



HAL
open science

Une approche intégrée d'optimisation et de modélisation / simulation à événements discrets pour la planification d'une chaîne logistique hybride

Sabah Belil, Nikolay Tchernev, Sylverin Kemmoe Tchomte

► To cite this version:

Sabah Belil, Nikolay Tchernev, Sylverin Kemmoe Tchomte. Une approche intégrée d'optimisation et de modélisation / simulation à événements discrets pour la planification d'une chaîne logistique hybride. CIGI QUALITA 2019, Jun 2019, Montréal, Canada. hal-02493593

HAL Id: hal-02493593

<https://hal.science/hal-02493593>

Submitted on 27 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Une approche intégrée d'optimisation et de modélisation / simulation à événements discrets pour la planification d'une chaîne logistique hybride

SABAH BELIL¹, NIKOLAY TCHERNEV², SYLVERIN KEMMOE-TCHOMTE³

¹ EMINES Université Mohammed VI polytechnique, 43150, Ben guérir, Maroc
LIMOS Université Clermont Auvergne, UMR CNRS 6158, Aubière, France
sabah.belil@emines.um6p.ma

² LIMOS Université Clermont Auvergne, UMR CNRS 6158, Aubière, France
EMINES Université Mohammed VI polytechnique, 43150, Ben guérir, Maroc
nikolay.tchernev@uca.fr

³ CRCGM EA 38 49, Université Clermont Auvergne, Clermont Ferrand, France
sylverin.kemmoe_tchomte@uca.fr

Résumé - La modélisation et la simulation de la chaîne logistique est un outil puissant et populaire pour concevoir, évaluer et optimiser la structure de cette chaîne. Cependant la nature du système de cette chaîne n'est ni complètement discrète ni continue ; les deux aspects doivent être considérés ensemble. Cet article s'intéresse à la modélisation / simulation à événements discrets d'une chaîne logistique hybride. Cette approche s'appuie sur le couplage entre un modèle mathématique de planification et un modèle de simulation censé décrire au mieux et d'évaluer le comportement du modèle d'optimisation dans le temps, ainsi que de vérifier la réalisation du plan optimale proposé. La chaîne logistique étudiée combine des processus continus et des processus discrets. L'utilisation de la simulation à événement discrets pour simuler des processus continus nécessite la discrétisation périodique du flux continu émis par certains de ces processus. Cette discrétisation génère des éléments isolables appelés « entités » qui peuvent être considérées comme des entrées à d'autres processus continus. Nous proposons dans cet article une approche intégrée de modélisation / simulation et d'optimisation d'une chaîne logistique industrielle réelle complexe, constituée de plusieurs activités logistiques dans une usine chimique d'engrais.

Abstract - Supply Chain Modeling and Simulation is a strong and popular tool for designing, evaluating and optimizing the structure of supply chains. However, the nature of the supply chain system is neither completely discrete nor continuous; both aspects must be considered together. This article focuses on discrete event modeling / simulation of a hybrid supply chain. This approach is based on the coupling between a mathematical planning model and a simulation model supposed to best describe and evaluate the behavior of the optimization model over time, as well as to verify the realization of the optimal plan proposed. The supply chain studied combines continuous processes and discrete processes, the use of discrete-event simulation to simulate continuous processes requires the periodic discretization of the continuous flow emitted by some of these processes. This discretization generates isolable elements called "entities" that can be considered as inputs of other continuous processes. We propose in this paper an integrated approach of modeling / simulation and optimization of a complex real industrial supply chain, consisting of several logistic activities in a chemical fertilizer plant.

Mots clés - Modélisation, Simulation à événements discrets, chaîne logistique hybride, planification, optimisation mathématique.

Keywords – Modeling, discrete event simulation, hybrid supply chain, planning, mathematical optimization.

1 INTRODUCTION

La chaîne logistique étudiée est caractérisée par un enchaînement d'activités logistiques partant des ateliers de production des produits en vrac, composés eux même d'un ensemble de lignes de production parallèles de capacités différentes. Ces flux de produits en vrac sont ensuite stockés dans des hangars de stockage et livrés au client final. La mise en stock et l'enlèvement du produit sont assurés par un système de manutention intégré et varié (discret ou

continu). On s'intéresse ici à la modélisation / simulation d'une chaîne logistique combinant des processus continus et discrets, utilisé en couplage avec un modèle d'optimisation pour faciliter la prise de décision lors de la planification stratégique. Dans la première partie de l'article les concepts des différents types de la chaîne logistique sont présentés, et les approches de modélisation / simulation associés seront définis. En deuxième partie, une revue de la littérature sur les différentes approches de modélisation /

simulation et le couplage avec l'optimisation est proposée. En dernière partie les règles de modélisation / simulation et les résultats de l'optimisation seront présentés et illustrés par un exemple industriel réel.

2 MODELISATION ET SIMULATION DES CHAINES LOGISTIQUES HYBRIDES

2.1 Concepts de chaînes logistiques discrètes, continues et hybrides

La classification des éléments d'une chaîne logistique en deux types (discrets ou continus) dépend de la nature de ses composants. D'un point de vue flux, une chaîne logistique se présente comme un réseau d'entités de transformation et de stockage interconnectées par des voies de transport et de transfert empruntées par des produits. Cette caractérisation est appliquée pour distinguer les entités de transformation des flux physiques et d'information (fournisseurs, usines, stocks, distributeurs, client) et la connexion entre ces entités. Le transport est considéré comme un élément discret (Figure 1). Par la suite Nous distinguons trois types de chaînes logistiques:

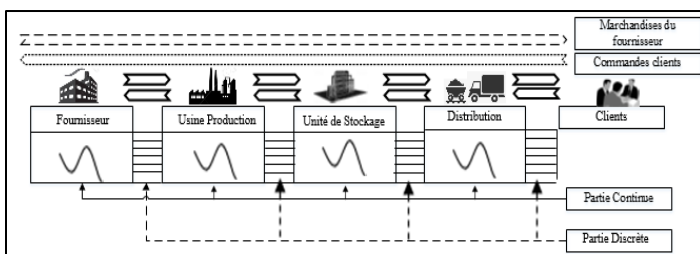


Figure 1. Partie discrète et continue de la chaîne logistique

2.1.1 Chaîne logistique continue

Une chaîne logistique continue : est une organisation intégrée de processus de transformation séparés par des stocks et liés à un ou plusieurs points d'entrées et de sorties. Cette organisation est caractérisée par un enchaînement de processus continus allant de l'amont de la chaîne logistique jusqu'à l'aval. Ces processus continus ont pour vocation de transformer un flux entrant en un flux sortant, chacun de ces flux est caractérisée par sa nature physique (type de produit) et son débit. Chaque stock séparant deux processus continus est considéré comme un stock partagé (un stock d'entrée d'un processus composant continu est un stock de sortie du processus précédent), caractérisée par le numéro et la référence du produit et par sa capacité maximale et son niveau utilisé. Le temps moyen de traitement des flux dans ces processus composants continus peut être calculé analytiquement.

2.1.2 Chaîne logistique discrète

Une chaîne logistique discrète : est composée d'un enchaînement de processus composants de transformation d'un flux discret, séparés par des stocks et liés à un ou plusieurs points d'entrées et de sorties. Ce flux discret peut être un produit fini ou un composant (ou un lot des deux), que l'on peut désigner par « entité ». Ces processus de transformation discrets, prélève un ou plusieurs entités dans un ou plusieurs stock, pour les traiter et ensuite les mettre dans un ou plusieurs stocks de sortie, caractérisés par une capacité maximale correspondants au nombre d'entités requis.

2.1.3 Chaîne logistique hybride

Une chaîne logistique hybride, constitue l'intégration des deux types de processus discret et continu définis auparavant. Elle combine à la fois l'écoulement de flux et la circulation des entités. Sa représentation se fait par l'enchaînement de ces processus et des stocks, tout en définissant les règles de conversion des flux et/ou des entités entre deux processus successifs discrets et/ou continus.

2.2 Techniques de modélisation et simulation des chaînes hybrides

Notre problème s'intéresse à la modélisation / simulation d'une chaîne logistique hybride pour vérifier la viabilité des décisions prises par l'optimisation à un niveau fin et évaluer leurs performances.

Les différentes techniques de modélisation / simulation de la chaîne logistique peuvent être présentées selon le type de problèmes modélisés et le niveau de décision utilisé.

2.2.1 Niveaux de décisions liées à la modélisation / simulation des chaînes logistiques

Les décisions de pilotage dans les chaînes logistiques peuvent être classées en trois niveaux en fonction de la fréquence à laquelle une décision est prise et du laps de temps pendant lequel elle a un impact [Anthony, 1965] [Chopra et Meindl, 2007]. Les décisions stratégiques traitent généralement de problèmes touchant l'ensemble de l'entreprise et s'étendant sur une période allant de 2 à 5 ans, telles que la configuration de la chaîne logistiques et l'allocation des ressources. Le plan stratégique est développé à un niveau agrégé (familles de produits). Prendre des décisions à ce niveau est difficile, car les demandes des clients sont très incertaines. Par conséquent, la modélisation et la simulation stochastiques sont nécessaires pour élaborer un plan stratégique. Les décisions tactiques impliquent des activités à moyen terme, c'est-à-dire sur une période allant d'un mois à un an, et impliquent des problèmes liés à la planification de la production et la coordination tout au long de la chaîne logistique. A ce niveau, la prévision de la demande peut être simplement une estimation. Si la prévision de la demande est une estimation avec des caractéristiques stochastiques, la simulation est le meilleur choix. Les décisions opérationnelles impliquent normalement des décisions à court terme liées aux activités quotidiennes. Le but de ces décisions consiste à traiter les commandes des clients entrants de la meilleure façon possible, compte tenu des politiques de planification et de conception de la chaîne d'approvisionnement déjà définies. Traditionnellement les méthodes mathématiques d'optimisation sont utilisées à ce niveau comme la programmation linéaire, la programmation entière et la programmation entière mixte. [Lee et al., 2002]

2.2.2 Techniques de modélisation / simulation mobilisées pour les chaînes logistiques hybrides

La simulation à événements discrets (DES) et la dynamique de système (SD) sont deux approches de modélisation / simulation pour les chaînes logistiques discrètes et continues respectivement. Ces deux approches sont largement utilisées comme des outils d'aide à la décision dans la gestion de la chaîne logistique. Selon [Tako et Robinson, 2012], Il existe une conviction répandue selon laquelle la SD est principalement utilisée pour modéliser les problèmes à un niveau stratégique, tandis que DES est utilisé à un niveau opérationnel / tactique. Ces deux techniques, sont généralement conçus pour comprendre le comportement des

systèmes au fil du temps et de comparer leurs performances dans différentes conditions [Sweetser, 1999].

Les deux techniques présentent certaines différences techniques de modélisation liées à leurs principes sous-jacents. Par exemple, DES modélise les systèmes sous la forme d'un réseau de files d'attente et d'activités où les changements d'état se produisent à des instants précis, tandis que les modèles SD représentent un système sous la forme d'un ensemble de stocks et des flux où les changements d'état se produisent continuellement dans le temps. [Brailsford et Hilton, 2001].

Compte tenu de la nature des problèmes modélisés à l'aide de chaque technique de simulation, l'approche du SD est jugée appropriée lorsqu'on adopte une perspective « distante » (au sens stratégique) où les événements et les décisions sont vus sous la forme de modèles de comportement et de structures du système [Richardson, 1991]. La SD se concentre principalement sur les questions stratégiques à un niveau agrégé. Elle a été utilisée aussi pour étudier l'impact de l'effet coup de fouet [Rozman et al., 2014]. Quant à l'approche DES, elle a été appropriée aux niveaux décisionnels tactiques et opérationnels. En outre, la DES a tendance à être pratique pour les analyses de processus détaillées, l'utilisation des ressources, la mise en file d'attente et relativement pour les analyses à court terme [Kellner et al., 1999].

Plusieurs approches sont utilisées pour la modélisation / simulation des chaînes logistiques hybrides. La première consiste à combiner les deux approches DES et SD. Par exemple dans [Rabelo et al., 2005], pour étudier un système d'entreprise de fabrication intégré, le DES a été utilisé pour modéliser les décisions de production locales de certaines parties de l'entreprise, tandis que le modèle de SD prenait en compte les effets à long terme de ces décisions sur l'ensemble de l'entreprise et les interactions entre les décisions prises à différents niveaux de gestion. La deuxième consiste à utiliser une des deux techniques de modélisation pour décrire le système hybride (cette partie va être détaillée en deuxième partie).

3 ANALYSE DE LA LITTÉRATURE : MODELISATION ET SIMULATION DES CHAINES HYBRIDES ET INTEGRATION SIMULATION / OPTIMISATION

Notre objectif de cette revue de littérature est de présenter les techniques déjà utilisées pour modéliser et simuler les chaînes logistiques hybrides par la simulation à événements discrets, ainsi que les approches hybrides de couplage optimisation / simulation émergent dans la littérature sur la planification des chaînes logistiques hybrides.

3.1 Modélisation et simulation des processus hybrides

La modélisation et la simulation hybride fait référence à une combinaison des aspects discrets et continus pour analyser un système complexe. L'objectif de cette analyse de la littérature est d'explorer l'utilisation de différentes techniques de modélisation et simulation des chaînes logistiques hybride. Plusieurs aspects et conceptions ont été utilisés pour modéliser l'aspect hybride des chaînes logistiques. La première conception est basée sur l'utilisation de deux modèles de simulation sur des niveaux de décisions différents. Généralement le SD est utilisé à un niveau stratégique pour modéliser le système globale de l'entreprise, et le DES est dédiée pour la modélisation des unités sélectionnées de l'entreprise, en particulier aux niveaux opérationnel et tactique de la prise de décision. Ainsi plusieurs approches de simulation

hybride (SH) sont adoptées pour identifier les conceptions de méthodes mixant les deux méthodes SD et DES, pour modéliser les processus continus et discrets respectivement. La première approche consiste à utiliser les deux méthodes en parallèle. [Morecroft et Robinson, 2006] présentent un projet qui applique DES et SD au même problème de modélisation d'une pêcherie à des fins de comparaison. L'objectif est d'examiner la manière dont les deux méthodes peuvent être considérés comme complémentaires lorsqu'ils sont utilisés en parallèle. La deuxième approche consiste à une combinaison séquentielle des deux méthodes dans les deux sens (SD puis DES ou DES puis SD) avec des dominances différentes. [Brailsford et al., 2004] discutent d'un projet qui peut être décrit comme la combinaison séquentielle des deux méthodes: SD puis DES. Cette étude de cas a été lancée en tant que projet de développement durable, où le modèle SD a été utilisé pour capturer l'ensemble du système de problèmes étudié, tandis que le modèle DES a été rapidement mis au point pour se concentrer sur une partie spécifique du système. Il existe dans la littérature d'autres exemples qui utilisent la même approche [Chatha et Weston, 2006] [Su et Jin, 2008]. La troisième approche décrit l'interaction des deux méthodes. [Venkateswaran et al., 2004] présentent un cas dans lequel un modèle SD interagit avec un modèle DES, le modèle DES capture un sous-système du modèle SD et de nouvelles valeurs optimales pour des variables spécifiques extraites du modèle DES sont introduites dans le modèle SD. La quatrième approche consiste à intégrer les deux méthodes. Dans [Rbello et al., 2016], Le DES interagit avec le modèle de SD global dans une approche de rétroaction intégrative dont l'objectif est d'offrir un outil fiable de prise de décision et d'analyse des performances permettant de prendre en compte les interactions et les interdépendances au sein des systèmes d'entreprise intégrés. Dans le même sens [Helal et al., 2007] présentent un projet utilisant l'intégration complète de SD et DES qu'ils appellent SDDDES. Ce cas particulier utilise la modélisation à temps continu avec l'inclusion d'événements discrets pour simuler une entreprise de fabrication. Ce modèle combiné préserve l'intégrité des deux paradigmes de simulation. Plusieurs auteurs ont développés la même approche [Reiner et Trcka, 2004] [Albrecht et al, 2014]. Une autre approche de modélisation des chaînes logistiques hybrides consiste à combiner des aspects déterministes et stochastiques (dynamiques) d'un système pour évaluer certains critères de performance. L'objectif n'est pas la recherche d'une solution optimale mais le test de stratégies. [Ingalls, 1998] souligne que seul une démarche de simulation permet de trouver des solutions robustes face aux systèmes complexes soumis à des variances importantes des variables de décisions. Car dans un modèle d'optimisation, face à de telles variations, la fonction objectif peut tout simplement changer d'une période à une autre. En effet, le facteur temps est important dans le pilotage de tels systèmes, et malheureusement les modèles d'optimisation ne permettent pas l'intégration de ce fait de façon systématique.

3.2 Couplage simulation / optimisation

Plusieurs approches hybrides d'optimisation-simulation émergent dans la littérature sur la conception et la planification de la chaîne logistique. [Truong et Azadivar, 2003] ont développé un environnement permettant de résoudre les problèmes de conception de la chaîne d'approvisionnement, où ils associent la simulation à des algorithmes génétiques et à des programmes entiers mixtes. Les décisions stratégiques concernant la

localisation des installations et la sélection des partenaires sont prises en compte. Dans ce sens les travaux de [Lee et Kim, 2002], montrent une combinaison de simulation et d'optimisation dans le cas d'un système de production et de distribution. La simulation est utilisée pour vérifier les hypothèses de capacité utilisées pour un modèle linéaire plus simple dans un environnement plus réaliste avec des pannes de machines stochastiques. Dans [Umeda et Lee, 2004] les auteurs décrivent une conception d'un outil générique permettant la mise en œuvre de scénarios de simulation d'une chaîne logistique. Le modèle fonctionne sous deux stratégies de planification : planification sur stocks ou planification à la commande. Ils décrivent également les différentes données nécessaires pour interfacer l'outil de simulation. La simulation à événements discrets et la programmation linéaires (mixte-entière) sont largement utilisées pour la planification de la chaîne logistique. [Almeder et al., 2009], combinent un modèle d'optimisation et une simulation à événements discrets destinées à faciliter les décisions opérationnelles. Sur la base des simulations initiales, les paramètres de coût, les temps de production et de transport sont estimés pour le modèle d'optimisation. La solution du modèle d'optimisation est traduite en règles de décision pour la simulation à événements discrets.

Une synthèse des différents travaux étudiés, portant la partie modélisation / simulation, est donnée dans une grille (Tableau 1) ; Cette dernière indique pour chaque article étudié, la nature du problème considéré, le niveau décisionnel étudié (niveau ou stratégique, tactique ou opérationnel). En plus du niveau de décision on s'intéresse aussi à étudier le choix de la technique de modélisation / simulation utilisée ; DES: la simulation à événements discrets, SD: la dynamique du système, et SC: la simulation combinée vis-à-vis des chaînes logistiques hybrides. Ainsi pour la simulation combinée, nous distinguons les différentes approches de combinaison des différents techniques de modélisation / simulation [Morgan et al., 2016]:

L'approche parallèle : Dans cette approche, les méthodes sont appliquées de manière totalement indépendante pour permettre de mieux comprendre le même problème et de formuler des hypothèses sur les raisons du comportement observé. Les deux méthodes ont une vision identique de la situation globale du problème, définissant la même limite de système dans le but de capturer la même limite de modèle et les mêmes résultats. Les deux méthodes s'appliquent d'une manière équitable.

L'approche séquentielle : Dans cette approche, Le premier modèle SD est utilisé et appliqué intégralement pour capturer l'ensemble du système de problèmes étudié, tandis que le deuxième modèle DES est rapidement mis au point pour se concentrer sur une partie spécifique du système. Le DES est donc utilisé en complément du premier modèle.

L'approche interactive : Dans cette approche, le premier modèle SD est utilisé pour donner une vue d'ensemble du système et le DES représente une partie spécifique du système. Les deux méthodes ont la même dominance dans le développement d'un projet. Les deux modèles sont développés dans le but de créer un modèle final unique dans lequel les deux méthodes interagissent en échangeant les données.

L'approche intégrée : Dans cette approche, les deux méthodes prennent la même vue du système, définissant la même limite. Les caractéristiques du modèle DES sont utilisées pour représenter des éléments du système qui n'ont pas été capturés avec un niveau de granularité suffisant dans un modèle SD. En raison des

conceptions différentes du DES et du SD et il est donc nécessaire d'indiquer clairement le rôle que chaque méthode va jouer dans le modèle intégré.

Tableau 1. Analyse de la littérature

Auteurs	Nature du problème	Niveau de décision			Technique de simulation				
		Stratégique	Tactique	Opérationnel	SD	SED	SC		
							Parallèle	Séquentielle	Interactive
Lee et al (2002)	Gestion des stocks de l'amont à l'aval de la chaîne logistique	X							X
Rozman et al (2014)	Effets de l'investissement dans l'industrie sucrière sur l'économie régionale et l'environnement	X			X				
Helal et al (2007)	Développement d'une approche hybride de simulation d'un système manufacturier intégrée qui englobe les différents niveaux de gestion	X	X	X					X
Giambiasi et Carmona (2006)	Développement d'une approche généralisée à événement discret pour un système hybride			X	X				
Bahri et al (2008)	Ordonnement de la production continue / discontinue			X					X
Melouk et al (2013)	Outil d'aide à la décision pour étudier les stratégies de production visant à réduire les coûts dans une usine d'acier	X	X		X				
Morcroft et Robinson (2006)	Etude comparative de deux approches pour analyser la dynamique d'une pêcherie	X	X			X			
Brailsford et al (2004)	Etude des effets relatifs aux interventions d'un système de santé d'urgence	X	X				X		
Rabelo et al (2005)	Impact des décisions de production sur les mesures de performance au niveau de l'entreprise.	X	X						X
Stchedroff et Cheng (2003)	Analyse des effets de la propagation des événements sur une chaîne logistique			X	X				
Chatha et Weston, (2006)	Soutien décisions de gestion dans la conception et la transformation d'entreprises de fabrication complexes	X	X				X		
Senz et al (2009)	Outil d'aide à la décision en temps réel			X					X
Weston et al (1999)	Planification de la capacité de production		X		X				
Venkateswaran et son (2005)	Planification de la production		X	X					X
Su et Jin (2008)	La refonte et la mise en oeuvre d'un centre de service de santé	X	X			X			
Chen et al (2002)	Détermination de la meilleure configuration d'un système logistique		X		X				
Truong et Azadivar (2003)	La conception d'un réseau de chaîne logistique en tant que système intégré avec plusieurs niveaux de fournisseurs	X							X
Lee et Kim (2002)	Evaluation d'un système de production et distribution		X						X
Reiner et Trecka (2004)	Interaction entre le système qualité et les processus de la chaîne logistique	X							X
Albrecht et al (2014)	Fournir une aide à la décision pour concevoir un système de production variable	X							X

L'utilisation de la simulation à événement discrets, pour simuler les chaînes logistiques hybrides, nécessite des techniques de traduction permettant la représentation d'un processus continu par un processus discret. Dans la troisième partie nous regarderons comment la DES est utilisée pour modéliser les chaînes logistiques hybrides

4 INTEGRATION OPTIMISATION / SIMULATION A EVENEMENT DISCRETS POUR LA PLANIFICATION D'UNE CHAINE HYBRIDE

Afin de coupler le modèle d'optimisation et le modèle de simulation, nous devons d'abord définir la conception des deux modèles, les données requises et la manière dont elles doivent être échangées. Dans la première partie, le contexte et le problème industriel sont présentés. En deuxième partie nous décrivons la modélisation / simulation de la chaîne hybride par la simulation à événements discrets, tandis que la deuxième partie consiste à présenter le modèle d'optimisation associé. Le but est d'évaluer la solution de l'optimisation par le module de simulation pour une meilleure planification de la chaîne logistique hybride étudiée.

4.1 Contexte et problème industriel étudié

Le présent travail est une application liée à l'industrie des procédés chimiques (IPC). Nous nous occupons en particulier de la mise en œuvre d'un modèle intégrée de planification de la production pour l'aide à la décision de sites de production de produits chimiques hautement intégrés produisant des produits en vrac dédiés à différents types d'engrais. Cependant, nous notons que le modèle proposé est général et peut être appliqué à d'autres types

d'industries. Pour ce problème, nous considérons un modèle de flux de réseau d'usines chimiques où le système de fabrication en une étape est composé de N sites pouvant potentiellement produire divers produits distribués par l'entreprise. Nous supposons que la conception de la capacité est faite lors de la conception de l'usine. Chaque site de production est composé d'un ensemble de lignes de production ayant des capacités différentes et capables de produire toute famille de produits demandée par le client final. La famille de produits finis en vrac peut être stockée dans l'un des hangars de stockage et / ou transportée vers les installations de distribution où des camions et/ou des wagons de fret en vrac sont chargés pour une livraison au client. Le problème décisionnel à traiter est axé sur les questions de planification de la production à long terme / stratégique. La Figure 2 présente une vue globale du système étudié. A ce niveau, le système étudié est décrit par les éléments suivants: (i) un système de fabrication composé de nombreuses usines constituées de plusieurs lignes de production, hangars de stockage et des convoyeurs de transport internes, (ii) un système de manutention composé de convoyeurs à bandes qui transportent les produits finis vers des points de distribution, (iii) Une famille de produits composée d'un ensemble de produits variés, chaque famille f ayant sa propre demande.

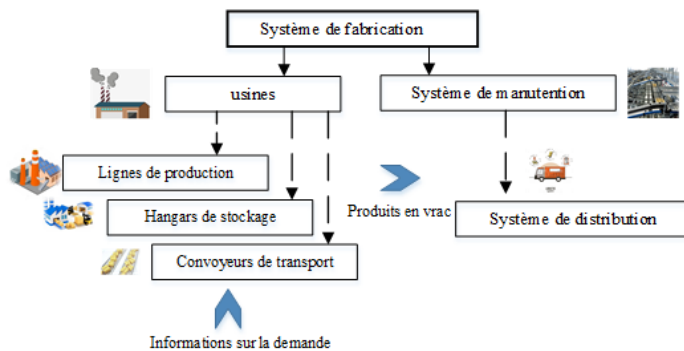


Figure 2. Système de fabrication globale

4.2 Modélisation / simulation de la chaîne logistique hybride par la Simulation à événements discrets

La traduction d'un processus continu en un processus discret se diffère en fonction du système étudié. Elle est généralement immédiate lorsque le processus continu est connecté à un processus discret est caractérisé par une opération de transport (d'un lot de liquide et/ou de granulé). La modélisation de ce processus continu par la simulation à événements discrets se base sur la discrétisation de flux d'entrée du système de production avant son admission dans un stock. Dans cette partie, nous détaillerons les caractéristiques des éléments de base d'un DES, ensuite nous décrirons la modélisation / simulation du système décrit auparavant.

4.2.1 Eléments de base d'un DES

La modélisation d'un système de production par la simulation à événements discrets nécessite la mobilisation d'un ensemble de primitives de base ; des items qui circulent dans le système et qui sont émis et introduits dans le système par des points d'entrées, ensuite ces items sont traités dans des processeurs pendant une durée donnée, et stockés dans des stocks qui peuvent être transitoires ou caractérisés par un temps d'attente (durée minimale

de séjour), par la suite ces items quittent le système par des points de sortie. La liaison entre ces différentes primitives est assurée par des flèches.

Item : Modélise les objets ou les personnes dans un système productif, ou des informations (commandes ...), qui arrivent dans un système pour subir un ensemble de traitements. L'objectif étant de contrôler le flux circulant dans le système. Chaque item est caractérisé par des attributs ou des valeurs spécifiques appelées labels. Chaque label est caractérisé par un cycle de vie, qui décrit la succession des points de passage entre son arrivé et son départ du système productif.

Point d'entrée : Correspond à un générateur d'items dans un système productif. Il permet d'introduire l'item dans le système en lui affectant les valeurs initiales définies par les labels. Chaque item entrant correspond à une loi d'arrivée stochastique ou déterministe. Cette loi caractérise la distribution de probabilités de l'intervalle de temps séparant deux arrivées successives d'items au point d'entrée considéré.

Processeur : A pour fonction d'exécuter un traitement d'un ou plusieurs items, prélevés dans un ou plusieurs stocks. Une fois le traitement achevé, le produit résultant, qui peut correspondre à un ou plusieurs items, est envoyé dans un ou plusieurs stocks. Ce traitement a pour objet de modifier les caractéristiques de ces items par la transformation, l'analyse ou le transport. Il peut aussi modifier les valeurs des labels associées à ces items. Ce processeur est caractérisé par un temps opératoire qui peut être déterministe ou aléatoire. Ce processeur peut prélever plusieurs items d'un seul ou plusieurs stocks, ces items peuvent être de la même nature, donc l'opération de prélèvement suit une logique de lotissement, dans le cas contraire, Si ces items sont de nature différente (des labels différents), l'opération suit la logique d'assemblage. Ces processus mobilisent l'utilisation d'un ou plusieurs ressources (humaines ou matérielles). Lorsque le processeur à un temps opératoire nul, Il est qualifié d'un processeur fictif qui peut être utilisé dans le système productif pour décrire le routage en entrée ou en sortie de plusieurs items. Dans un processeur, il est également possible d'ajouter des labels supplémentaires en plus des labels déjà définis dans le point d'entrée, Pour un meilleur pilotage du système productif.

Stock : C'est un type particulier d'une file d'attente. Il peut recevoir des items provenant d'un ou plusieurs points d'entrées ou processeurs. C'est un endroit où séjournent les items sans subir un traitement. Il est toujours passif, dans le sens qu'il n'envoie pas d'items vers les processeurs sans que ceux-ci n'en fassent explicitement la demande. Un stock possède plusieurs caractéristiques (capacité maximale, durée maximale de séjour d'un item...).

Point de sortie : C'est un point de libération de l'item ayant circulé dans le système productif. A des fins de contrôle lors de la mise au point d'un modèle de simulation, un point de sortie peut être remplacé par un stock fictif.

Route : Correspond à des flèches reliant les différentes primitives citées auparavant. La Route représente les déplacements des items dans le système productif. Un temps de déplacement est parfois associé à ces déplacements. Le chemin emprunté par les items est contrôlé par les valeurs des labels et les règles de pilotage associées.

Ressource : est un facteur productif (matériels, opérateurs...) indispensable à l'exécution d'une opération sur un item dans le processeur. Elle peut être partagée par plusieurs processeurs. Il est

possible de définir un temps de transport d'une ressource pour chaque couple origine-destination crée dans le système productif. Plusieurs caractéristiques sont associées à une ressource ; comme la disponibilité de la ressource qui peut être fixe ou variable au cours d'une période donnée.

4.2.2 Processus de modélisation

La modélisation d'un système de production à flux hybride nécessite la mise en œuvre d'un processus de modélisation qui recommande la construction successive de deux modèles nommés modèle de connaissance et modèle d'action. Le modèle de connaissance décrit le fonctionnement des éléments du système et les interactions entre eux. Ce modèle se traduit dans un formalisme mathématique, dans un langage de programmation, ou dans un langage de simulation, etc. pour modéliser notre système, un modèle de connaissance représenté sous la forme d'un réseau d'écoulement de flux a été conçu. A partir de celui-ci, deux modèles d'action ont été développés. Un modèle de simulation et modèle d'optimisation.

4.2.3 Module de simulation

Pour réaliser notre modèle de simulation à événements discrets, nous avons utilisé le logiciel Simul8. Ce modèle a pour objectif de modéliser et simuler l'évolution du flux physique à l'intérieur d'un système productif de production, de stockage et de chargement des engrais. Le modèle se caractérise par la circulation de trois items différents. Le premier item correspond aux familles de produits sortant des lignes de production associées à chaque usine, transportés, puis stockés dans un ou plusieurs hangars de stockage avec un temps de séjour nul, caractérisé par un label « $L_Temps = 0$ » (le stock ici est considéré comme transitaire), ensuite il est repris de ces lieux de stockage pour être chargés en utilisant un système de convoyage composé d'un ensemble de convoyeurs à bande. Le deuxième item correspond aux familles de produits, fabriquées sur les lignes de production, transportées et stockées dans les hangars de stockage avec un temps de séjour minimal ($L_Temps = t$) (correspond à la période dans l'horizon de la planification défini par l'optimisation). Quant au troisième item, il caractérise les familles de produits déjà stockées, et qui vont être repris par les convoyeurs de déstockage depuis les hangars de stockage (avec une quantité inférieure ou égale la quantité déjà stockée), puis chargées jusqu'à client final (point de sortie). La figure 3 illustre le cheminement de ces trois items.

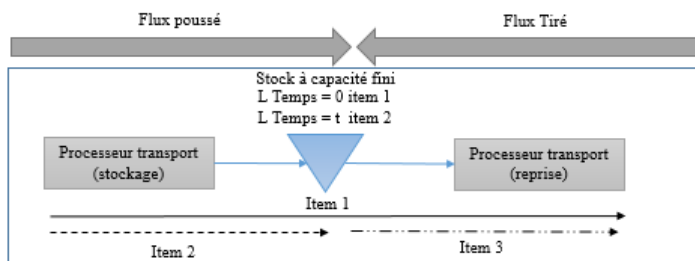


Figure 3. Cheminement des items

Le modèle est composé principalement de :

1. Ressources du système productif :

Les différentes ressources du système productif à savoir : les lignes de production, les hangars de stockage, les convoyeurs de stockage, de reprise et de chargement. Tous ces éléments du système productif sont modélisés par une primitive ressource. La création de ces ressources est antérieure à leur utilisation.

L'exécution d'une opération (production, transport, ...) dans une activité, peut mobiliser une (ou plusieurs) ressources.

2. Alimentation du système productif :

L'alimentation du système productif est assurée par un point d'entrée, utilisée pour émettre les trois types d'items. Un label « L_Type » à trois valeurs différentes est affecté à chaque type d'item pour le différencier de l'autre type. Des labels associés à chaque type de ressource, ainsi qu'un label « $L_quantité$ » qui définit la quantité produite, stockée et transportée par chaque item, et un label $L_Famille$ qui définit chaque famille de produit sont lues dans un tableau et affectés à l'item entrant. Un autre label temporel « $L_période$ » est associé à chaque lot de familles de produits pour définir la période correspond à chaque entrée d'un lot d'items. Le nombre d'items dans chaque lot est défini en sortie du point d'entrée, ce nombre peut être fixe ou variable (suit une loi de probabilité). Ce point d'entrée d'alimentation est suivi par un processeur fictif (à un temps opératoire nul) qui permet de tester pour chaque item, la disponibilité des ressources associées. Ce test se fait avant que l'item quitte ce processeur. Si toutes les ressources affectées à l'item sont disponibles, l'item continue son chemin, sinon il attend dans un stock jusqu'à libération des ressources mobilisées.

3. Affectation des ressources :

L'affectation des différentes ressources et leur routage mobilise l'utilisation des processeurs fictifs, avec un temps opératoire nul, chaque type de ressource est appelé par un de ces processeurs fictifs suivant un label associé à chaque type de ressource. Ce processeur fictif a pour fonction de prélever du stock amont des items pour les pousser dans le stock aval en appelant les ressources nécessaires associés aux valeurs des labels affectés à ces items (Figure 4). Ce prélèvement est vérifié par le programme suivant exécuté en admission de l'item.

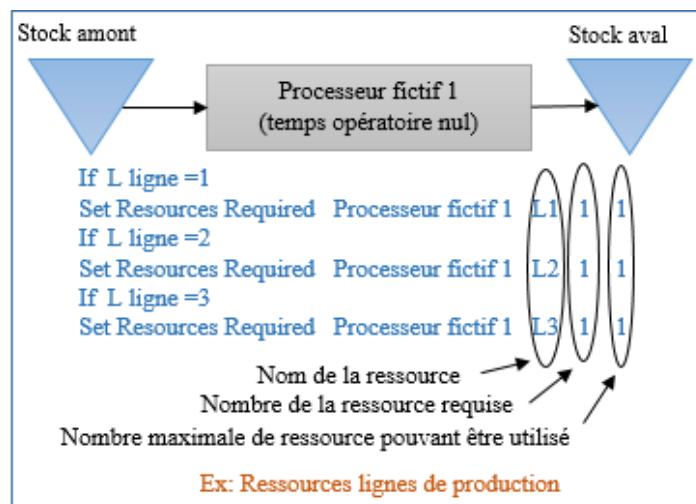


Figure 4. Affectation des ressources

4. Gestion des stocks :

La gestion de hangars de stockage se fait dans des primitifs stocks à capacité limitée. Dans les processus continus la capacité des stocks est exprimée en poids ou en volume. Chaque stock est caractérisé par les labels ($L_capacité\ courante$ et $L_capacité\ maximale$), dont les valeurs exprimées en poids, sont initialisées au début de la simulation. Le premier label varie dynamiquement en fonction de l'utilisation instantanée du stock, tandis que le deuxième label est statique et garde sa valeur définie à

l'initialisation. Trois cas de figure sont présentés en fonction du type d'item :

- *Item 1* : Dans la gestion de la capacité du stock, l'item 1 entrant est caractérisée par le débit de la ligne de production associé (caractérisé par le label ($L_DébitLigne$), un test est fait, avant l'affectation des ressources associées à cet item, par un processeur fictif, avec un temps opératoire nul, qui n'accepte l'item que si la capacité résiduelle est suffisante ce qui est réalisé par le programme suivant exécuté avant le prélèvement de l'item.

$Si \text{ Stock_L_capacité courante} + L_DébitLigne < \text{Stock_L_capacité maximale}$

Alors admettre l'item dans processeur

Sinon bloquer le prélèvement de l'item

A l'entrée de l'item 1 dans le stock, la mise à jour de la capacité courante es effectuée par le programme suivant :

$\text{Stock_L_capacité courante} = \text{Stock_L_capacité courante} + L_DébitLigne$

À la sortie de l'item 1 de ce stock, la mise à jour de la capacité courant est effectuée par le programme suivant:

$\text{Stock_L_capacité courante} = \text{Stock_L_capacité courante} - L_DébitLigne$

-*Item 2* : dans ce cas, L'item 2 entrant est caractérisée par le label ($L_Quantité$), qui représente le poids de l'item qui va être séjournée dans le stock pendant une durée exprimée en label (L_Temps). Les mêmes tests de l'item 1 sont faits. Le premier test est effectué, par le même processeur fictif, avec un temps opératoire nul, qui n'accepte l'item que si la capacité résiduelle est suffisante ce qui est réalisé par le programme suivant exécuté avant le prélèvement de l'item 2.

$Si \text{ Stock_L_capacité courante} + L_Quantité < \text{Stock_L_capacité maximale}$

Alors admettre l'item dans processeur

Sinon bloquer le prélèvement de l'item

A l'entrée de l'item 2 dans le stock, la mise à jour de la capacité courante es effectuée par le programme suivant :

$\text{Stock_L_capacité courante} = \text{Stock_L_capacité courante} + L_Quantité$

À la sortie de l'item 2 de ce stock, la mise à jour de la capacité courant est effectuée par le programme suivant:

$\text{Stock_L_capacité courante} = \text{Stock_L_capacité courante} - L_Quantité$

-*Item 3* : cet item en sortie du stock est caractérisé par un Label ($L_Quantité\ sortie$), qui définit la quantité requise. Un processeur fictif à temps opératoire nul est utilisé, pour prélever du stock cette quantité. A la sortie du stock, la valeur d cette quantité est lise à jour dynamiquement en fonction de l'évolution des prélèvements par le programme suivant :

$\text{Stock_L_capacité courante} = \text{Stock_L_capacité courante} - L_Quantité\ sortie$

5. Libération des ressources :

La libération des ressources se fait en mobilisant un processeur qui a pour fonction de libérer l'ensemble des ressources mobilisées par l'item circulant dans le système productif. Cette libération se fait en sortie du système pour rendre la disponibilité des ressources déjà mobilisées pour leur utilisation par les autres items qui les appellent. Cette libération se fait un temps opératoire Δ composé d'un temps variable qui dépend des labels : $L_Quantité$ et $L_DébitLigne$ (le débit de ligne qui limite le débit de flux qui circule dans le système productif) associées à l'item, ainsi qu'un temps fixe μ (qui dépend de la longueur et la vitesse

des convoyeurs de transport). $\Delta = \mu + (L_Quantité / L_Débit\ Ligne)$.

4.3 Module d'optimisation

Une gestion efficace de la capacité et de la demande à long terme est essentielle pour toute entreprise manufacturière. Ce module d'optimisation traite un problème de la planification à long terme d'une usine de fabrication des produits en vrac composée de plusieurs lignes de production, des hangars de stockage, un système de convoyeurs et des points de distribution formant un réseau de production-stockage et distribution. Un programme linéaire mixte en nombres entiers (MILP) modélisant un problème de graphe de flux, avec une fonction bi-objectif, est proposé dont le but est de maximiser la satisfaction de la demande tout en minimisant le stock. L'objectif est de prendre des décisions stratégiques concernant la planification de la production, les niveaux des stocks et les contraintes des opérations de transport. L'importance de ces décisions conduit à l'élaboration d'un plan optimal de planification stratégique dans lequel les exigences connues doivent être satisfaites, par rapport à des capacités de production, de stockage et de transport données. L'objectif (1) est de maximiser le taux de satisfaction de la demande tout en minimisant les stocks.

$$\text{Max} \left(\sum_{f,t} M \times Dr_{f,t} - \sum_{i,f,t} I_{i,f,t} \right) \cdot \forall f \in F \ t \in T, i \in N_3 \quad (1)$$

Tels que :

$Dr_{f,t}$ Taux de satisfaction de la demande de la famille de produit $f \in F$ à la période $t \in T$;

$I_{i,f,t}$ Le stock maintenu dans le nœud de stockage $i \in N_3$ de la famille d produit $f \in F$ à la période $t \in T \cup T_0$;

Le problème présente plusieurs contraintes de capacité liées à la capacité de production, de stockage et de transport. Des contraintes de conservation des flux dans les nœuds de transport, et de conservation des stocks dans les nœuds de stockage. Des constraints de 1 demandent qui lient la demande au taux de satisfaction de la demande. Des contraintes de séjour minimal dans le stock et de production minimale des lignes de production. Le programme mathématique sous les différentes contraintes a été présenté très sommairement dans [Belil et al., 2018].

4.4 Modèle intégré : couplage optimisation / simulation

Plusieurs motivations nous amènent à faire une intégration des deux modèles d'optimisation et de simulation. La première est d'évaluer les solutions trouvées par l'optimisation qui génère une bonne solution à partir de données statiques. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires intervient dans le réel et ces aléas peuvent dégrader une solution. Le modèle de simulation vise donc dans un premier temps à tester la robustesse d'une solution trouvée par les algorithmes d'optimisation dans un environnement aléatoire. La deuxième motivation est de fournir un outil d'aide à la décision pour les planificateurs chargés de mettre en œuvre les résultats du processus d'optimisation. Ainsi, suite à une simulation, il est possible de détecter des défauts d'une configuration et d'en déduire des corrections sur certains choix stratégiques. Suite à ces corrections, de nouvelles simulations peuvent être lancées jusqu'à l'obtention de la bonne configuration. Nous proposons donc un système composé de deux modules en interaction permanente : un module d'optimisation capable de fournir une bonne solution de planification de la production, stockage et distribution des produits en vrac et un module de

simulation capable de tester cette planification. Les résultats obtenus peuvent être analysés et interprétés de manière à apporter des améliorations. Entre un modèle mathématique de planification et un modèle de simulation censé décrire au mieux le fonctionnement du système étudié. Le principe de fonctionnement est le suivant : le modèle de planification prend en paramètres la demande et la capacité du système. Il élabore un planning optimal (en termes de satisfaction de la demande). Ce dernier est passé en paramètre au modèle de simulation. Celui-ci vérifie si le planning proposé est réalisable (Figure 5).

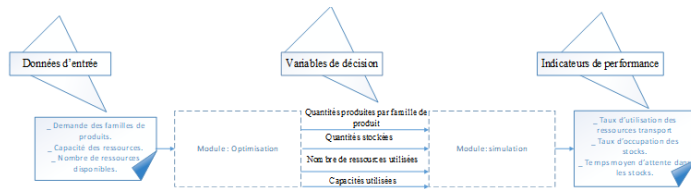


Figure 5. Couplage optimisation / simulation

5 EXEMPLE NUMERIQUE

Afin de coupler le modèle d'optimisation et le modèle de simulation, nous devons d'abord définir les données requises et la manière dont elles doivent être échangées. Nous avons organisé la démarche de structuration des données comme suit :

Structure générale du réseau : comprend le type et le nombre de ressources dans le site et les liens correspondants entre eux.

Paramètres généraux : utilisés dans les modèles de simulation et d'optimisation ces ensembles de paramètres incluent toutes les limitations de capacité, paramètres de ressource, et la demande des familles de produits.

Résultats du modèle d'optimisation : (paramètres pour la simulation) : les résultats de l'optimisation sont utilisés comme des variables de décision dans le modèle de simulation sont les quantités produites, stockés et acheminés pour chaque famille de produit, ainsi que le routage des ressources et leurs disponibilités.

Résultats du modèle de simulation : ces résultats de simulation sont principalement les indicateurs de performance sur le taux d'utilisation des ressources et le taux d'occupation des hangars de stockage.

5.1 Données d'entrées

La partie analytique de la procédure hybride est modélisée comme un MILP. Le MILP utilise une formulation standard qui optimise le taux de satisfaction de la demande tout en minimisant les stocks. Il prend en compte la demande des familles de produits ainsi que les capacités et les disponibilités des ressources comme des paramètres d'entrée. L'horizon de planification du modèle pour l'exemple numérique est supposé être de 3 mois, 6 familles de produits ont été incluses. Le système étudié se compose de 3 lignes de production, toutes ces lignes appartenant au même site et pouvant fabriquer n'importe quelle famille de produits affectée à ce site. De plus, nous disposons de 3 hangars de stockage et de 21 convoyeurs à bandes pour le transport, organisés en 8 types de convoyeurs (convoyeurs de lignes, convoyeurs de stockage, convoyeurs de reprise, convoyeurs de transfert, convoyeurs de distribution). Le modèle mathématique a été résolu en utilisant le solveur CPLEX. En sortie de ce modèle, les données sur les différentes quantités produites, stockées et transportées pour chaque famille de produits à chaque période sont présentées dans

le tableau 1. Ainsi que le routage des ressources. Le Tableau 2 présente le type et le nombre de différentes ressources convoyeurs utilisées dans le système.

Tableau 2. Ressources convoyeurs

Type	Cv 1	Cv 2	Cv 3	Cv 4	Cv 5	Cv 6	Cv 7	Cv 8
Nombre	3	3	3	3	3	2	2	2

Les données des différentes quantités produites, stockées et transportées pour chaque famille de produits à chaque période sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Résultats de l'optimisation

Période 1		
Famille	Item	Quantité
1	1	40122
2	1	16110
3	1	6755
4	2	24183
6	1	1352
	2	148
Période 2		
Famille	Item	Quantité
1	1	20282
	1	1065
2	1	21948
3	1	9901
4	2	15418
	2	3505
	3	24183
6	1	1381
	3	148
	2	5881
Période 3		
Famille	Item	Quantité
1	1	4645
	1	20515
	1	30256
2	1	24563
3	1	10172
	2	1093
4	2	27710
	3	18923
5	1	10212
6	3	5881
	2	7116
	1	1529

Les données sur Le routage des différentes ressources (lignes de production, convoyeurs, hangars de stockage) pour chaque quantité produite, sont récupérées dans un fichier Excel, puis recopiées dans l'information store du simulateur. Le Tableau 4 illustre l'organisation de ces données.

5.2 Résultats

La simulation est alimentée par les données du module d'optimisation présenté dans le Tableau 4, il contient pour chaque type d'item, la famille de produit produite, la quantité produite, l'affectation de la ligne de production, l'affectation des hangars de stockage, ainsi que l'affectation des convoyeurs de transport. Les résultats présentés dans le Tableau 5 montrent un exemple des résultats sur les ressources mobilisées (lignes 1 to 3, convoyeurs 1 to 12) durant les deux périodes 1 et 2, indiquant le pourcentage

de disponibilité d'une ressource utilisée, son utilisation maximale et minimale durant le temps de simulation du modèle.

Tableau 4. Routage des ressources

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
ligne	Cv1	Cv2	Cv3	Cv4	Cv5	hangar	Cv6	Cv7	Cv8	Quantité	TEMPS	Famille	
2	3	3	1	1	1	1	1	2	1	1	40122	0	1
3	3	3	1	1	1	1	1	1	2	1	16110	0	2
4	1	1	3	2	2	2	2	1	2	1	6755	0	3
5	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	24183	0	4
6	2	2	3	1	1	1	1	1	2	1	1352	0	6
7	2	2	3	1	1	1	1	0	0	0	148	0	6
8													
9	3	3	3	2	2	2	2	1	2	1	20282	0	1
10	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1065	0	1
11	2	2	1	3	3	3	3	2	1	2	21948	0	2
12	1	1	2	1	1	1	1	2	1	2	9901	0	3
13	2	2	1	3	3	3	3	3	2	1	15418	0	4
14	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	3505	0	4
15	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	24183	0	4
16	2	2	3	1	1	1	1	1	2	1	1381	0	6
17	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	148	0	6
18	2	2	3	2	2	2	2	1	2	1	5881	0	6
19													
20	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	4645	0	1
21	2	2	3	1	1	1	1	2	2	2	20515	0	1
22	3	3	2	2	2	2	2	1	1	2	30256	0	1
23	2	2	1	3	3	3	3	2	2	2	24563	0	2
24	1	1	3	1	1	1	1	1	2	2	10172	0	3
25	2	2	2	3	3	3	3	0	0	0	1093	0	3
26	1	1	3	3	3	3	3	0	0	0	27710	0	4
27	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	18923	0	4
28	2	2	1	2	2	2	2	1	1	1	10212	0	5
29	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	5881	0	6
30	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	7116	0	6
31	2	2	3	3	3	3	3	1	2	2	1529	0	6

Tableau 5. Routage des ressources

	Utilization %	Minimum Use	Current Use	Average Use	Maximum Use
L1	36,011	0	0	0,36	1
L2	61,951	0	0	0,62	1
L3	59,751	0	0	0,598	1
C1	36,011	0	0	0,36	1
C2	61,951	0	0	0,62	1
C3	59,751	0	0	0,598	1
C4	50,753	0	0	0,508	1
C5	34,12	0	0	0,341	1
C6	67,194	0	0	0,672	1
C7	39,5	0	0	0,395	1
C8	51,341	0	0	0,513	1
C9	30,236	0	0	0,302	1
C10	39,5	0	0	0,395	1
C11	51,341	0	0	0,513	1
C12	30,236	0	0	0,302	1

Les Figures 7, 8 et 9 montrent l'utilisation des trois hangars de stockage durant les deux périodes 1 et 2. Il indique le nombre moyen des items qui traversent ces hangars durant les deux premières périodes. Un exemple du stock 1, qu'il a été utilisé par les items en moyenne 84 %.

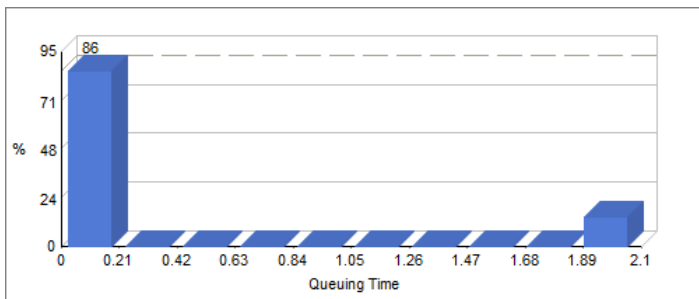


Figure 6. Temps d'attente Hangar 1

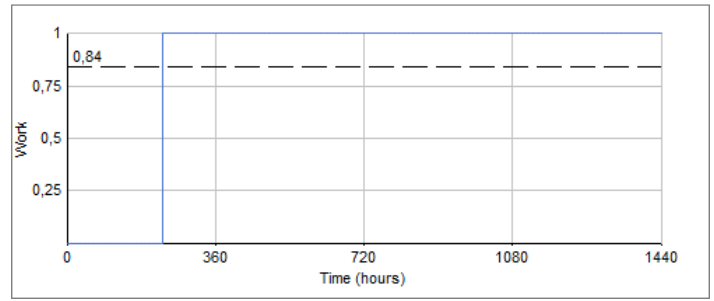


Figure 7. Utilisation hangar 1

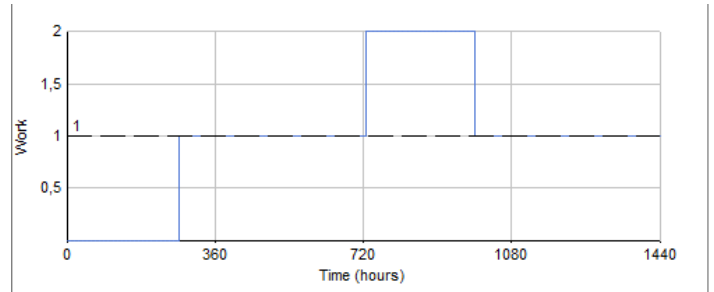


Figure 8. Utilisation hangar 2

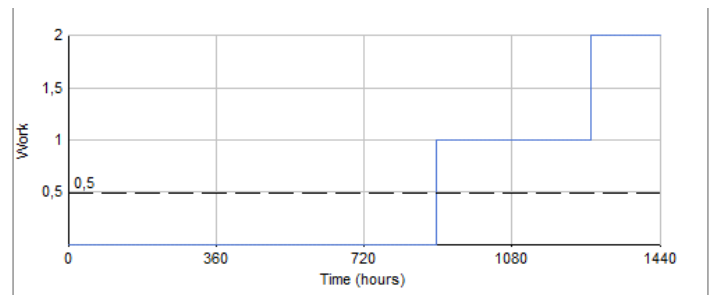


Figure 9. Utilisation hangar 3

La Figure 6, montre le temps d'attente des items passés sur le hangar 1. Le temps moyen passé de ces items dans le hangar 1 est de 29.8%.

L'évaluation de tous les résultats de la simulation et de la performance du système montre que la planification obtenue par l'optimisation linéaire est réalisable.

6 CONCLUSION

L'étude menée dans ce travail concerne la planification de la chaîne logistique hybride. Nous avons développé d'une part un module de simulation à événements discrets dans le cadre de la combinaison des processus discrets et continus. Et d'autre part, nous avons proposé une approche intégrée de modélisation / simulation et d'optimisation. Le principe de cette démarche est d'une part d'identifier les variables de décision de la simulation par l'optimisation et d'autre part d'évaluer la solution de l'optimisation. Les perspectives de ce travail devraient permettre de tester cette approche aux niveaux opérationnels et tactiques.

7 REFERENCES

Albrecht, F., Kleine, O., Abele, E., (2014) Planning and Optimization of Changeable Production Systems by Applying an Integrated System Dynamic and Discrete Event Simulation

- Approach. *Procedia CIRP*, 17, pp.386-391.
- Almeder, C., Preusser, M., and Hartl, R. F., (2009) Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? *OR spectrum*, 31(1), pp. 95-119.
- Anthony, R.N., (1965) *Planning and Control Systems: a framework for analysis*. Harvard University Press
- Bahri, P.A., Ghaeli, M., Lee, P.L., (2008) Scheduling of a mixed batch/continuous sugar milling plant using Petri nets. *Computers & Chemical Engineering*, 32, pp.580–589.
- Belil, S., Tchernev, N., Kemmoe, T.S., (2018) An Optimization Approach for a Strategic Balance of Supply and Demand in the Process Industry of Bulk Materials. *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, Lyon, France, July 8-11.
- Brailsford, S., Hilton, N., (2001) A Comparison of Discrete Event Simulation and System Dynamics for Modelling Healthcare Systems," in *Proceedings of the 26th meeting of the ORAHS Working Group 2000*, Glasgow, Scotland, pp. 18-39.
- Brailsford, S. C., Lattimer, V. A., Taranas, P., & Turnbull, J. C. (2004) Emergency and On-Demand Health Care: Modelling a Large Complex System. *Journal of the Operational Research Society*, 55(1), pp.34-42.
- Chatha, K. A., & Weston, R. H., (2006) Combined discrete event simulation and systems thinking-based framework for management decision support. *Journal of Engineering Manufacture*, 220(B), pp.1969-1981.
- Chen, E.J., Lee, Y.M., Selikson, P. L., (2002) A simulation study of logistics activities in a chemical plant, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 10(3-4), p.235–245.
- Chopra, S., Meindl, P., (2007) *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Giambiasi, N. and J. C. Carmona, 2006. Generalized discrete event abstraction of continuous systems: GDEVS formalism. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(1), pp. 47–70,2.
- Helal, L., et al., (2007) A methodology for Integrating and Synchronizing the System Dynamics and Discrete Event Simulation Paradigms," in *Proceedings of the 25th International Conference and 50th Anniversary Celebration, July 29 – August 2, 2007*, Boston, Massachusetts, USA.
- Ingalls, R. G., (1998) The value of simulation in modelling supply chains. In *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, pp. 1371-1375.
- Kellner, M.I., Madachy, R.J., Raffo, D.M., (1999) Software process simulation modeling: Why? what? how?. *Journal of Systems and Software*, 46 (2), pp.91–105.
- Lee, YH., Cho, MK., Kim, SJ., Kim, YB.,(2002) Supply chain simulation with discrete–continuous combined modeling - *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier.
- Lee, YH., Kim, SH., (2002) Production-distribution in supply chain considering capacity constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 43, pp.169–190
- 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, pp.269–276.
- Morecroft, J. D. W., Robinson, S., (2006) Comparing Discrete-Event Simulation and System Dynamics: Modelling a fishery. In: Robinson, S., Taylor, S., Brailsford, S. C. & Garnett, J., (eds.) *Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop*, Royal Leamington Spa, UK.
- Morgan, J.S., Howick, S., Belton, V., (2016) A toolkit of designs for mixing Discrete Event Simulation an System Dynamics, *European Journal of Operational Research*, 16 March, pp. 907-918.
- Rabelo, L., et al., (2005) Enterprise simulation: a hybrid system approach," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18, pp. 498-508, CLD.
- Reiner, G., Trcka, M., (2004) Customized supply chain design: problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis. *International Journal of Production Economic*, 89, pp. 217 – 229.
- Richardson, G. P., (1991) *Feedback thought in social science and systems theory*. Philadelphia. PA: University of Pennsylvania Press.
- Rozman, Č., Škraba, A., Pažek, K., Kljajić, M., (2014) The development of sugar beet production and processing simulation model—A system dynamics approach to support decision making processes. *Organizacija*, 47(2), pp. 99–105.
- 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, pp.897–905.
- Stchedroff, N., Cheng, R. C., (2003) Supply chain management simulation: modelling a continuous process with discrete simulation techniques and its application to LNG supply chains », in *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation*, pp. 1607–1611.
- Su, Y., Jin, Z., (2008) Modeling Health Service Centers with Simulation and System Dynamics. *Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSIM)*. Cambridge, UK.
- Sweetser, A., (1999) A Comparison of System Dynamics and Discrete Event Simulation," in *In Proceedings of 17th International Conference of the System Dynamics Society and 5th Australian & New Zealand Systems Conference*, Wellington, New Zealand.
- 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, pp.802–815.
- Truong, TH., Azadivar, F., (2003) Simulation based optimization for supply chain configuration design. In: Chick, S., Sánchez, P.J., Ferrin, D., Morrice, DJ., (eds) *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, pp.1268–1275
- Tzatestas, S., Kapsiotis, G., (1994) Coordinated Control of Manufacturing Supply Chains Using Multi-level Techniques. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 7, pp.206-212.
- Umeda, S., Lee T., (2004) Design specifications of a generic supply chain simulator. *Proceedings of the 2004 Winter simulation conference*.
- Venkateswaran, J., Son, Y. J., (2005) Hybrid system dynamique-discrete event simulation-based architecture for hierarchical production planning. *International Journal of Production Research*, 43(20), pp.4397-4429
- 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*, 40(2), pp. 48.