

Propositions de règles de modélisation pour une simulation discrète d'une chaîne logistique hybride

MOHAMMED DEGOUN¹, PIERRE FÉNIÉS², VINCENT GIARD³, KAWTAR RETMI⁴, JANAH SAADI⁵

¹ EMINES Université Mohammed VI Polytechnique, Benguerir, Maroc
Université Hassan II – ENSEM, Casablanca, Maroc
PSL – Université Paris-Dauphine – LAMSADE UMR 7243, F 75775 Paris Cedex 16
mohammed.degoun@emines.um6p.org

² EMINES Université Mohammed VI Polytechnique, Benguerir, Maroc
Université Paris Ouest Nanterre La Défense - 200 Avenue République, 92001 Nanterre, France
pierre.fenies@u-paris10.fr

³ EMINES UNIVERSITÉ MOHAMMED VI POLYTECHNIQUE, BENGUERIR, MAROC
PSL – Université Paris-Dauphine – LAMSADE UMR 7243, F 75775 Paris Cedex 16
vincent.giard@dauphine.fr

⁴ EMINES Université Mohammed VI Polytechnique, Benguerir, Maroc
Université Hassan II – ENSEM, Casablanca, Maroc
Université Paris Ouest Nanterre La Défense - 200 Avenue République, 92001 Nanterre, France
kawtar.retmi@emines.um6p.org

⁵ Université Mohammed VI Polytechnique, Benguerir, Maroc
Université Hassan II – ENSEM, Casablanca, Maroc
saadijanah@gmail.com

Résumé - Cet article s'intéresse à la modélisation / simulation d'une chaîne logistique (CL) combinant des processus discrets et continus, en appui d'un Système d'Aide à la Décision destiné à faciliter les prises de décisions tactiques et opérationnelles. Les principes proposés seront illustrés par des exemples tirés de notre modélisation de la CL de l'OCP qui va de l'extraction de minerais à la production d'engrais. La première partie de l'article caractérisera les notions de chaînes logistiques discrètes, continues, et hybrides et examinera les approches de modélisation/simulation disponibles relativement au type de système retenue, la deuxième partie de cet article proposera une revue de la littérature sur la modélisation /simulation des chaînes logistiques hybrides tandis que la dernière partie proposera des règles originales de modélisation / simulation pour des chaînes logistiques hybrides et instanciées sur la principale partie de la CL de l'OCP.

Abstract - The purpose of this article is to focus on the modeling / simulation of a supply chain (SC) combining discrete and continuous process to be used by a Decision Support System whose aim is to facilitate decision-making at a tactical and operational level. We use modeling / simulation of the SC of the OCP as an illustration and justification of the methodological choices made in the context of this article. The first part of the article will characterize the notions of discrete, continuous, and hybrid SCs, and consider modeling / simulation approaches available for the type of restraint system; the second part of this article will propose a review of the literature on modeling / simulation hybrid SCs while the last part will offer new modeling rules. Those principles are used to model and simulate the main part of the OCP SC.

Mots clés – Chaîne logistique hybride ; Simulation à événements discrets ; modélisation.

Keywords – Hybrid Supply Chain; Discrete Event Simulation; Modeling.

1 INTRODUCTION/POSITIONNEMENT DU PROBLÈME

La chaîne logistique (CL) de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) est caractérisée par un enchaînement d'entités productives intégrées partant de l'extraction de minerai de phosphate et allant jusqu'à la livraison au client final en engrais. La construction de modèles d'aide à la décision s'appuyant sur la simulation pour l'OCP s'insère dans un ensemble de problématiques managériales et scientifiques dépassant le simple cadre des problèmes

rencontrés lors d'une modélisation simulation d'une CL classique. En effet, la nature même de cette CL, combinant des processus discrets et continus, reliés par des modes de transports intégrés et variés (trains, pipelines et bateaux), constitue un objet de recherche original pour lequel les modélisations issues du monde de l'optimisation s'avèrent inappropriées en raison de difficultés liées à la fois à la complexité algorithmique et systémique.

On s'intéresse ici à la modélisation / simulation (M/S) d'une CL combinant des processus discrets et continus, utilisée en appui

d'un système d'aide à la décision (SAD) destiné à faciliter la prise de décisions tactiques et opérationnelles. Notre M/S de la CL de l'OCP est utilisée pour illustrer et justifier les choix méthodologiques présentés ici. Dans la première partie de l'article les concepts de chaînes logistiques discrètes, continues et hybrides sont définis et les approches de M/S potentiellement disponibles pour traiter le type de CL étudié seront présentées. En deuxième partie, on proposera une revue de la littérature sur la M/S des CL hybrides tandis que la dernière partie présentera des règles originales de M/S pour des chaînes logistiques hybrides que l'on illustrera par un exemple tiré de la M/S réalisé sur la CL de l'OCP.

2 REPRÉSENTATION DES CHAÎNES LOGISTIQUES DISCRÈTES, CONTINUES OU HYBRIDES PAR DES PROCESSUS

Nous caractérisons ici une CL par rapport à la nature de ses processus de transformation, lesquels peuvent conduire à une modification physique des produits ou à un changement de leur localisation (transport). Nous distinguons trois types de chaînes logistiques, que nous appelons chaîne logistique discrète, chaîne logistique continue et chaîne logistique hybride. La modélisation du fonctionnement d'une chaîne logistique passe par une modélisation des processus qui la composent et de leurs enchaînements. On retiendra ici une approche générique de représentation des processus, indépendante des instrumentations disponibles. Trois cas de figure peuvent être distingués :

(i) **Une chaîne logistique discrète (CLD)** : est constituée d'un ensemble de processus de transformation de flux discrets, organisant de manière intégrée les processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final, avec des logiques de production par lots ou à l'unité. Une CL dédiée à la fabrication de biens (production discrète) se décrit comme un ensemble de processus élémentaires discrets. On désignera sous le terme générique d'**item** les composants et produits intervenant dans un processus de production discret. Dans un processus élémentaire (Figure 1), un processeur prélève un ou plusieurs items dans un (ou plusieurs) stock(s) pour les traiter pendant un certain temps. Une fois le traitement achevé, le produit résultant, qui peut correspondre à un ou plusieurs items, est envoyé dans un ou plusieurs stocks. La structure volumique des produits entrants et sortants est décrite par des coefficients de nomenclature (k_i et h_j , dans la Figure 1) ; le temps opératoire d'une production, définie par les quantités correspondant aux coefficients de nomenclature, est donné par la gamme de production. Un processeur peut être spécialisé dans une production (même gamme et même nomenclature) ou non. Chaque stock d'entrée ou de sortie d'un flux contient, à chaque instant, un ensemble d'objets physiques de même nature (même référence de produit, même volume unitaire...) ou non. Il se caractérise également par une capacité maximale, définie par un nombre d'objets ; si les produits contenus dans le stock sont hétérogènes, la capacité est définie par un nombre d'objets d'une référence - étalon retenue pour calculer la capacité utilisée par un ensemble d'objets hétérogènes.

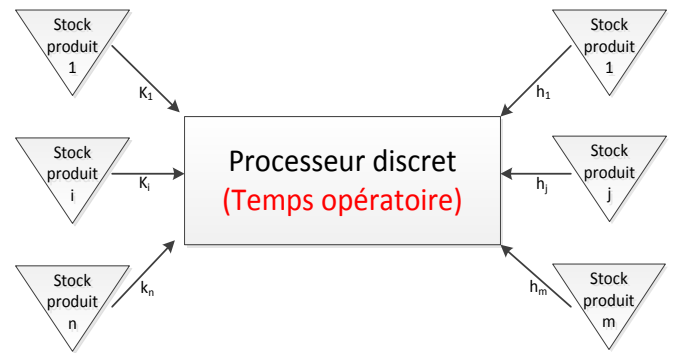


Figure 1. Modélisation d'un processus élémentaire d'une production discrète

(ii) **Une chaîne logistique continue (CLC)** : est constituée par une succession de processus de transformation de flux continus, organisant de manière intégrée ces processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final. Certains systèmes productifs sont dédiés au traitement de fluides et/ou de granulés au sens large ; dans la suite on utilisera le terme générique de **flux**, dans le reste de cet article. Dans un processus continu élémentaire, un ou plusieurs flux entrants sont admis par un processeur pour y subir un traitement ; ces flux sont caractérisés par leur nature (type de produit) et leurs débits. Du processeur sortent un ou plusieurs flux, également caractérisés par leurs natures et leurs débits. La transformation réalisée par le processeur (transformation chimique, par exemple) implique que les débits entrants et sortants soient liés par des proportions déterminées, ce qui correspond à une nomenclature. Dans une production continue stable, impliquant toujours les mêmes intrants et extrants et des débits stables, la connaissance du temps de traitement réalisée par le processeur est sans grand intérêt. Lorsque ces caractéristiques varient (changement de programme de production, maintenance, modification de débits), les changements opérés en entrée ne se répercutent pas immédiatement en sortie du processus. La durée de ce temps de traitement s'apparente à un temps opératoire. Chaque stock d'entrée ou de sortie d'un flux se caractérise par la référence du produit qu'il contient, par sa capacité maximale, définie par un volume de produit (ou son poids...), et par son niveau courant, défini dans la même unité que la capacité.

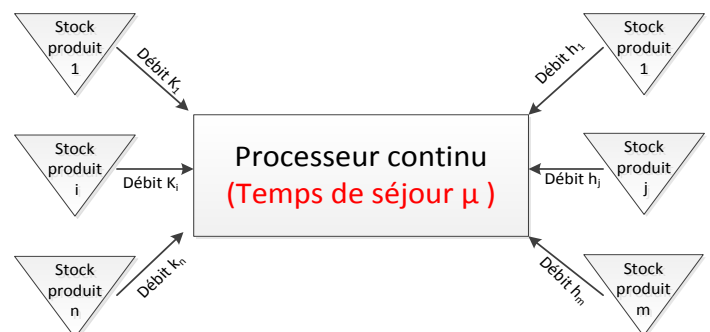


Figure 2. Modélisation d'un processus élémentaire d'une production continue

(iii) **Une chaîne logistique hybride (CLH)** : est constituée d'un ensemble articulé de CLD et CLC organisant de manière intégrée les processus de transformation du fournisseur jusqu'au client final, et pour lesquels les logiques de production sont à la fois par lots et en flux. Les chaînes logistiques hybrides combinent des processus discrets et continus. La représentation d'un tel système est possible par des enchaînements de stocks et de processeurs, à condition de préciser les mécanismes de conversion des items et/ou flux échangés entre deux processus successifs discrets et/ou continus, la nature du contenu d'un stock étant radicalement différente selon que l'on considère qu'il est alimenté par un flux ou par des items.

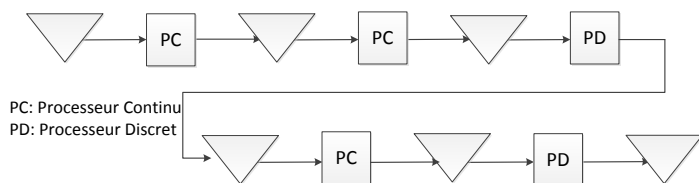


Figure 3. Modélisation d'un processus élémentaire d'une production hybride

En parallèle des types de chaînes introduites, nous mettons en évidence les différents niveaux de périmètres décisionnels existants pour tout type de chaîne logistique. [Anthony, 1965] définit trois niveaux de décisions selon leur horizon temporel :

(i) **Les décisions opérationnelles** sont des décisions de court terme concernant les opérations courantes de l'entreprise. Elles sont prises par les agents d'exécution ou les agents de maîtrise et correspondent aux décisions courantes de conduite du système productif (production, maintenance, approvisionnement...).

(ii) **Les décisions tactiques** sont des décisions de moyen terme concernant l'organisation de la gestion quotidienne de l'entreprise. Elles traitent de la planification de la production, de la coordination de la chaîne logistique, des politiques de réapprovisionnements.

(iii) **Les décisions stratégiques** concernent les orientations générales de la firme et ont une implication sur le long terme ; ces décisions visent définition du portefeuille d'activités sur lequel l'entreprise entend se placer sur le long terme ainsi que le portefeuille de ressources permanentes à mobiliser.

Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons à la planification opérationnelle et tactique de la chaîne logistique hybride, même si les frontières entre ces trois niveaux sont parfois ambiguës.

3 MODÉLISATION ET SIMULATION D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE HYBRIDE : REVUE DE LA LITTÉRATURE.

Trois grandes familles de techniques de M / S sont mobilisables dans le cadre de la modélisation de la chaîne logistique : la Simulation à Événements Discrets (SED), la modélisation se basant sur les Systèmes Dynamiques (SD), et la Simulation Hybride (SE). La combinaison de ces approches avec les approches multi-agents est possible, mais ne constitue pas le cœur de cible de nos travaux.

Selon [Tako et Robinson, 2012], la **SED** modélise le système comme un réseau de files d'attente et d'activités dans lesquels les changements d'état se produisent suite à des événements discrets. **L'approche SD** a été utilisée par exemple par [Pierreval et al, 2007], qui suggèrent et utilisent une vision continue pour modéliser la chaîne logistique. Les modèles sont basés les systèmes dynamiques de [Forrester, 1961].

[Betts, 2014] définit le troisième **modèle de simulation « hybride »** comme un modèle de simulation basé sur la combinaison des deux approches SED et SD.

Le premier paragraphe de cette section présente le cadre général de l'analyse de la revue de la littérature tandis que le deuxième paragraphe focalise sur les choix retenus dans le cadre de la modélisation discrète des chaînes logistiques hybrides.

3.1 Méthodologie de la revue de littérature :

Notre analyse mobilise des articles traitant des cas concrets relatifs à des classes de décisions opérationnelles et/ou tactiques, en faisant abstraction de ceux s'intéressant à un horizon stratégique ou de type « temps réel » dans leur résolution de problème. Cette restriction est justifiée quant à notre utilisation ultérieure de cette classification, pour apporter des réponses à des interrogations relatives à notre domaine d'étude. Le but de cette analyse est d'explorer l'utilisation des différentes techniques de simulation SED, SD, SE, en traitant spécifiquement la nature des chaînes logistiques modélisées et le niveau d'utilisation de ces techniques de simulation.

Pour atteindre cet objectif, nous fondons notre analyse sur la fréquence avec laquelle les chaînes logistiques sont modélisées en utilisant soit la SED, la SD ou bien la SE. L'étude est basée sur un examen de plusieurs articles qui décrivent l'application des trois techniques de simulation mentionnées aux différents types de CL. Ce qui nous conduit à aborder plusieurs questions à propos d'une éventuelle corrélation entre ces 2 typologies. Comme, par exemple :

- Est-ce que la SH est exclusivement utilisée pour les CLH ?
- Est-ce que la SED peut être utilisée pour la modélisation des processus continus ?
- Si la SD est utilisée pour modéliser une CLC ou une CLH, quelles sont les règles de traduction utilisées pour discrétiser les processus continus (dans le cas de SE ou SED) ?

Pour répondre à ce questionnement, nous avons suivi une méthodologie de classification de la littérature relative à notre périmètre d'analyse. Cette méthodologie reprend les approches retenues dans deux revues de la littérature réalisées par [Tako et Robinson, 2012] et [Jahangirian et al, 2010] ; elles portent sur des articles qui traitent des problèmes concrets dans des chaînes logistiques réelles en s'appuyant sur la simulation, et elles font ressortir clairement deux des trois typologies identifiées dans le paragraphe précédent (technique de simulation utilisée, classe de décisions étudiée). Nous avons enrichi ces revues de la littérature en introduisant d'autres articles plus récents ou en les complétant avec des articles plus anciens omis et qui nous paraissaient importants.

Notre approche introduit en plus de la technique de modélisation/simulation retenue la nature de la chaîne logistique étudiée (CLD, CLC, CLH).

Ainsi, de manière implicite, les relations suivantes sont généralement admises par la communauté scientifique :

- Les CLD doivent être simulées à l'aide de technique de SED ;
- Les CLC doivent être simulées à l'aide de technique de SD ;
- Les CLH doivent être simulées à l'aide de technique de SE.

Notre objectif pour la suite sera d'infirmer ou de confirmer ce postulat implicite, grâce au travail de classification entrepris. Ensuite nous nous focaliserons exclusivement sur les articles

portant sur la modélisation/simulation de la CLH, afin de déceler des archétypes patterns relatifs à l'utilisation des 3 techniques de simulation vis-à-vis de cette nature de chaîne logistique.

Un croisement entre les typologies présentées précédemment est ainsi synthétisé dans une grille (tableau 1) qui indique pour chaque travail scientifique réalisé la catégorie à laquelle il appartient ainsi que l'approche de simulation qu'il utilise.

Auteurs	Type de problèmes	Nature de la Chaîne logistique	Types de décision	Techniques de simulation utilisées
Van Beek et al (2000)	Classification des langages de modélisations /leurs applications dans les modèles hybrides et simulation	Clh	Opér	SED / SE
Hamaidi al. (1994)	Développement d'un programme général de simulation mixte MSPE (Mixed Simulation for Process Engineering)	Clh	Opér	SE
Falster (1987)	Combinaison de modèles de simulation pour les systèmes de planification de production	Clh	Opér	SE
Melouk et al (2013),	Développement d'un outil d'aide à la décision qui examine les changements potentiels à la conception et à l'exploitation d'une installation d'une usine de fabrication d'acier	Clh	Opér / Strat	SED
Floudas et al (2004)	Vue d'ensemble sur les modèles en temps discret et les modèles en temps continu pour la planification des processus chimiques	Clh	Opér	SED/SE
Genc et al (2014)	Etude d'un système d'alerte précoce qui permet d'aider les entreprises opérant dans les chaînes d'approvisionnement pour faire face à la complexité et à la turbulence	Cld	Opér	SED
Saenz et al (2009),	Développement d'un système d'aide à la décision en temps réel (en réaction à des événements perturbateurs) dans une usine d'aluminium	Clh	Opér	SE
Giambiasi et al (2006),	Étude de modèle généralisé à événements discrets afin de faciliter le développement d'une approche uniforme pour modéliser les Clh	Clh	Opér	SE/SED
Mendes et al (2005),	Équilibrage de la chaîne d'assemblage	Cld	Opér	SED
Koh S.C.L. (2004),	Planification de capacités	Cld	Tact	SED
Weston et al (1999),	Planification de capacités	Clh	Tact	SED
Owens et al (2002),	Planification de capacités	Clh	Tact	SD
Kyamakya et al (2005),	Localisation d'infrastructures	Cld	Strat	SE
Lyneis J.M. (1999)	Prévisions	Cld	Strat	SD
Roser et al (2006)	Gestion des stocks	Cld	Tact	SED
Mehra et al (2006)	Gestion des stocks	Clc	Tact	SED
Park et al (2006)	ingénierie des procédés de fabrication	Clc	Tact	SED
Pfeil et al (2000)	ingénierie des procédés de fabrication	Clc	Tact	SED
Durieux et al (2004)	ingénierie des procédés de fabrication	Cld	Tact	SED
Giannini et al (1997)	Ingénierie des procédés de service	Cld	Strat	SED
Liu C.M. (1999)	Ingénierie des procédés de service	Cld	Strat	SED
Kadipasaoglu et al (1999)	Planification de production et contrôle des stocks	Cld	Opér	SED
Rabelo et al (2005)	Planification de production et contrôle des stocks	Cld	Opér	SE
Arer et al (1999)	Planification de production et contrôle des stocks	Clh	Opér	SE
Hahn et al (1999)	Affectation de ressources	Cld	Opér	SED
Gambardella et al (1998)	Affectation de ressources	Cld	Opér	SED
Bagdasaryan A (2011)	Modélisation et contrôle des systèmes complexes	Méthode	Tact	SE
Ghaeli et al (2008)	Planification de production	Clh	Opér	SE
Lee et al 2002)	Planification de production et contrôle des stocks	Clh	Tact	SE
Pierreval et al (2007)	Gestion et contrôle des stocks	Cld	Tact	SE
van Beck et al (1997)	Test et contrôle des systèmes opérationnels	Clh	Opér	hybride
Wanga et al (2006)	Planification de production	Cld	Opér/ Tact	Résolution hybride
Nidumolu et al (1998)	Modélisation et simulation des processus métiers	Cld	Tact	SED
Chen et al (2002)	Planification de capacités dans l'industrie chimique	Clh	Opér/ Tact	SED

Abduaziz et al (2015)	Évaluation des pratiques logistiques vertes dans l'industrie automobile	Clh	Opér / Tact / Strat	SE
Wang et al (2014)	Méthode d'évaluation d'un cycle de vie	Clh	Opér	SE
Wang et al (2013)	Modélisation et simulation hybride d'un réseau de la chaîne logistique automobile	Clh	Opér / Tact	SE
Umeda et Zhang (2008)	Modélisation hybride pour la simulation d'une chaîne logistique	Cld	Strat / Opér / Tact	SE

Tableau 1. Techniques de Simulation et Nature de la Chaîne logistique modélisée.

3.2 Analyse de la revue de la littérature en vue de l'usage d'une modélisation discrète pour une chaîne logistique hybride

Une analyse des différents articles mobilisés dans le cadre de la modélisation /simulation de chaînes logistiques hybrides permet de ranger les propositions dans trois catégories :

- **Solution A** - Enchaîner les modélisations discrètes et continues, ce qui n'est possible que si les sous-systèmes sont séquentiels et ne partagent pas de ressources. Concrètement, la simulation d'un sous-système s'effectue sur la base des entrées datées dans ce sous-système durant le temps de la simulation et ses sorties deviennent les entrées du sous-système suivant. Ces simulations enchaînées sont indépendantes. Se posent alors les problèmes de « passages de témoin » entre modélisations de nature différente.
- **Solution B** - Utiliser une approche de modélisation unique pour décrire un système hybride.
 - 1 Si la modélisation retenue est de type SD :
 - des modélisations continues de systèmes productifs discrets ont été réalisées, avec des informations très agrégées, pour éclairer la prise de décision qui est de nature stratégique ;
 - les modélisations continues sont inadaptées pour une prise de décisions tactiques ou opérationnelles dans les systèmes productifs discrets (détail insuffisant) ;
 - 2 Si la modélisation retenue est de type SED : on se retrouve face à un problème technique de la « traduction » d'un processus continu en un processus discret :
 - **Solution B₁** – Traduction « immédiate » lorsque le processus discret, connecté à un processus continu, effectue un transport (wagon...) d'un lot de liquide et/ou de granulés.
 - **Solution B₂** – Traduction relativement facile pour un processeur utilisable dans des productions variées (nomenclatures et gammes différentes), si les temps d'attente sont connus et ne dépendent pas de l'ordonnancement des productions.
 - **Solution B₃** – Traduction plus compliquée dans les autres cas, le processeur devant être piloté périodiquement par un module décisionnel encapsulé (ou externe) s'appuyant sur une modélisation continue (équations différentielles) ; cette solution diffère de la solution A car elle est mobilisée périodiquement tout au long de la simulation discrète de la chaîne hybride (par exemple, Saenz de Ugarte, 2008).

- **Solution C** - Utiliser une modélisation unique s'appuyant sur une traduction des modélisations discrètes et continues (représentation unifiée), comme évoquée sans grande précision dans [Bemporad et al, 2004].

La plupart des articles présentés dans le tableau 1 retiennent la simulation hybride comme moyen conventionnel pour simuler le fonctionnement d'une chaîne logistique hybride. Néanmoins, cette utilisation présente quelques failles. Ainsi, [Melouk et al., 2013], [Chen et al, 2002] traitent la problématique de simulation d'une chaîne logistique hybride à l'aide de la technique de simulation à événements discrets. En effet, le résultat de ces analyses permet de ressortir 3 arguments principaux :

- Lors de la construction d'un modèle de simulation pour des processus de production en continu, le niveau de détail et d'informations est trop faible dans la définition des dits modèles. [Chen et al, 2002].
- La simulation hybride nécessite des hypothèses restrictives dans le cadre de la modélisation des systèmes logistiques et augmente la complexité de la programmation logicielle et les temps de calcul. [Chen et al, 2002] ;
- Même si des chercheurs ont proposé des packages logiciels combinant la SED avec la SD, la plupart des problèmes scientifiques viennent de la conceptualisation des opérations de production pour la simulation, de la discrétisation des processus continus ainsi que du choix du niveau de détail pertinent pour ces modèles.

Pour ce qui est de la suite de notre article, nous proposerons des règles génériques indépendantes du logiciel de simulation retenu et dépassant les principes instanciés par [Chen et al., 2002]. Ces règles permettront de pallier ces difficultés d'une part, et de répondre aux exigences du niveau de détail nécessaire d'autre part. Ces règles génériques sont ainsi décrites dans la section suivante et expliquées à l'aide de problèmes réels issus de la modélisation de la CL de l'OCP.

4 BASES DE LA MODÉLISATION D'UN SYSTÈME HYBRIDE PAR UN SED

Cette proposition de modélisation d'un système hybride par un SED repose sur l'utilisation conjointe de quatre principes permettant de transformer des processus continus en des processus discrets qui seront combinés avec d'autres processus discrets pour décrire le fonctionnement d'une chaîne logistique.

Le premier est un principe de discrétisation des flux entrants et sortants d'un processus continu (§4.1). Le second principe permet d'assurer la cohérence des caractéristiques des lots obtenus par le mécanisme de discrétisation, en combinant des informations de nomenclature et de débit (§4.2). La modélisation du processus

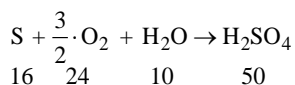
continu avec les primitives d'un SED nécessite quelques adaptations dans l'usage de certaines d'entre elles (§4.3). Enfin, lorsque deux processus continus sont connectés, se posent des problèmes de synchronisation de flux émis et reçus qui obligent à utiliser un mécanisme de conversion (§4.4). Nous illustrons principalement les principes retenus à l'aide de la M / S des ateliers de production d'acide sulfurique et d'acide phosphorique du site de Jorf et qui sont une partie intégrée de la CL de l'OCP.

4.1 Principe de discrétisation des flux continus

La modélisation d'un processus continu par un SED repose sur une discrétisation des flux entrants et sortants, produits pendant un intervalle de temps θ . Cet intervalle, constant dans la simulation peut ne pas être identique pour tous les processus continus modélisés. Cette granularité temporelle est liée à des caractéristiques locales et cette hétérogénéité ne pose pas de problèmes. Pour simplifier l'exposé, on prendra $\theta = 10$ minutes, un processus continu prélève alors, toutes les 10 minutes, un lot par intrant requis dans le processus ; ce lot entrant est un item pour le SED. Après traitement, le processus continu émet, toutes les 10 minutes, un lot par extrant émis par le processus continu.

4.2 Prise en compte de la nomenclature d'un processus continu dans un SED

Un processus continu est alimenté de manière continue par un certain nombre d'intrants pour les transformer et produire, après un certain temps, un certain nombre d'extrants. Ces intrants et ces extrants se présentent généralement sous des formes liquides, gazeuses ou sous forme de granulés. La transformation est souvent de nature chimique, ce que l'on retiendra ici. Les relations qui lient entre eux les intrants et les extrants se décrivent par une équation molaire qui définit implicitement une nomenclature. Appuyons-nous sur l'exemple de la production d'acide sulfurique. Sa production fait appel à l'équation molaire suivante, complétée par les nombres atomiques de ces molécules, qui illustrent le principe de conservation de la matière dans la transformation.



En toute rigueur, les débits entrants et sortants d'un processus continu sont des dérivées. dq/dt , où q est un poids. Dans le cadre retenu, ces débits sont définis sur une courte période de temps ($\rightarrow \Delta q / \Delta t$) ; on conviendra ici de retenir la minute ($\rightarrow \Delta t = 1$) et de définir les débits en kilogrammes/minute.

On définit ensuite l'un des flux comme étant le flux-maître dont le débit sert de référence pour décrire les débits des autres flux. Retenons arbitrairement le flux de soufre liquide comme flux-maître, mais n'importe quel autre produit aurait pu être retenu. On peut alors écrire, en indiquant q par les produits chimiques

$$\frac{\Delta q_{\text{O}_2}}{\Delta t} = \frac{24}{16} \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t} = 1,5 \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t}, \quad \frac{\Delta q_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta t} = \frac{10}{16} \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t} = 0,625 \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t},$$

$$\frac{\Delta q_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\Delta t} = \frac{50}{16} \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t} = 3,125 \cdot \frac{\Delta q_{\text{S}}}{\Delta t}$$

Dans la simulation du processus de fabrication d'acide sulfurique, la fixation du débit de soufre liquide détermine automatiquement ceux des arrivées d'oxygène et d'eau, ainsi que le débit sortant d'acide sulfurique. Supposons que le débit d'admission du soufre choisi soit de 100 kg/min. Ceci implique, avec le pas de 10

minutes retenu ci-dessus que ce processus chimique admet toutes les 10 minutes un lot de 1 000 kg de soufre, un lot de 1 500 kg d'oxygène et un lot de 625 kg d'eau ; toutes les 10 minutes, un lot de 3 125 kg d'acide sulfurique sort de ce processus. Il est à noter que la production n'est possible que si tous ces lots entrants sont disponibles, en conséquence de quoi, une rupture de stock de l'un des produits engendre un arrêt du processus de production.

D'une manière plus générale, pour un processus i qui utilise les intrants a_{i_k} et produit les extrants b_{i_l} . L'équation-bilan molaire de la transformation conduit à l'équation $\sum_k \text{poids}(a_{i_k}) = \sum_l \text{poids}(b_{i_l})$. Si le premier flux entrant ($k=1$) du processus i est retenu comme étant le **flux-maître**, on peut écrire $\sum_k \frac{\text{poids}(a_{i_k})}{\text{poids}(a_{i_1})} = \sum_l \frac{\text{poids}(b_{i_l})}{\text{poids}(a_{i_1})} \rightarrow \sum_k \alpha_{i_k} = \sum_l \beta_{i_l}$. En notant D_{i_1} le débit du flux-maître du processus i , ce flux étant un flux entrant, les autres débits entrants sont $D_{i_k} = D_{i_1} \cdot \alpha_{i_k}$ et les flux sortants sont $D_{i_l} = D_{i_1} \cdot \beta_{i_l}$.

La capacité de production du processus continu contraint la valeur maximale que peut prendre le débit du flux-maître. La capacité des stocks d'intrants et d'extrants, qui assurent un certain découplage entre les processus, intervient dans la définition de la capacité mobilisable pour deux raisons.

- Pour empêcher tout désamorçage du processus auquel on s'intéresse, le débit de consommation de chacun de ses intrants ne doit pas être durablement inférieur aux débits de production des processus-amont qui les fabriquent, leurs stocks résiduels limitant le temps pendant lequel les débits de consommation peuvent excéder ceux de production ; ce raisonnement s'adapte immédiatement si le stock d'un produit est alimenté par plusieurs processeurs et/ou alimente plusieurs processeurs.
- Par ailleurs, la saturation de l'un quelconque des stocks d'extrants limite mécaniquement la valeur que peut prendre le débit du flux-maître.

4.3 Modélisation d'un processeur continu dans un SED

La modélisation par un SED d'un système productif ne comportant que des processus discrets mobilise un certain nombre de primitives : des points d'entrée par lesquels entrent des items ; des processeurs, dans lesquels les items font l'objet d'un traitement pendant une certaine durée ; des stocks (ou des files d'attente) par lesquels transitent les items, sans traitement, avec un temps de séjour minimal pouvant être nul ; des points de sortie du système productif ; et, enfin, des flèches reliant ces primitives, pour indiquer la possibilité qu'un item puisse passer d'une primitive à une autre.

L'utilisation « normale » de ces primitives ne permet pas de décrire directement un processus continu, même après la discrétisation décrite précédemment. En effet, la transformation opérée par un processus continu prend un certain temps. Par exemple, il s'écoule environ 4 minutes entre le moment où un lot de 1 000 kg d'acide sulfurique est introduit dans une ligne de production d'acide phosphorique et celui où un lot de 3 125 kg d'acide phosphorique sort de la ligne pour être stocké. Attribuer un temps opératoire de $10' + 4' = 14'$ à un processeur utilisé pour décrire le fonctionnement de cette ligne, conduirait à attendre 4'

minutes avant de pouvoir traiter le lot suivant, alors que la discrétisation retenue implique que cette ligne soit alimentée toutes les 10 minutes.

Pour résoudre ce problème, il est possible, mais inutilement compliqué, de mobiliser des processeurs parallèles. Il est plus simple de modifier l'usage des primitives de la modélisation par un SED, pour décrire un processus continu (Figure 4). Ce processus continu est alors modélisé par un stock imposant, à chaque lot entrant, un temps de séjour θ correspondant à la durée du traitement continu. Ce stock est alimenté par un processeur fictif ayant un temps opératoire de θ minutes, pour garantir une alimentation du processus continu toutes les θ minutes (cf. §4.1). Ce processeur fictif est connecté aux stocks des produits utilisés dans le processus continu et prélève un lot dans chacun des stocks pour les fusionner avant d'envoyer le lot résultant dans le stock utilisé pour modéliser le processus continu. Les caractéristiques de poids de chacun des items entrants sont cohérentes avec le débit de production souhaité et la nomenclature utilisée dans la transformation chimique (cf. 4.2). La primitive « stock » étant, par nature « passive », le stock représentant la ligne de production d'acide phosphorique doit être connecté en aval à un processeur fictif, de temps opératoire nul, dont le rôle est de tirer au plus tôt du stock représentant le processus continu, tout lot ayant séjourné le temps requis, pour l'expédier dans son stock de destination voulu (lequel est un stock « normal »).



Figure 4. Modélisation d'un processus continu dans un SED

Il faut souligner que cette modélisation d'un processus continu n'est pas possible s'il se combine avec d'autres processus dans une boucle. En effet, l'existence de boucles dans l'enchaînement de processus induit des phénomènes de rétroaction qui, combinés avec l'impact de décisions de modification de débit ou de production, compliquent l'analyse du comportement de certains systèmes de production continue. L'utilisation de systèmes d'équations différentielles dans des simulateurs dynamiques (SD) permet, sous certaines conditions, de reproduire le comportement « fin » du système productif enchaînant quelques processus élémentaires continus et d'éclairer la prise de décision. En travaillant à un niveau d'agrégation on peut modéliser un processus continu complexe composé de processus élémentaires liés entre eux, avec ou sans boucle de rétroaction, par un processus élémentaire agrégé si les processus élémentaires qui le composent n'entretiennent de boucles de rétroaction avec des processus élémentaires externes. Il devient alors plus difficile de décrire le comportement de ce processeur agrégé par un système d'équation différentielle. Il est cependant possible de déterminer un temps moyen de séjour μ des flux dans ce processus agrégé, en postulant l'utilisation de mécanismes internes de contrôle stabilisant le comportement du processus continu agrégé.

Le couplage entre deux processus continus, modélisés comme expliqué ci-dessus, pose un problème additionnel résolu par l'introduction d'un dernier principe de modélisation.

4.4 Couplage de deux processus continus dans un SED

Le couplage entre deux processus continus connectés s'effectue nécessairement par l'intermédiaire d'un stock intermédiaire. Pour illustrer le raisonnement, on définira le processus-amont comme étant le processus de production d'acide sulfurique, et le processus-aval comme étant le processus de production d'acide phosphorique ; on retiendra le même cadencement de 10 minutes en admission de ces deux processus.

La combinaison du principe de discrétisation de la production continue sur la base d'un cadencement toutes les θ minutes, des entrées et des sorties d'un processeur (cf. §4.1) et du principe de définition du poids d'un lot entrant ou sortant dans le processus continu, en fonction de la nomenclature utilisée et de la valeur du débit décidé pour le flux-maître qui pilote ce processeur (cf. §4.2) conduit à pouvoir trouver dans ce stock intermédiaire des lots hétérogènes en termes de poids d'acide sulfurique, ces différences étant liées à des variations possibles de débit décidées pour la production d'acide sulfurique. Par ailleurs, le poids du lot en acide sulfurique pur (x_i), émis toutes les θ_1 minutes par le processus de production d'acide sulfurique, a peu de raisons d'être identique à celui requis (y_j), toutes les θ_2 minutes, par le processus de production d'acide phosphorique.

Il est donc nécessaire de créer un **convertisseur** qui prélève un ou plusieurs lots de poids x_i , du stock intermédiaire, pour créer, toutes les θ_2 minutes, un lot possédant le poids y_j requis d'acide sulfurique prélevé par le processus de production d'acide phosphorique (Figure 4). Le principe de conversion est décrit par l'algorithme suivant ; son implémentation est immédiate dans la modélisation basée sur un SED.

Étape 1 (initialisation) : $i = 0, k = 0, t_0$ est la date courante de la simulation

Étape 2

- $i = i + 1$; prélever le lot i dans le stock intermédiaire
- $k \leftarrow k + x_i$
- Si $k < y$ aller à l'étape 2, sinon aller à l'étape 3

Étape 3 :

- Créer un lot de poids y à envoyer vers le processus-aval
- Créer un lot de poids $k - y$ renvoyer vers le stock intermédiaire, en première position dans la file d'attente
- Attendre la date $t = t_0 + \theta$ puis aller à l'étape 1

Le stock intermédiaire joue un rôle de stock-tampon permettant d'absorber les différences entre les flux entrants et sortants de ce stock (liés aux poids x_i et y_j). Le niveau initial du stock peut permettre de retarder un désamorçage si le flux sortant est supérieur au flux entrant. La capacité maximale du stock joue également un rôle important si le flux entrant est supérieur au flux sortant : la différence entre cette capacité maximale et le niveau initial du stock permet de retarder la saturation de ce stock et donc le moment où le processus-amont doit impérativement baisser ou arrêter sa production. Bien évidemment, il est nécessaire d'introduire un convertisseur par intrant utilisé par le processus continu.

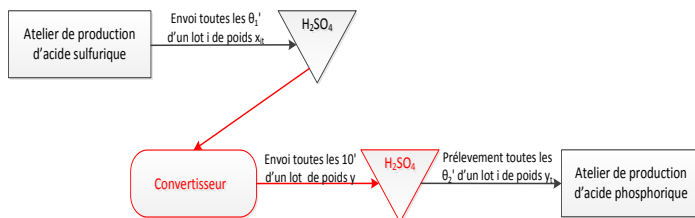


Figure 5. Convertisseur d'interface entre deux processus continus

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé le concept de chaîne logistique hybride, concept dont l'idée est venue à partir d'une confrontation entre le terrain issu du projet de modélisation de la CL de l'OCP et l'existant académique. À partir de la revue de la littérature que nous avons réalisée, nous avons pu justifier l'intérêt de recourir à la SED comme artefact exclusif pour modéliser une chaîne logistique hybride. De plus, nous avons proposé des règles de modélisation permettant de reproduire le fonctionnement d'une CL à l'aide de la SED dans le cadre de combinaison de processus logistiques continus et discrets. Les perspectives associées à ce travail sont nombreuses : d'une part, d'un point de vue managérial, elles devraient permettre de construire un artefact logiciel permettant de piloter au niveau opérationnel et tactique une CL hybride et tester la pertinence de l'approche sur le cas réel de l'OCP, et d'autre part, d'un point de vue scientifique elles devraient se traduire par des couplages de modélisations exactes combinant à la fois approches financières et logistiques aux niveaux opérationnels et tactiques.

6 RÉFÉRENCES

- Abduaziz, O., Cheng, J.K., Tahar, R.M., Varma, R., 2015. A Hybrid Simulation Model for Green Logistics Assessment in Automotive Industry. *Procedia Engineering* 100, 960–969.
- Arer, M.M., Ozdemirel, N.E., 1999. Simulation of Capacity Expansion and Sequencing Alternatives for a Sheet Metal Producer. *The Journal of the Operational Research Society* 50, 596–607.
- Betts, J.M., 2014. Minimizing Inventory Costs for Capacity-constrained Production Using a Hybrid Simulation Model. *Procedia Computer Science*, 2014 International Conference on Computational Science 29, 759–768.
- Chen, E.J., Lee, Y.M., Selikson, P.L., 2002. A simulation study of logistics activities in a chemical plant. *Simulation Modelling Practice & Theory* 10, 235–245.
- Durieux, S., Pierreval, H., 2004. Regression metamodeling for the design of automated manufacturing system composed of parallel machines sharing a material handling resource. *International Journal of Production Economics* 89, 21–30.
- Falster, P., 1987. Planning and controlling production systems combining simulation and expert systems. *Computers in Industry, Special Double Issue* 8, 161–172.
- Filip, G.N., 1993. CIM in continuous and discrete manufacturing: Object-oriented generic modelling. *Control Engineering Practice* 1, 815–825.
- Floudas, C.A., Lin, X., 2004. Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers & Chemical Engineering* 28, 2109–2129.
- Forrester J. W., 1961, *Industrial dynamics*, MIT Press et Wiley.
- Genc, E., Duffie, N., Reinhart, G., 2014. Event-based Supply Chain Early Warning System for an Adaptive Production Control. *Procedia CIRP, 2nd CIRP Robust Manufacturing Conference (RoMac 2014)* 19, 39–44.
- Ghaeli, M., Bahri, P.A., Lee, P.L., 2008. Scheduling of a mixed batch/continuous sugar milling plant using Petri nets. *Computers & Chemical Engineering* 32, 580–589.
- Giambiasi, N., Carmona, J.C., 2006. Generalized discrete event abstraction of continuous systems: GDEVs formalism. *Simulation Modelling Practice and Theory* 14, 47–70.
- Giannini, P.J., Grupe, F.H., Saholsky, R.M., 1997. Reengineering Through Simulation Modeling. *Information Systems Management* 14, 61–66.
- Hahn, M.H., Ribeiro, R.V., 1999. Heuristic Guided Simulator for the Operational Planning of the Transport of Sugar Cane. *The Journal of the Operational Research Society* 50, 451–459.
- Hamaidi, L., Bourseau, P., Muratet, G., Cerf, O., Sadoudi, A.-K., 1994. A mixed discrete-continuous approach for the simulation of bacterial contamination and growth in a food process. *Computers & Chemical Engineering, European Symposium on Computer Aided Process Engineering—3 25th European Symposium of the Working Party on Computer Aided Process Engineering and 494th Event of the European Federation of Chemical Engineering (EFChE)* 18, Supplement 1, S633–S637.
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K., Young, T., 2010. Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research* 203, 1–13.
- Koh, S.C.L., 2004. MRP-Controlled Batch-Manufacturing Environment under Uncertainty. *The Journal of the Operational Research Society* 55, 219–232.
- Kyamakya, K., Jobmann, K., 2005. Location Management in Cellular Networks: Classification of the Most Important Paradigms, Realistic Simulation Framework, and Relative Performance Analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54, 687–708.
- Lee Y.H., Cho M.K., Kim S.J., Kim Y.B. (2002), Supply chain simulation with discrete-continuous combined modeling, *Computers and Industrial Engineering*, 43, 375-392.
- Lin, W.J, Jiang Z., Liu, R., Wang L., The bullwhip effect in hybrid supply chain in: *International Journal of Production Research* pp 2062-2084 Volume 52, Issue 7, 2014
- Liu, C.-M., 1999. Clustering techniques for stock location and order-picking in a distribution center. *Computers & Operations Research* 26, 989–1002.
- Luca Maria Gambardella, A.E.R., 1998. Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal [WWW Document]. URL <http://jmvidal.cse.sc.edu/lib/gambardella98a.html> (accessed 4.30.15).
- Luis Rabelo, M.H., 2005. Enterprise simulation: a hybrid system approach. *Int. J. Computer Integrated Manufacturing* 18, 498–508.
- Lyneis, J.M., 2000. System dynamics for market forecasting and structural analysis. *Syst. Dyn. Rev.* 16, 3–25.
- Mehra S., R.A.I., 2006. A simulation-based comparison of batch sizes in a continuous processing industry. *Production Planning & Control* 17, 54–66.
- Melouk, S.H., Freeman, N.K., Miller, D., Dunning, M., 2013. Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing. *International Journal of Production Economics, Meta-heuristics for manufacturing scheduling and logistics problems* 141, 269–276.
- Mendes, A.R., Ramos, A.L., Simaria, A.S., Vilarinho, P.M., 2005. Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers & Industrial Engineering* 49, 413–431.
- Nidumolu, S.R., Menon, N.M., Zeigler, B.P., 1998. Object-oriented business process modeling and simulation: A discrete event system specification framework. *Simulation Practice and Theory* 6, 533–571.
- Owens, S., R.R.L., 2002. Evaluating Design Alternatives of an Extruded Food Production Line Using Simulation. *Simulation* 78, 626–632.
- Park, C., Park, J.-C., Byeon, G.-G., Kim, H.-G., Kim, J., 2006. Steel stock management on the stockyard operations in shipbuilding: a case of Hyundai Heavy Industries. *Production Planning & Control* 17, 1–12.

- Pfeil, G., Holcomb, R., Muir, C.T., Taj, S., 2000. Visteon's Sterling Plant Uses Simulation-Based Decision Support in Training, Operations, and Planning. *Interfaces* 30, 115–133.
- Pierreval, H., Bruniaux, R., Caux, C., 2007. A continuous simulation approach for supply chains in the automotive industry. *Simulation Modelling Practice and Theory, Modeling and Simulation of Manufacturing Systems and Extended Enterprises* 15, 185–198.
- Potočnik, B., Bemporad, A., Torrisi, F.D., Mušič, G., Zupančič, B., 2004. Hybrid modelling and optimal control of a Multiproduct Batch Plant. *Control Engineering Practice* 12, 1127–1137.
- Resteanu, C., Filip, F.-G., Stanescu, S., Ionescu, C., 2000. A cooperative production planning method in the field of continuous process plants. *International Journal of Production Economics* 64, 65–78.
- Roser, C., Nakano, M., Tanaka, M., 2005. Single Simulation Buffer Optimization. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* 48, 763–768.
- Saenz de Ugarte, B., Hajji, A., Pellerin, R., Artiba, A., 2009. Development and integration of a reactive real-time decision support system in the aluminum industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Artificial Intelligence Techniques for Supply Chain Management* 22, 897–905.
- Sukran N. Kadipasaoglu, Wenguang Xiang, Basheer M. Khumawala, 1999. Batch scheduling in a multistage, multiproduct manufacturing system – an application. *Int Jnl of Op & Prod Mngemnt* 19, 421–437.
- Tako, A.A., Robinson, S., 2012. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*, 1) Decision Support Systems for Logistics and Supply Chain Management 2) Business Intelligence and the Web 52, 802–815.
- Umeda, S., Zhang, F., 2008. Hybrid Modeling Approach for Supply-Chain Simulation, in: *Lean Business Systems and Beyond*. Springer, pp. 453–460.
- Van Beek, D.A., Gordijn, S.H.F., Rooda, J.E., 1997. Integrating continuous-time and discrete-event concepts in modelling and simulation of manufacturing machines. *Simulation Practice and Theory, Selected papers of the 5th European Simulation Congress* 5, 653–669.
- Van Beek, D.A., Rooda, J.E., 2000. Languages and applications in hybrid modelling and simulation: Positioning of Chi. *Control Engineering Practice* 8, 81–91.
- Wang, B., Brême, S., Moon, Y.B., 2014. Hybrid modeling and simulation for complementing Lifecycle Assessment. *Computers & Industrial Engineering* 69, 77–88.
- Wang, S., Guignard, M., 2006. Hybridizing discrete- and continuous-time models for batch sizing and scheduling problems. *Computers & Operations Research, Part Special Issue: Optimization Days 2003* 33, 971–993.
- Wang, W., Fu, W., Zhang, H., Wang, Y., 2013. Hybrid Modeling and Simulation of Automotive Supply Chain Network. *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 6, 1598–1605.
- Weston Jr. F.C., Herrmann F., Davidoff P.H., 1999. Capacity planning and process analysis a simulation study of a microbrewery. *Production and inventory management journal: journal of the American Production and Inventory Control Society* 48–52.