

Couplage de la modélisation énergétique à la simulation dynamique des flux de production

Meriem KOUKI, Pierre CASTAGNA, Olivier
CARDIN

LUNAM Université, IUT de Nantes – Université de Nantes,
IRCCyN UMR CNRS 6597

2 avenue du Prof. Jean Rouxel – 44475 Nantes, France
Meriem.kouki@univ-nantes.fr

Céline CORNARDEAU
TECHTEAM

50 rue Jean Zay 69800, Saint Priest, France

Résumé—La simulation à événements discrets ou la simulation dynamique des flux a souvent été un outil performant pour l'analyse des comportements des systèmes manufacturiers complexes. Cette technique avait pour but l'évaluation et l'amélioration des indicateurs de performance classiques tels que la productivité, les coûts de production, les retards et autres d'un côté, et la maîtrise des risques tels que les risques industriels et financiers d'un autre côté. Cependant, de nouveaux risques environnementaux et des coûts additionnels se présentent aujourd'hui à cause de la consommation énergétique qui ne cesse d'augmenter. Ce papier est donc un effort pour coupler la modélisation des flux énergétiques à la simulation dynamique des flux de production afin de les optimiser simultanément. Il propose une approche générique, flexible et modulable. Cette approche est basée sur les opérations liées aux flux de production et aux flux d'énergie. Elle considère les différentes interactions du système (machines, outils, opérateurs, environnement) ainsi que les paramètres pertinents influençant la consommation énergétique. Un cas d'étude sur un atelier de moulage par injection est présenté afin de montrer l'approche proposée.

Mots-clés—Simulation à événements discrets, consommation énergétique, modélisation, système de production.

I. INTRODUCTION

Compte tenu de la restriction de ses sources, de son impact significatif sur l'environnement et des coûts parfois importants qu'elle engendre, l'énergie est aujourd'hui au centre des préoccupations industrielles, sociales et politiques dans le monde entier. En effet, durant les dernières décennies, l'énergie a pris de l'ampleur et est devenu un enjeu majeur surtout pour les secteurs industriels énergivores qui voient leurs coûts de production varier en fonction des tarifications énergétiques imposées. Pour ces secteurs d'activité où la consommation énergétique peut atteindre jusqu'à 5% du CA, envisager la consommation énergétique comme un paramètre majeur dans l'optimisation du plan de charge de l'usine devient un enjeu primordial.

L'énergie semble donc devenir un enjeu stratégique sur toutes les échelles, comme prise de conscience de ce coût mais aussi de son impact sur l'environnement qui n'est pas de moins importance. En fait, notre globe terrestre se trouve face à de nombreuses menaces environnementales et exige une réponse proactive de la part de toutes les parties impliquées y compris le secteur industriel qui se positionne en tête de liste

avec un taux de 51% de la consommation totale d'énergie, soit 266 EJ¹. Ainsi, les entreprises industrielles ne sont plus en charge de respecter la qualité et les délais produits seulement, mais elles sont aussi en charge de respecter les critères industriels émergents, notamment la durabilité, par propre conscience ou par la pression politique croissante et les nouvelles directives contraignantes en vue du respect de l'environnement.

Cette prise de conscience, alliée à un coût de consommation parfois lourd, a conduit de nombreux efforts de recherche dans le sens de la réduction de la consommation énergétique en mettant en œuvre différentes stratégies d'efficacité énergétique notamment l'utilisation des énergies renouvelables, la technologie des réseaux de distribution intelligents, les techniques de conservation d'énergie et d'autres techniques développées pour cette cible.

Pour atteindre cette efficacité et identifier les pistes potentielles d'optimisation de la consommation énergétique au sein d'un système de production, une modélisation fine et efficace est indispensable. Cependant, la modélisation du comportement énergétique d'un système n'est pas simple en raison de son dynamisme élevé et nécessite également une bonne compréhension des procédés, des machines, de l'organisation du système et ses différentes interactions. Pour faire avec ce dynamisme et relever ces challenges, la simulation à événement discret (SED) est une approche prometteuse.

Or, si les logiciels de simulation dynamique des flux proposent des analyses précises en intégrant les pannes, les dysfonctionnements, les horaires et autres facteurs aléatoires ayant une incidence directe sur la production, à ce jour, aucun d'entre eux ne propose d'outil spécifique permettant l'analyse couplée des flux de production et des flux énergétiques. La conception même de la plupart de ces logiciels ne permet pas d'envisager la prise en compte d'une grandeur qui varie de manière continue comme l'énergie ou les paramètres qui l'influent.

Dans ce papier, nous proposons tout d'abord une étude bibliographique des travaux déjà réalisés dans ce contexte. Nous décrivons ensuite le concept, la méthodologie de

¹ <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=447&t=1> (consulté le 20.07.15)

l'approche proposée ainsi que l'environnement de développement. Finalement, une étude de cas concernant un atelier de moulage par injection est présentée afin de démontrer l'approche proposée. Il est à noter que ce travail s'inscrit dans le cadre du projet d'innovation stratégique industrielle ECOTHER, porté par BPI France et par le Pôle de Compétitivité ELASTOPOLE. Ce projet repose sur un consortium d'entreprises françaises des filières de transformation de polymères et d'élastomères et a pour ambition de proposer des solutions techniques pour des filières industrielles élastomères et plastiques énergétiquement efficaces.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Des efforts précédents dans la modélisation de l'énergie ont été motivés par le besoin des entreprises de prédire et évaluer leurs consommations d'énergie afin d'améliorer leurs performances économiques et environnementales [1]. Notons tout d'abord qu'en réponse aux préoccupations actuelles de la société, la communauté scientifique s'intéresse de plus en plus aux impacts environnementaux créés par la production industrielle et s'engage au quotidien à trouver des solutions d'amélioration en matière de durabilité. Dans ce contexte, Hauschild, Jeswiet et Alting [2] ont mis en place les bases de l'«évaluation du cycle de vie (ECV)», qui consiste à évaluer les répercussions globales des produits pendant leurs cycles de vie. Il s'agit de comprendre l'ensemble des flux de matières et d'énergie consommés et rejetés au cours de la fabrication de ces produits pour en établir un bilan écologique. Pour renforcer cet effort, plusieurs logiciels axés sur l'ECV ont été développés.

Cette méthodologie est souvent employée au niveau du processus unique. Cependant, le périmètre de la modélisation de l'énergie ou des paramètres liés à l'environnement en général, s'étend du niveau de processus unique ou de la machine unique jusqu'au niveau de l'entreprise entière [3].

Partant du niveau le plus bas, plusieurs chercheurs ont pointé leurs travaux sur la modélisation de la consommation énergétique d'un processus unique étant le plus petit composant d'un système de fabrication. En fait, un processus correspond souvent à une machine qui absorbe des entrées de la techno-sphère notamment l'énergie, les matières premières, les produits semi-finis et autres consommables, et génère des sorties à la fois pour la techno-sphère et l'écho-sphère dans le but d'accomplir une mission spécifique dans le système de production [4]. Ces travaux ont toujours été limités par la disponibilité et la qualité des données liées à l'énergie. Ces données peuvent être obtenues par différentes méthodes, allant du calcul théorique aux mesures réelles. Il est à noter que la prévision de la consommation d'énergie n'est pas une tâche simple vue la sophistication des machines et des systèmes de production.

Abele, Anderl et Birkhofer [5] considèrent l'énergie totale consommée par un processus unique comme étant la somme de l'énergie minimum théoriquement nécessaire pour obtenir le produit, l'énergie supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes ou pour accomplir des fonctions secondaires de la machine et l'énergie consommée par les machines périphériques.

Kellens, Dewulf, Overcash, Hauschild et Duflou [4] ont proposé une méthodologie orientée-ECV pour l'analyse de l'inventaire d'un processus unitaire. Ce travail a été développé dans le cadre du programme de recherche coopérative CO2PE!² et propose deux approches avec différents niveaux de détail. La première, appelée « screening approach », repose sur des données représentatives, accessibles au public et des calculs d'ingénierie pour la consommation d'énergie, la perte de matière et l'identification des variables d'amélioration. La seconde ou l'«in-depth approach» est une approche plus détaillée, subdivisée en quatre modules, comprenant une étude de temps, une étude de la consommation d'énergie, une étude de consommables et une étude des émissions, dans laquelle toutes les entrées et sorties pertinentes de processus sont mesurées et analysées en détail. Dans une deuxième partie du même travail, les auteurs ont présenté deux études de cas pour la démonstration de ces deux approches, l'une pour une perceuse et l'autre pour une machine de découpe laser [6].

Une autre approche pertinente pour modéliser l'énergie rencontrée dans la littérature est l'approche des « Blocs d'énergie» introduite par Weinert *et al.* [7] pour la planification et l'organisation des systèmes de production éco énergétiques. Cette méthode consiste à décrire la consommation d'énergie d'une unité de production en fonction de ses états de fonctionnement. Chaque état est décrit par un bloc d'énergie représenté par un niveau de puissance absorbée et une durée. Le profil d'énergie de l'ensemble du processus peut être donc reproduit par une succession de ces blocs. La durée et la puissance requises pour chaque état de fonctionnement peuvent être fixes ou variables en fonction de différents paramètres du procédé.

Le même principe a été appliqué pour la modélisation de la consommation énergétique des machines à commande numérique mais en subdivisant, dans une deuxième étape, les états de fonctionnement en d'autres segments en fonction des équipements mis en marche dans cet état [8]. Ainsi, les blocs d'énergie ou les blocs fonctionnels, comme mentionné dans ce travail, sont divisés en deux sous-types, les blocs fonctionnels de l'état machine (MSFBs) et les blocs fonctionnels des composants de la machine (MCFBs).

Les efforts réalisés au niveau du processus unique peuvent être exploités lors du passage au niveau de la chaîne de production ou même au niveau du système de production, ce système étant la combinaison de plusieurs processus uniques ou machines uniques et de leur interconnexions. Toutefois, la mise en œuvre d'un modèle basé sur l'énergie au niveau d'une chaîne de production ou au niveau ensemble du système de production nécessite un outil fiable, capable de palier à la complexité d'estimer l'énergie en plus de la complexité du système de production en lui-même. Pour faire face à cette complexité, la méthode la plus appropriée pour appuyer un tel modèle est la simulation à événements discrets [9].

La simulation à événement discret (SED) est une technique utilisée pour anticiper l'évolution des systèmes complexes où la multitude de facteurs rend délicate voir inefficace les

² <http://www.mech.kuleuven.be/co2pe/> (Consulté le 01.08.15)

approches analytiques statiques. Cette méthode permet de créer une maquette informatique d'un système, existant ou en conception, afin d'analyser son comportement dans le temps. Elle permet également de simuler des opérations de planification, de dimensionnement, de réorganisation, de control en temps réel et autres. La simulation a prouvé être un outil d'analyse extrêmement utile. Plusieurs centaines d'articles, de documents, de livres et conférences ont porté directement sur le sujet. Smith [10] et Negahban et Smith [11] présentaient une revue de ces travaux et les classaient en sous-ensemble selon la phase de l'utilisation de la simulation (phase de conception ou phase d'opération). Ils détaillaient dans ce travail l'intérêt de l'utilisation de la simulation.

Plusieurs initiatives pour coupler les flux énergétiques au flux de production dans le cadre de la SED pourraient être trouvées dans la littérature, mais il existe toujours un écart entre les outils commercialisés, les besoins industriels et la recherche scientifique. Dans ce contexte, Thiede, Seow, Andersson et Johansson [12] ont mené une enquête sur treize logiciels de simulation existants afin de comprendre leurs caractéristiques et leurs fonctionnalités. Les auteurs introduisaient des méthodes existantes de simulation orientée environnement et soulignaient la nécessité de poursuivre le développement des efforts faits pour répondre à cette préoccupation.

En général, les approches de modélisation et de simulation liées à l'environnement et à l'énergie peuvent être classées en trois paradigmes de base en fonction de leur interfaçage avec d'autres outils d'évaluation et de simulation. Dans le paradigme A, les résultats obtenus à partir des outils de SED conventionnels sont intégrés dans une seconde étape dans un outil d'évaluation externe permettant de déterminer des variables liées à l'environnement. Il a été prouvé que les paradigmes B et C sont les plus appropriés pour intégrer l'énergie, mais chacun d'eux a encore une certaine faiblesse. En fait, le paradigme B permet une analyse plus détaillée de l'ensemble du système permettant l'intégration de simulation supplémentaire mais entraîne souvent des modèles très complexes. Dans paradigme C, tous les éléments pertinents sont mis en œuvre au sein d'une seule application, mais l'utilisateur reste limité par l'environnement de simulation utilisé. Pour surmonter la faiblesse de ces deux paradigmes B et C, Herrmann, Thiede, Kara et Hesselbach [13] les joignaient dans une approche intégrée. Les auteurs ont proposé un cadre de simulation à grande flexibilité dans laquelle ils modélisent l'usine entière avec tous les flux énergétiques pertinents, y compris les flux d'énergie indirecte (éclairage, chauffage, air comprimé, etc.).

Un autre travail portant sur la simulation liée à l'énergie est celui de Rahimifard, Seow et Childs [14]. Ce travail a pour but l'analyse et l'évaluation de la consommation d'énergie d'un produit au cours de son cycle de vie. Dans cette approche, l'énergie est divisée en deux catégories: une énergie directe DE (utilisée par les procédés : usinage, moulage, etc.) et une

énergie indirecte IE (utilisée par les activités : éclairage, chauffage, etc.). Cette approche donne un aperçu de haut niveau de la consommation d'énergie d'un produit mais elle est incapable de modéliser la répartition détaillée des flux d'énergie entre les différents processus, postes de travail et zones de production.

III. UNE APPROCHE DE SIMULATION INTEGRANT L'ENERGIE

Afin d'arriver à simuler l'activité d'un système de production tout en tenant compte de sa consommation énergétique, une approche flexible et modulable a été développée. Cette approche est basée sur les opérations liées aux flux de production et aux flux d'énergie et cherche à tenir compte des interactions du système (machines, outils, opérateurs, environnement) et tous les paramètres pertinents influençant la consommation énergétique. Nous décrivons dans cette section le concept et la méthodologie de cette approche.

A. Concept

Dans cette approche de simulation intégrant l'énergie, on envisage de modéliser un système de production comme étant un ensemble d'opérations organisées en série ou en parallèle de manière à gagner en productivité et en rentabilité tout en respectant des contraintes prédéfinies (ex. contraintes de précédence). Chaque opération est à son tour un ensemble d'opérations élémentaires répétitives ou non. Cette méthode offre au modèle une grande flexibilité et facilite son couplage avec des programmes d'ordonnancement qui visent à optimiser la planification de la production sous des contraintes énergétiques.

Dans les approches de simulation classiques, ces opérations nécessitent souvent la réservation de ressources, d'outils, d'équipements logistiques, et d'opérateurs pour accomplir une tâche donnée. Dans cette approche de simulation liée à l'énergie, elles nécessitent aussi de l'énergie et peuvent être représentées par un niveau de puissance et une durée. La consommation énergétique peut être donc calculée en intégrant la puissance en fonction du temps. Cette consommation doit être mise à jour à chaque fin d'opération élémentaire afin de pouvoir calculer l'énergie consommée par machine, par produit ou par toute l'usine.

Les séquences de ces opérations sont souvent prédéfinies par un programme d'ordonnancement ou même par la logique de fonctionnement de la machine s'il s'agit d'une séquence d'opérations élémentaires sur une machine unique. Ces séquences restent les mêmes sous des conditions de fonctionnement normal du système de production. Néanmoins, un système de production n'a jamais été aussi stable et subit souvent des perturbations internes ou externes qui viennent interrompre la production. Ces perturbations peuvent être liées aux machines, aux outils, aux produits ou même au facteur humain et arrivent d'une manière stochastique. Dans ces cas, l'interruption de la production est 'imposée'. Mais elle peut

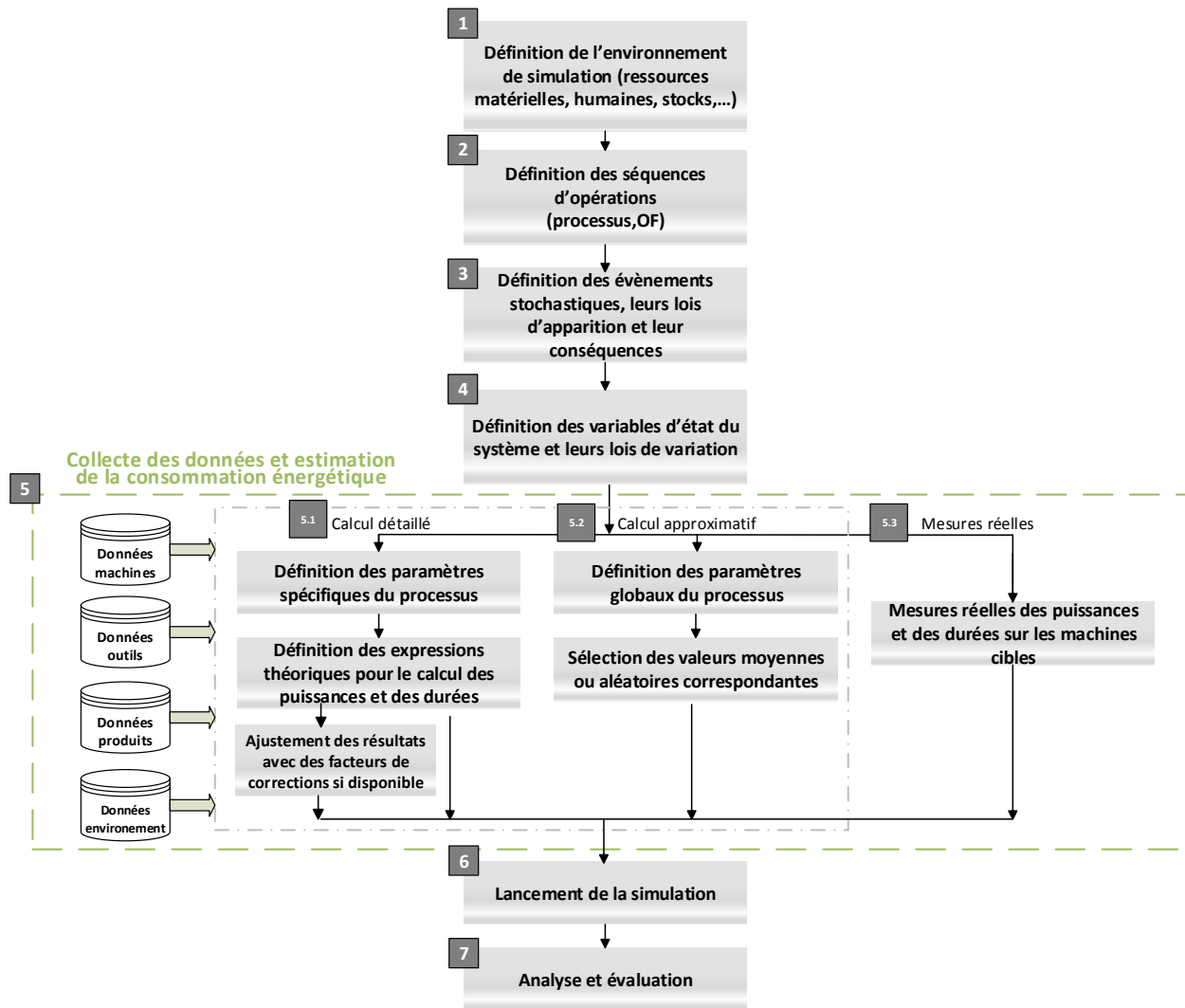


Fig 1. Méthodologie

aussi être 'planifiée' suite à des pauses opérateurs, des actions de maintenance préventives, etc.

Ces interruptions entraînent un changement d'ordre dans la séquence d'opérations et l'intégration d'états de fonctionnement 'sans valeur ajoutée'. Ces états nécessitent aussi souvent de l'énergie (figure1).

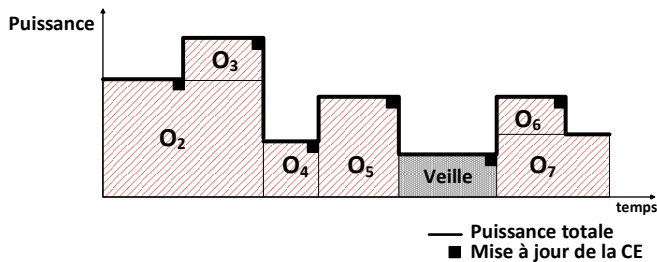


Fig. 2. Evolution de la consommation énergétique

Dans certains systèmes de production complexes, en particulier ceux qui traitent des flux thermiques (cas des transformateurs de polymères), certaines opérations de préchauffage doivent être mises en place en premier lieu afin de satisfaire des conditions nécessaires au lancement de la production (atteindre une température donnée sur la machine ou sur l'outil). Dans de tels cas, les interruptions de production nécessitent de relancer ces opérations et le système consomme davantage de l'énergie.

Ces interruptions ont un impact significatif sur la consommation énergétique et doivent être prise en compte dans le modèle étant donné que les opérations de préchauffage sont parmi les opérations les plus énergivores au sein d'un système manufacturier. Il est à noter que la consommation de ces opérations dépend sans doute de l'état du système physique (ex. sa température initial au moment du lancement de l'opération du préchauffage) et c'est pour cette raison que le modèle de simulation doit aussi être capable d'enregistrer les variations continues des variables d'état grâce à l'introduction des équations différentielles et des équations d'état.

Il est à noter que le plus grand défi de ce travail est la collecte des données. En fait, l'efficacité d'un modèle de simulation lié à l'énergie dépend de la qualité et de la disponibilité des données mais avec différents niveaux d'importance selon le but de la simulation (ex. Estimation des coûts énergétiques, évaluation de l'efficacité énergétique, ordonnancement de la production sous contraintes énergétiques, etc.).

Dans cette optique, un double effort doit être fait pour collecter à la fois les données liées à la puissance absorbée et à la durée correspondante pour finir par l'estimation de la consommation énergétique.

Ces données peuvent être obtenues de différentes manières, soit à travers des bases de données des inventaires de cycle de vie (ICV), soit à travers des modèles mathématiques établis par des études et recherches antérieures soit par des mesures réelles.

Il est évident que les mesures réelles donnent les résultats les plus précis. Cependant, cette méthode de collecte de données peut être très difficile à mettre en œuvre et coûteuse dans certains systèmes de production larges et complexes. Ainsi, on doit revenir aux études publiées et aux bases de données. Ces bases de données ont été principalement développées dans le cadre des efforts d'évaluation du cycle de vie (ECV) et contiennent des données liées à l'environnement, y compris l'énergie, qu'on peut exploiter dans ce travail. Le problème réside dans le fait que ces bases de données, souvent, ne couvrent que quelques processus les plus connus et ignorent les autres. Toutefois, l'absence ou le manque de données relatives à la consommation d'énergie peuvent rendre le modèle incapable. Pour remédier à cela, nous proposons que l'utilisateur du modèle de simulation puisse simplement introduire des données d'énergie si elles sont disponibles à partir de l'une des approches mentionnées ci-dessus, sinon ces données peuvent être générées automatiquement par le modèle, en sélectionnant des valeurs aléatoires de sous-ensembles de données selon les paramètres globaux du processus.

B. Méthodologie

Comme montré dans la figure 1, la structure globale de l'approche proposée commence par (1) définir l'environnement de simulation (ressources matérielles, ressources humaines, stocks, etc.). Cette première étape consiste en une description détaillée du système de production étudié. Une deuxième étape consiste à (2) définir les séquences d'opérations à réaliser dans des conditions de production normales. Ces séquences sont imposées par le processus même (par des contraintes de précedence) ou par l'industriel (par des ordres de fabrication). Cette approche basée sur les opérations permet un couplage facile avec des programmes d'ordonnancement afin d'en trouver un qui soit optimal sous des contraintes énergétiques.

La prochaine étape consiste à (3) définir les événements stochastiques qui peuvent perturber l'activité de production, leurs lois d'apparition et leurs conséquences. Ces perturbations touchent souvent l'état du système et l'ordre de la séquence normale d'opérations touchant ainsi la consommation énergétique. Les variables d'état du système ainsi que leurs lois

de variations doivent être donc définies dans le modèle afin d'enregistrer les changements d'état du système étudié (ex. température actuelle) (4).

Passant à la modélisation de la consommation énergétique (5), les données liées à la puissance et à la durée de chaque opération élémentaire doivent être introduites par l'une des méthodes discutées précédemment selon leurs disponibilités. Pour un calcul théorique détaillé (5.1), toutes les données nécessaires pour renseigner les expressions théoriques de la consommation énergétique doivent être introduites. Ces résultats théoriques peuvent être ajustés par des facteurs de correction notamment les rendements machines, si disponibles, afin de se rapprocher au mieux de la réalité.

Dans le cas de l'indisponibilité des données ou la difficulté de les déduire, les valeurs des puissances et des durées peuvent être sélectionnées aléatoirement à l'aide d'un générateur de nombres aléatoires. Elles peuvent être aussi remplies par des valeurs moyennes approximatives selon les paramètres globaux du système (5.2). Cette solution est proposée afin de maîtriser une absence possible des données.

Autrement, et si l'utilisateur souhaite avoir des résultats plus précis, une campagne de mesures est nécessaire pour extraire les valeurs des puissances et des durées de chaque opération sur chaque machine (5.3).

Une fois la simulation exécutée (6), les résultats de simulation classiques ainsi que des résultats liés à la consommation d'énergie peuvent être analysés et évalués (7).

IV. APPLICATION : ATELIER DE MOULAGE PAR INJECTION

Dans cette application, on s'intéresse à la modélisation d'un atelier de moulage par injection. Ce procédé est l'un des plus utilisés pour la transformation des polymères. On rappelle que ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet industriel « ECOTHER » qui a pour but de donner des solutions techniques pour des filières de transformations de polymères énergétiquement efficaces.

Ce procédé de transformation est reconnu être un procédé énergivore car il nécessite des opérations répétitives de préchauffage et de refroidissement. De ce fait, il a été l'objet de plusieurs travaux de recherche dans la littérature afin de prédire, analyser et optimiser sa consommation énergétique [15 ; 16 ; 17]. Le but de cette application est de pouvoir modéliser les flux énergétiques au sein d'un atelier de moulage simultanément avec les flux de production.

A. Environnement de simulation

Le logiciel de simulation choisi pour cet objectif est le logiciel de simulation à événements discrets Arena® édité par Rockwell Software. Ce logiciel offre la possibilité d'intégrer des variations continues ce qui lui rend adapté à la modélisation des flux énergétiques. De plus, il permet la création des bibliothèques d'objets qu'on a adoptées dans cette plateforme de modélisation. En fait, une bibliothèque d'objets est un ensemble de modules paramétrables dont l'utilité est de construire un modèle de simulation facilement et rapidement. Ces modules ont une interface simple mais cachent derrière un

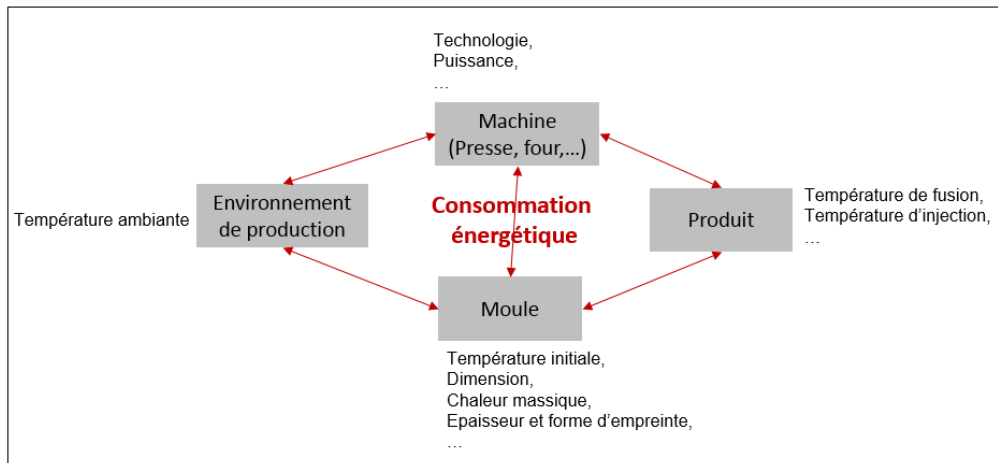


Fig. 3. Interaction entre les différentes parties du système

code parfois très complexe. Cette bibliothèque peut être utilisée pour modéliser plusieurs systèmes avec des configurations différentes grâce au paramétrage des objets.

Dans cette application, les différents objets interconnectés peuvent être classés en trois grandes catégories (figure 3):

- Des objets ressources : ressources matérielles (presse, four, mélangeur, etc.) et humaines (opérateurs).
- Des objets d'organisation et de gestion : Ce sont les objets qui servent à organiser les flux de produits, leurs ordres de passage sur les machines, les horaires de production, la gestion des stocks et autres.
- Des objets de modélisation énergétique : Ces objets sont connectés aux objets machines et permettent de reproduire le profil énergétique de ces dernières.

B. Modélisation

Comme évoqué précédemment, la modélisation de tels systèmes n'est pas simple. Elle nécessite une bonne compréhension du procédé, des machines, des outils, de l'environnement de production et leurs interactions (figure 5). En fait, chaque élément présente des paramètres qui influent la consommation énergétique et qui doivent être pris en compte afin de prédire cette consommation.

Il est à noter que le moulage par injection est mené essentiellement par la presse à injecter mais souvent nécessite d'autres machines additionnelles comme des fours de préchauffage, des machines d'éjection et de finition. Chaque machine peut effectuer une ou plusieurs opérations. On associe à chaque opération une courbe de consommation définie par les niveaux des puissances utilisées et les durées associées. La superposition de ces courbes selon des séquences prédéfinies par l'utilisateur permet de reproduire le profil énergétique global.

Afin d'arriver à modéliser ce profil énergétique, une bonne compréhension du procédé et du fonctionnement machine est nécessaire. Par exemple, dans le but de reproduire le profil énergétique d'une presse à injection, des mesures préliminaires

ont été réalisées sur une presse hydraulique donnant l'allure ci-dessous.

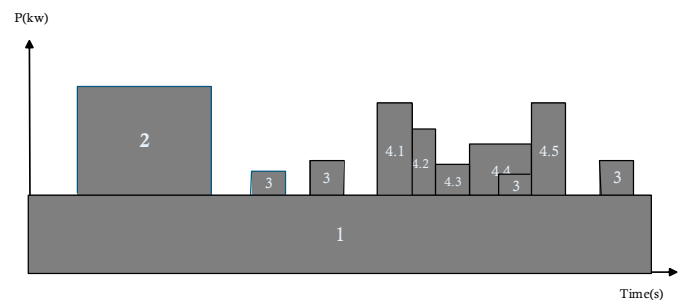


Fig. 4. Profil énergétique d'une presse hydraulique

Connaissant le procédé et le fonctionnement machine, on peut identifier les différentes parties de la courbe comme suit :

(1) Mise en marche de la presse : Une fois mise en marche, la presse a une consommation de base provoquée par le démarrage du groupe hydraulique, les ordinateurs, etc. Cette consommation dépend des caractéristiques machine et sa technologie (hydraulique, hybride ou électrique). Cette consommation est importante (jusqu'à 50% pour les presses hydrauliques) et doit être enregistrée par le simulateur même en période de veille. Cela peut aider l'utilisateur du modèle à repérer les pertes d'énergie pendant les périodes de veille et à trouver des solutions pour optimiser sa consommation.

(2) Préchauffage du cylindre d'injection : Ce dispositif est responsable de la fusion du polymère et doit atteindre une température donnée avant de lancer la production. Cette température dépend du type de polymère et constitue donc un paramètre de consommation énergétique.

(3) Maintien en température : Une fois la température de fusion est atteinte, cette dernière doit être maintenue durant la production. Cependant, comme il s'agit d'un système thermo régulé, la modélisation de la consommation énergétique

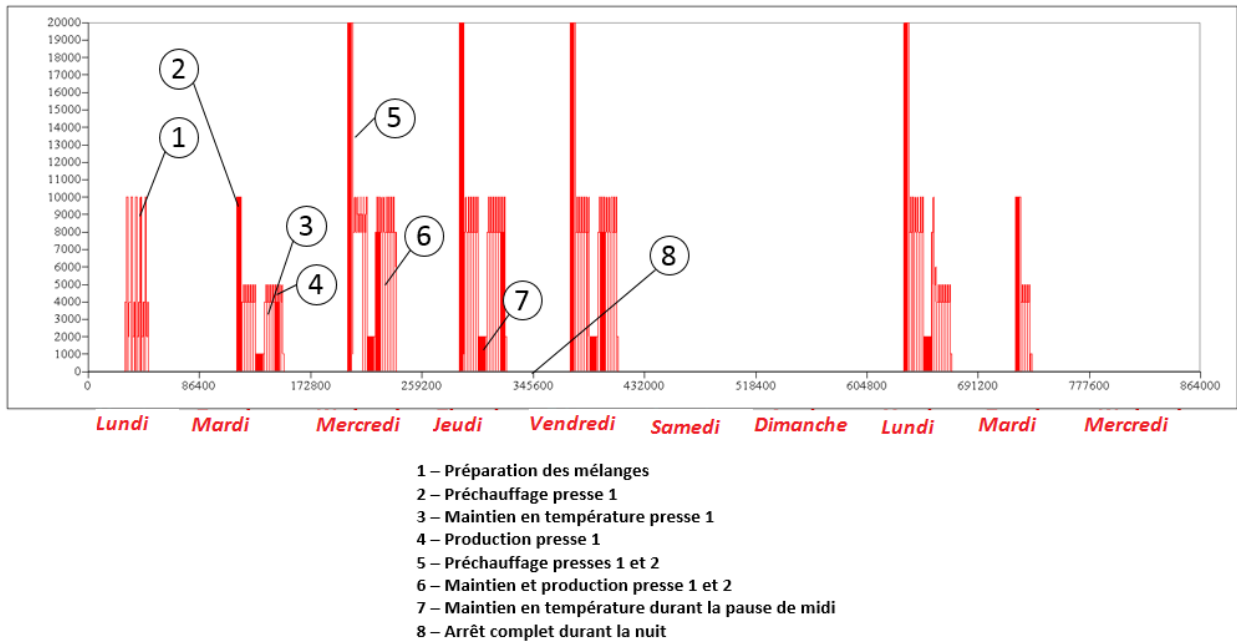


Fig. 5. Courbe de consommation globale fournie par le simulateur

devient très compliquée. En effet, l'état physique du système interagit avec l'environnement d'une manière instable. On propose donc d'utiliser un générateur de nombres aléatoires pour modéliser les petits pics de consommation (puissance et durée) provoqués par l'activation et la désactivation des pots de chauffe dans le contexte d'une thermorégulation.

(4) Production : Une fois toutes les conditions préalables sont satisfaites, la production peut démarrer. Cette opération est l'ensemble d'opérations élémentaires constituant un cycle d'injection complet. Un cycle d'injection typique est comme suit : fermeture moule (4.1), Injection (4.2), maintien en pression (4.3), dosage et refroidissement (4.4), ouverture moule (4.5).

Avec l'approche proposée, l'utilisateur peut détailler plus finement ces opérations élémentaires. Par exemple, la fermeture du moule peut être encore subdivisée en fermeture et verrouillage avec deux niveaux de puissance différents. Comme indiqué plutôt, toute la complexité réside dans la collecte des données. Plusieurs recherches ont été réalisées pour déduire la consommation d'un système de moulage par injection. Cela nous permet d'extraire des équations utiles pour l'estimation de l'énergie [17 ; 18 ; 19 ; 20].

Concernant les événements stochastiques, un système de moulage par injection peut subir plusieurs perturbations qui n'ont pas toutes les mêmes conséquences sur le système. Certaines nécessitent juste une intervention rapide d'un opérateur sans changer l'état du système, d'autres nécessitent de mettre hors tension la machine. Par conséquent, les températures du cylindre chauffant et du moule baissent (des variables d'état du système). Cela nécessite de revenir vers l'opération de préchauffage ce qui résulte en une consommation supplémentaire d'énergie. On rappelle que les interruptions de production peuvent aussi être planifiées

(pause opérateurs) affectant ainsi la consommation énergétique. Pour cette raison, il faut mieux gérer les interruptions de production pour plus d'efficacité énergétique. Pour cela, l'utilisateur peu définir un calendrier indiquant les périodes de travail et d'arrêt. Le modèle proposé permet alors de comparer des stratégies d'arrêt et de mise en veille des machines.

C. Validation partielle du modèle de simulation

Il est à noter que le modèle de simulation a été validé partiellement avec des données non réelles (figure 5). On voit bien que le simulateur fournit une courbe de consommation selon un processus prédéfini. On envisage le valider avec des données réelles en collaboration avec l'un des industriels de consortium ECOTHER suivant la procédure suivante :

- Collecter des données liées à la production, aux machines, aux produits et à l'environnement de simulation.
- Effectuer des campagnes de mesures par module, par machine et par groupe de machines.
- Comparer les courbes réelles avec celles fournies par le simulateur.

Toutefois, implémenter un protocole expérimental au sein d'une entreprise n'est pas facile à mettre en œuvre dans un contexte de production industrielle réelle.

V. CONCLUSION

Ce papier propose une nouvelle approche de simulation intégrant l'énergie afin de pouvoir simuler simultanément des flux de production et flux énergétique au sein d'un système manufacturier.

Grace à son concept basé sur les opérations, l'approche proposée permet de modéliser d'une manière flexible les

systèmes les plus complexes et s'adapter aux besoins de l'utilisateur. Ce concept permet de coupler facilement avec des programmes d'ordonnement afin d'en trouver l'optimal sous des contraintes énergétiques (des pics de consommations, des tarifs d'électricité variables au cours de la journée, etc.).

De plus, cette approche permet de superviser d'une manière fine l'évolution de la consommation énergétique, localiser les pertes et propose des solutions d'optimisation en comparant différentes stratégies.

Cette approche de simulation traite un nombre important de défis lié à l'énergie mais elle reste toujours limitée car elle ne considère que l'énergie électrique. Des efforts supplémentaires restent à faire afin d'intégrer d'autres types de consommation comme l'air comprimé, l'eau, le gaz et toute autre consommation pertinente au sein d'un système manufacturier.

Une autre piste, pour la suite de nos travaux, sera d'étendre notre bibliothèque à d'autres procédés de production comme par exemple l'extrusion.

Remerciements

Ce projet est porté par BPI France et par le pôle de compétitivité ELASTOPOLE.

Références

- [1] Wang, Q., Liu, F., Li, C., "An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop", *Journal of Cleaner Production*, 52(1), pp. 122-133, 2013.
- [2] Hauschild, M., Jeswiet, J., & Alting, L., "From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 1-21, 2005.
- [3] Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., ... & Kellens, K., "Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(2), 587-609, 2012.
- [4] Kellens K., Dewulf W., Overcash M., Hauschild M., Duflou J.R., "Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory, Part 1: Methodology Description", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), pp. 69-78, 2012.
- [5] Abele A., Anderl R., Birkhofer H., "Environmentally-Friendly Product Development- Methods and Tools". ISBN: 1-85233-903-9 (Chapter 3), 2005.
- [6] Kellens K., Dewulf W., Overcash M., Hauschild M., Duflou J.R., "Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory, Part 2: Cases studies", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), pp. 242-251, 2012.
- [7] Weinert N., Chiotellis S., Seliger G., "Methodology for Planning and Operating Energy-Efficient Production Systems", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(1), pp. 41-44, 2011.
- [8] Peng, T., Xu, X., & Wang, L., "A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks", *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), pp. 196-208, 2014.
- [9] Hermann C., Thiede S., "Process Chain Simulation to Foster Energy Efficiency in Manufacturing", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1(4), pp. 221-229, 2009.
- [10] Smith, J. S., "Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of manufacturing systems*", 22(2), 157-171, 2003.
- [11] Negahban, A., & Smith, J. S., "Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis". *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), pp. 241-261, 2014.
- [12] Thiede, S., Seow, Y., Andersson, J., & Johansson, B., "Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives". *CIRP Journal of manufacturing science and technology*, 6(1), pp. 78-87, 2013.
- [13] Herrmann, C., Thiede, S., Kara, S., & Hesselbach, J., "Energy oriented simulation of manufacturing systems—Concept and application", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1), pp. 45-48, 2011.
- [14] Rahimifard, S., Seow, Y., & Childs, T., "Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59(1), pp. 25-28, 2010.
- [15] Spiering, T., Kohlitz, S., Sundmaeker, H., & Herrmann, C., "Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015.
- [16] Thiriez, A., & Gutowski, T., "An environmental analysis of injection molding, In *Electronics and the Environment*", *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on*, pp. 195-200, 2006.
- [17] Madan, J., Mani, M., Lee, J. H., Lyons, K. W., "Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study", *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-14, 2014.
- [18] Kalla, D., Twomey, J., & Overcash, M., "MC2 Injection Molding Process Unit Process Life Cycle Inventory", 2012.
- [19] FtMüller, E., Schillig, R., Stock, T., & Schmeiler, M., "Improvement of Injection Molding Processes by Using Dual Energy Signatures", *Procedia CIRP*, 17, pp. 704-709, 2014.
- [20] Ribeiro, I., Peças, P., & Henriques, E., "Incorporating tool design into a comprehensive life cycle cost framework using the case of injection molding", *Journal of Cleaner Production*, 53, pp. 297-309, 2013.