvent des règlements de conflits. La prise de décision et le choix d'une alternative peuvent s'avérer être déterminants dans le déroulement des opérations futures. Quel équipement choisir si plusieurs équipements sont disponibles pour réaliser une opération ? Quelle opération choisir pour charger un équipement qui vient de se libérer parmi plusieurs opérations en attente de cet équipement ? Quel(s) stock(s) choisir pour un intermédiaire si plusieurs sont possibles ? A quel équipement ou à quelle opération doit-on affecter en priorité les utilités et à quelles tâches doit-on affecter en priorité les opérateurs ? etc... Pour résoudre ce type de conflits, nous avons implanté une base de règles heuristiques (F.I.F.O., S.P.T., E.D.D., etc...) représentative des politiques de fonctionnement les plus usitées sur site. De plus, l'ordre d'exécution des événements conditionnels

possibles (c'est à dire dont toutes les conditions d'occurrence sont satisfaites) est d'une grande importance puisque le fait d'exécuter un événement en lui allouant les ressources nécessaires peut supprimer la possibilité d'occurrence de certains autres. Enfin, l'ordre de lancement des produits dans l'atelier est aussi d'une grande importance sur les performances de production et les produits à élaborer pendant la campagne peuvent être lancés en production dans un ordre fixé, choisi par l'utilisateur. Si l'ordre de lancement des produits n'est pas prédéfini par l'utilisateur, toutes les opérations de tous les produits sans PI entrants sont mis "en attente" devant les équipements susceptibles de les réaliser et c'est l'application des heuristiques locales devant les équipements qui déterminera l'ordre de lancement réel des produits. Dans ce travail, on traite d'abord, les événements de maintenance, puis ceux concernant les équipements (entrée/sortie des réactifs et des produits, nettoyage des équipements), et enfin tous les autres. Les heuristiques utilisées dans notre étude sont les suivantes: Pour le choix des opérateurs, on choisira en priorité le dernier libéré habilité à intervenir. Pour les équipements, l'équipement choisi parmi plusieurs possibles sera également le dernier libéré, pour maximiser leur taux d'utilisation. Pour les bacs de stockage d'intermédiaires, on choisira le bac, de type autorisé, dont la capacité est la plus proche du volume à stocker. Ainsi, on minimise le nombre de bacs utilisés et la place perdue pour un stockage. Enfin pour les produits, on établit un ordre de priorité qui règle les conflits dans les files d'attente devant les équipements en donnant la priorité aux batches de PIP, devant les batches de PF puis de PAR. L'ordre de lancement des produits sera déterminé par l'application des heuristiques sélectionnées aux premières opérations de chacun des produits à élaborer. Notons que cet ensemble de choix est arbitraire et ne garantit pas l'optimalité dans la gestion de production. L'ordre de lancement des produits, la politique de gestion des conflits et le choix dans l'ordre d'exécution des événements conditionnels possibles à une date donnée sont déterminants pour une bonne gestion de production et seront donc les paramètres à étudier pour une optimisation globale du modèle.

4. Exemple de simulation

L'atelier de production, représenté sur la figure 7 est divisé en quatre zones dont les numéros sont indiqués entre parenthèses.

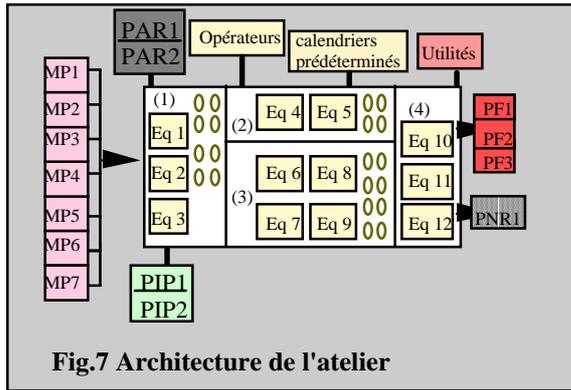


Fig.7 Architecture de l'atelier

Au total, l'atelier est composé de douze équipements et vingt stocks (schématisés par les petits cercles sur la figure 7). Cinq opérateurs sont disponibles, avec une seule zone d'intervention pour chacun. Ce système productif élabore trois types de produits finaux différents appelés ici PF1, PF2 et PF3. Globalement, cette production nécessite sept MP, deux PIP (à la fois reçus par approvisionnement et produits in situ) et génère trois sortes de sous-produits, deux PAR recyclés in situ et un PNR stocké en attendant un départ hors-site. Au total, sept types de recettes se partagent l'intégralité des ressources. Pour la brièveté de l'exposé, nous ne décrivons ici que la recette du PF1, chacune des six autres recettes devant en pratique être décrite de manière analogue. La figure 8 décrit la succession des opérations de la recette et le tableau 1 présente les données supplémentaires nécessaires au modèle.

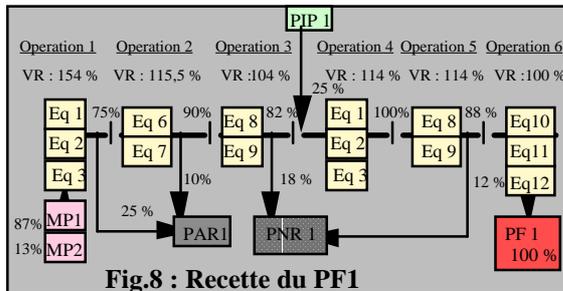


Fig.8 : Recette du PF1

Opérations	1	2	3			
Equipements	1 2 3	6 7	8 9			
Durée (en unités de temps):						
Entrée des réactifs	5 5 7	6 6 11 12	18 21			
Sortie produits	10 10 18	11 12 18 21	14 14			
Nettoyage	12 12 23	21 18 14 14				
opérateur	120 120 115 85	101 242 250				
Besoins en opérateurs						
Entrée des réactifs	2 2 2	1 1 1 1	1 1 1 1			
Sortie produits	2 2 2	1 1 1 1	1 1 1 1			
Nettoyage	2 2 2	1 1 1 1				
Besoins en utilité	200 200 220	120 130 180 180				
Opérations	4	5	6			
Equipements	1 2 3	8 9 10 11 12				
Durée (en unités de temps):						
Entrée des réactifs	19 17 16 7	7 12 12 12				

Sortie produits	21	24	22	11	10	12	12	12
Nettoyage	27	29	29	17	17	11	11	11
opérateur	180	180	180	150	155	15	15	15
Besoins en opérateurs								
Entrée des réactifs	2	2	2	1	1	1	1	1
Sortie produits	2	2	2	1	1	1	1	1
Nettoyage	2	2	2	1	1	1	1	1
Besoins en utilité	98	98	102	120	120	0	0	0

Tab.1: Données définissant la recette de PF1

Etat initial de l'atelier : vide.

Durée de la simulation : 10.080 unités de temps (1 semaine si l'unité est la minute).

Capacité des stocks hors-zone : 10.000 unités de volume.

On supposera dans cette simulation que tous les intermédiaires réactionnels sont stables, sans spécification de stockage. Les opérateurs sont disponibles pendant toute la durée de la simulation et aucune opération de maintenance n'est prévue. La préparation des données de la simulation consiste d'abord en un bilan matière global pour tester la faisabilité de la production, notamment la disponibilité en MP et en PIP et pour calculer le nombre de batches de recyclage nécessaires. Ici, neuf batches de recyclage sont programmés pour le PAR1 et sept pour le PAR2. D'autre part, une analyse globale des batches permet de détecter et de supprimer les équipements inadaptés à la recette. Au total, cinquante-cinq batches (dont seulement trente de PF) se partageront les ressources de l'atelier pendant la campagne simulée.

5. Résultats de la simulation

Le modèle de simulation fournit un nombre important de résultats relatifs aux :

- temps de cycle des batches,
- dates de sortie des produits de l'atelier,
- temps total d'attente des produits finaux, qui comprend le temps passé en file d'attente devant les équipements, augmenté du temps total d'attente de synchronisation (le temps d'attente de synchronisation est le temps qui sépare la fin d'élaboration du premier et du dernier des PI entrants dans une opération où plusieurs intermédiaires entrent comme réactifs).

Un exemple de ces résultats est donné pour le batch de PF n° 13 (tableau 2). Chaque batch peut également être décrit opération par opération du stade initial à sa sortie de l'atelier. L'évolution des encours au cours du temps peut également être suivie par visualisation graphique. L'activité des machines à états du modèle (opérateurs, équipements et stocks pour PI) est rendue sous forme statistique (taux d'utilisation, de famine ...). Un diagramme de Gantt permet d'avoir une vue

d'ensemble du déroulement de la campagne de production en représentant sur le même graphe, équipements et produits. Enfin, pour des besoins plus précis de l'utilisateur, le modèle peut fournir toutes sortes de résultats graphiques (suivi de l'état des stocks au cours du temps de simulation, suivi des quantités d'utilités disponibles, suivi des encours, courbes statistiques sur les activités des machines à états...) ou de calendriers d'activités (calendrier de maintenance effective des équipements par exemple). Cet ensemble de résultats complémentaires permet de décrire précisément le fonctionnement de l'atelier pendant la campagne.

Batch n°	Type	Date début traitement	Date de fin de cycle	Temps de cycle
13	PF3	1966	3902	1936
Batch n°	Type	Temps total attente	Temps synchronisation	
13	PF3	1149	990	

Tab.2 : Statistiques sur les batches de PF

Nous présentons ici quelques exemples de résultats graphiques du modèle de simulation. Sur la figure 9, on peut suivre le niveau de disponibilité de la matière première MP1 et visualiser les deux approvisionnements, au cours du temps de simulation. Sur la figure 10, le niveau du stock du produit final PF1 est représenté au cours du temps de production simulé.

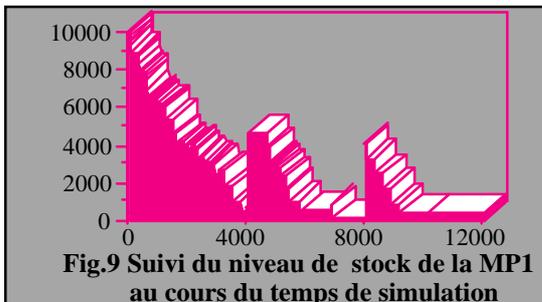


Fig.9 Suivi du niveau de stock de la MP1 au cours du temps de simulation

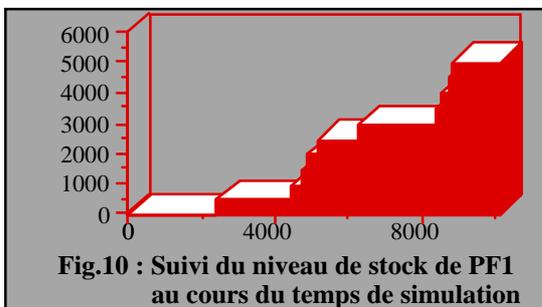


Fig.10 : Suivi du niveau de stock de PF1 au cours du temps de simulation

La figure 11 présente un exemple de résultats statistiques, en l'occurrence ceux de l'opérateur numéro 1.

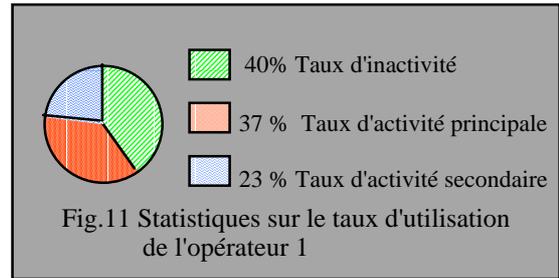


Fig.11 Statistiques sur le taux d'utilisation de l'opérateur 1

L'ensemble de tous ces résultats permet de mettre en évidence le fonctionnement du système et ses lacunes, qu'elles soient causées par des manques de matières premières, d'utilités ou de ressources humaines. Le problème traité montre bien l'importance du degré de détail du modèle. Par exemple, la prise en compte des recyclages conduit ici à presque doubler le nombre total de batches sur le site. Une simulation effectuée en s'affranchissant de toutes ces contraintes (c'est à dire en ne considérant pas les recyclages, en supposant un large excès de MP, de PIP et d'utilités) conduit à un atelier beaucoup plus performant, mais non réaliste.

6. Conclusions et perspectives

Le modèle développé est donc une aide efficace pour la gestion de production. Il est une bonne aide à la décision en permettant l'évaluation de l'impact de diverses modifications des conditions de production sur les performances du système. Enfin, son élaboration modulaire permet une réutilisabilité aisée dans des contextes particuliers (implantation de nouvelles heuristiques, par exemple).

Une des perspectives très intéressante consiste en l'utilisation de ce modèle pour déterminer une mesure de performance d'un ordonnancement choisi. Des travaux actuellement en cours concernent le couplage du modèle à un algorithme génétique développé dans notre laboratoire, afin de minimiser le temps de séjour moyen des produits dans l'atelier.

Nomenclature utilisée

Les principales abréviations suivantes ont été utilisées:

- MP : Matière première;
- PIP : Produit intermédiaire partagé;
- PF : Produit final;
- PAR : Produit à recycler;
- PNR : Produit non recyclé in situ;
- PI : Produit intermédiaire;
- VR : Volume réactionnel;
- FIFO: First in first out (premier arrivé premier servi);

SPT : Shortest processing time (temps opératoire minimum);

EDD: Earliest due date (date d'attente minimale)

Références

- [Birewar 89] Birewar D.B. and I.E Grossman,
Efficient Optimization Algorithms for
Zero-Wait of Multiproduct Batch
Plants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1989,
28, 1333-1345.
- [Sahidinis 91] Sahinidis N.V. and Grossman I.E.,
MINLP model for cyclic
multiproduct scheduling on
continuous parallel lines,
Computers chem. Eng., Vol.15,
No 2, pp. 85-103, 1991.