



HAL
open science

Energy control of production systems : Tool proposal to help design Discrete Event Simulation models integrating energy.

Meriem Kouki

► To cite this version:

Meriem Kouki. Energy control of production systems : Tool proposal to help design Discrete Event Simulation models integrating energy.. Automatique. Université Bretagne Loire, 2017. Français. NNT : 2017NANT4072 . tel-02485344

HAL Id: tel-02485344

<https://hal.science/tel-02485344>

Submitted on 24 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.

Thèse de Doctorat

Meriem KOUKI

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du
grade de Docteur de l'Université de Nantes
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire*

École doctorale : *STIM*

Discipline : *Sciences de l'information et de la communication*

Spécialité : *Automatique et informatique appliquée*

Unité de recherche : *Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes LS2N*

En vue d'une soutenance le 17/11/2017

Maîtrise énergétique des systèmes de production : Proposition d'un outil d'aide à la conception de modèles de Simulation à Evènements Discrets intégrant l'énergie

JURY

Rapporteurs :	Ali GHARBI , Professeur des universités, Ecole de Technologie Supérieure de Montréal Vincent CHEUTET , Professeur des universités, Insa Lyon
Examineurs :	Pierre MOUSSEAU , Professeur des universités, Université de Nantes Nicolay TCHERNEV , Professeur des universités, Université de Clermont Auvergne Hind BRIL ELHAOUZI , Maître de conférences, Université de Lorraine
Invité(s) :	Céline CORNARDEAU , Responsable Solution Supply-Chain, Techteam
Directeur de Thèse :	Pierre CASTAGNA , Professeur des universités, Université de Nantes
Co-encadrant :	Olivier CARDIN , Maître de conférences, Université de Nantes

Résumé

Les industries sont aujourd'hui contraintes d'innover et d'améliorer leur durabilité sous une pression économique, politique et sociale accrue dans un marché très concurrentiel, avec une société de plus en plus sensible aux enjeux environnementaux. Dans ce contexte, de nombreuses initiatives ont été menées aussi bien au niveau académique qu'industriel pour améliorer la gestion de l'énergie dans la phase de production. En parallèle des avancées technologiques, les économies d'énergie liées à l'organisation de la production ne sont pas toujours exploitées du fait d'un manque de données liées au comportement énergétique des systèmes. Pour répondre à cette problématique, la simulation à événements discrets est une solution fiable, mais plusieurs verrous empêchent encore son utilisation industrielle : les approches de la littérature manquent de généralité et de procédures fiables pour intégrer les données réelles de consommation énergétique dans les cas les plus complexes.

L'objectif de notre travail est de proposer un outil de simulation permettant de prédire la consommation énergétique des systèmes de production et servir d'outil d'aide à la décision couplant des objectifs énergétiques et productivistes généralement peu conciliables. Cet outil est basé sur une approche générique et flexible permettant de modéliser et simuler les flux de production et les flux énergétiques dans une plateforme unique. De plus, une méthodologie d'intégration des données de consommation complexes, basée sur une approche stochastique, est proposée.

La validation de notre approche et de l'outil a été réalisée sur des unités industrielles du domaine de la transformation des polymères et élastomères.

Mots clé : Simulation à événements discrets, modélisation, prédiction, consommation énergétique, efficacité énergétique, durabilité, systèmes de production.

Abstract

Today, industries are compelled to innovate and improve their sustainability under economic, political and social pressure in a highly competitive market and within an increasing societal conscience towards environmental issues. In this context, several initiatives have been carried out at both academic and industrial levels to improve energy performance in the production phase. In parallel with technological advances, energy savings by production organization are not always exploited because of a lack of comprehension on the energy behavior of manufacturing systems. To solve this problem, Discrete Event Simulation is a reliable solution, but several barriers still prevent its industrial use: literature approaches lack genericity and reliable procedures for integrating energy consumption data in complex cases. The objective of our work is to propose a simulation tool allowing to predict the energy consumption of manufacturing systems, it serves as a tool to help decision-making to enhance energy performance and productivity usually considered as conflicting goals. This tool is designed following a generic and flexible approach to model and simulate workflows and energy flows in a single platform. In addition, a methodology for integrating complex energy consumption data, based on a stochastic approach, is proposed. Validation of our approach and our tool is carried out in the field of polymer processing.

Keywords: Discrete Event Simulation, modeling, prediction, energy consumption, energy performance, sustainability, manufacturing systems.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 :.....	5
Le contexte énergétique dans l'industrie	5
Introduction.....	6
1. Le développement durable dans l'industrie	6
1.1. Définitions.....	6
1.2. Évaluation de la durabilité industrielle	7
2. La maîtrise de l'énergie : une étape clé pour une industrie durable	9
2.1. La situation énergétique actuelle et future	9
2.2. L'enjeu environnemental et économique de la consommation énergétique	12
2.2.1. L'enjeu environnemental	12
2.2.2. L'enjeu économique	13
2.3. Solutions pour et barrières contre une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie	14
2.3.1. Solutions.....	14
2.3.2. Barrières.....	18
Conclusion	19
Chapitre 2 :.....	21
Modélisation et simulation de la consommation énergétique :.....	21
Etat de l'art.....	21
Introduction.....	22
1. La modélisation de la consommation énergétique.....	22
1.1. Objectifs.....	22
1.2. Méthodes et approche de modélisation et de prédiction de la consommation énergétique	24
1.2.1. Les modèles mathématiques.....	25
1.2.2. Les modèles empiriques.....	25
1.2.3. Les graphes de liaison.....	26
1.2.4. La simulation de flux	27

1.3.	Granulométrie.....	27
1.3.1.	Niveau processus unique ou machine unique	28
1.3.2.	Niveau système de production/usine	29
2.	La simulation de la consommation énergétique	31
2.1.	La simulation a évènements discrets	32
2.1.1.	La simulation a évènements discrets : quels avantages et quelles limites ? ...	32
2.1.2.	Le processus de simulation à évènements discrets.....	33
2.2.	Les projets intégrant la consommation énergétique a la SED dans la littérature ...	35
2.3.	La gestion des données d'entrée dans la littérature	39
2.3.1.	Collecte des données énergétiques	41
2.3.2.	Primitive de modélisation : la notion d'Energy blocks.....	43
3.	Synthèse et problématiques	45
Chapitre 3 :		47
Concepts de base & méthodologie		47
Introduction.....		48
1.	Une approche de modélisation basée sur les processus	48
1.1.	La notion de processus.....	49
1.1.1.	Cartographie des processus	50
1.1.2.	Description du processus	51
1.2.	La notion d'activité.....	53
1.2.1.	Les types d'activités.....	53
1.2.2.	Ressources et conditions	54
1.3.	Interactions inter-activités et inter-processus.....	55
2.	Modélisation énergétique : une approche basée sur les « Energy blocks »	56
2.1.	L'approche « Energy blocks ».....	56
2.1.1.	Avantages de la méthode	57
2.1.2.	Limites de la méthode.....	58
2.2.	Collecte et gestion de données	59
2.2.1.	Répétabilité des profils de puissance	59
2.2.2.	Variabilité des profils énergétiques & traitement de données.....	60
3.	La méthodologie « ERDES »	62
Conclusion		66

Chapitre 4 :	67
Implantation de l'approche ERDES : Développement d'une Bibliothèque d'objets pour application industrielle	67
Introduction.....	68
1. Le projet Ecother	68
2. Démarche épistémologique	70
3. Le principe de la bibliothèque d'objets.....	72
3.1. La bibliothèque d'objets : quels objectifs ?.....	72
3.2. Environnement de développement	74
4. Description de la bibliothèque ERDES.....	76
4.1. Description des modules	77
4.1.1. Les modules ressources.....	78
4.1.2. Les modules d'organisation de la production	84
4.1.3. Les modules processus.....	86
4.1.4. Les modules de consommation d'énergie.....	87
4.2. Exemple de communication entre objets	89
5. Création de modèles à partir de la bibliothèque	93
5.1. Définition de l'environnement de simulation.....	93
5.2. Définition des processus de fabrication	94
5.3. Organisation de la production	95
5.4. Modélisation de la consommation énergétique	96
5.5. Simulation et analyse des résultats	97
Conclusion	99
Chapitre 5 :	101
Validation et expérimentation sur des cas d'application dans l'industrie des polymères	101
Introduction.....	102
1. Validation de la prédiction de la consommation énergétique sur un cas réel	102
1.1. Contexte du cas industriel	102
1.2. La démarche expérimentale	103
1.3. Plan de mesures	104
1.4. Mesures et exploitation.....	105

1.4.1.	Le moteur groupe hydraulique	105
1.4.2.	Les équipements chauffants	109
1.4.3.	L'énergie de base.....	110
1.5.	Création de modèle et validation.....	110
2.	Exemples d'utilisation de l'outil ERDES	113
2.1.	Première étude de cas : gestion de l'énergie dans les périodes d'inactivité.....	113
2.1.1.	Objectif de l'étude	113
2.1.2.	Description de l'étude	113
2.1.3.	Résultats et discussion	114
2.2.	Deuxième étude de cas : couplage avec l'ordonnancement.....	116
2.2.1.	Objectif de l'étude	116
2.2.2.	Description de l'étude	117
2.2.3.	Résultats et discussion	119
	Conclusion	120
	Conclusion générale et perspective	122
	Références.....	125

Liste des figures

Figure 1. Cycle de vie produit (Hauschild et al., 2005).....	8
Figure 2. Consommation énergétique mondiale (Quadrillion Btu), 1990-2040	10
Figure 3. Consommation d'énergie par secteur industriel (Meike Fink and Vincent Legrand, 2014).....	11
Figure 4. Consommation d'énergie par source (IEO, 2016).....	11
Figure 5. Evolution du taux de concentration de différents gaz à effet de serre depuis 2000 ans	12
Figure 6. Version traduite du PDCA - ISO 9001	17
Figure 7. Profil énergétique typique d'une machine (Thiede et al., 2012).....	28
Figure 8. Profil énergétique d'une machine simple Vs profil énergétique d'une machine complexe (Schmidt et al., 2015)	29
Figure 9. Influence de la planification de la production sur la demande d'énergie (Duflou et al., 2012).....	30
Figure 10. L'usine de production comme un système complexe (Herrmann and Thiede, 2009b)	31
Figure 11. Les 4 étapes d'un processus de simulation	33
Figure 12. Les méthodes de collecte des données énergétiques d'après la littérature (Kouki et al., 2017)	41
Figure 13. Description du système	49
Figure 14. Processus de fabrication (cas d'étude fictif)	49
Figure 15. Décomposition du processus.....	50
Figure 16. Les éléments principaux d'un processus	51
Figure 17. Description du processus	52
Figure 18. Conditions nécessaires à l'exécution d'une activité	55
Figure 19. Interactions inter-processus et inter-activités.....	55
Figure 20. Profil énergétique d'une machine de tournage(Duflou et al., 2012).....	56
Figure 21. Exemples de découpage d'un profil énergétique en « Energy Blocks »	58
Figure 22. Profil énergétique d'une machine de forgeage (Schmidt et al., 2015)	58
Figure 23. Évolution de la puissance électrique appelée sur une presse à injecter.....	59

Figure 24. Les catégories des profils énergétiques	60
Figure 25. Gestion des données d'entrées selon la catégorie du profil énergétique (Kouki et al., 2017).....	62
Figure 26. Courbe paramétrée.....	62
Figure 27. Concept de l'approche ERDES.....	63
Figure 28. La méthodologie ERDES.....	66
Figure 29. Organisation du projet ECOTHER au niveau stratégique	69
Figure 30. Organisation du projet Ecother au niveau opérationnel.....	70
Figure 31. Démarche épistémologique.....	71
Figure 32. Diagramme de cas d'utilisation UML d'une bibliothèque d'objets	73
Figure 33. Exemple d'interface objet bibliothèque sous Arena®.....	75
Figure 34. Exemple de code d'objet bibliothèque sous Arena®	76
Figure 35. Catégories des modules de la bibliothèque d'objets.....	77
Figure 36. Objet 'Presse à injecter'	79
Figure 37. L'objet 'Moule'	80
Figure 38. L'objet 'Ligne d'extrusion'	81
Figure 39. Module 'Machine de dévulcanisation'	82
Figure 40. Interface du module 'Machine Standard'	83
Figure 41. Interface module 'Opérateurs'.....	84
Figure 42. Interface de l'Objet OF	85
Figure 43. Seuils de puissance et dépassements	85
Figure 44. Interface de l'objet Calendrier.....	86
Figure 45. Interface du module 'Activité'	87
Figure 46. Interface de l'objet 'Courbe'.....	88
Figure 47. Le module « Affichage »	89
Figure 48. Exemple de collaboration : Séquence de préchauffage de la machine et du moule	90
Figure 49. Exemple de collaboration : Séquence de production avec arrêt systématique du maintien	91
Figure 50. Exemple de collaboration : Séquence de production avec marche systématique du maintien	92

Figure 51. Exemple de collaboration : Séquence de fin de production.....	92
Figure 52. Processus d'injection sur Pi1	95
Figure 53. Calendrier de fonctionnement de l'atelier.....	96
Figure 54. Stratégies de gestion d'énergie dans les périodes d'inactivité	96
Figure 55. Liste des OFs à simuler.....	96
Figure 56. Modèle complet de l'atelier d'injection.....	98
Figure 57. Evolution de la puissance électrique appelée par la machine	103
Figure 58. Démarche expérimentale pour la comparaison des consommations énergétiques réelle et simulée.....	104
Figure 59. Evolution de la consommation électrique sur plusieurs cycles d'injection.....	105
Figure 60. Décomposition en blocs d'énergie	107
Figure 61. Processus de traitement de données pour la génération des lois de distribution...	107
Figure 62. Mesure réelle de l'évolution de la puissance appelée par le chauffe plateau fixe.	109
Figure 63. Modélisation par blocs d'énergie de la puissance appelée par le chauffe plateau fixe	109
Figure 64. Profil mesuré de la consommation d'énergie de base	110
Figure 65. Les différentes phases d'un macrocycle de production.....	111
Figure 66. Repérage des différentes phases sur la courbe de consommation réelle	112
Figure 67. Courbe de consommation énergétique simulée.....	112
Figure 68. Répartition de la consommation énergétique dans les différentes stratégies.....	114
Figure 69. Relation entre la durée de réalisation et la consommation énergétique.....	116
Figure 70. Modèle complet.....	120

Liste des tableaux

Tableau 1. Exemple d'états de machine	29
Tableau 2. Tableau de synthèse n°1	40
Tableau 3. Tableau de synthèse n°2	44
Tableau 4. Données de production	93
Tableau 5. Durées des différentes activités	93
Tableau 6. Données de consommation énergétique	97
Tableau 7. Statistiques énergétiques et de production.....	99
Tableau 8. Points de mesures.....	105
Tableau 9. Points de mesures.....	106
Tableau 10. Modélisation en blocs d'énergie de la consommation du groupe hydraulique ...	108
Tableau 11. Modélisation en blocs d'énergie de la consommation des équipements chauffants	110
Tableau 12. Comparaison entre la consommation totale réelle et la consommation totale simulée	112
Tableau 13. Résultats de la consommation énergétique dans différentes stratégies d'arrêt machines	115
Tableau 14. Données de production atelier de fabrication des mélanges.....	117
Tableau 15. Données de production atelier de fabrication d'inserts	118
Tableau 16. Composition et caractéristiques de la ligne d'extrusion.....	118
Tableau 17. Résultats de simulation.....	121

INTRODUCTION GENERALE

La maîtrise de la consommation d'énergie est devenue une préoccupation mondiale majeure favorisée par des problématiques économiques, environnementales, politiques et sociales de grande envergure : hausse des prix de l'énergie, réchauffement climatique, restriction des ressources fossiles, dépendance énergétique, etc. Ces problématiques, étant décisives pour les besoins des générations d'aujourd'hui et de demain, ont placé la maîtrise de l'énergie au cœur de l'enjeu du développement durable de tous les secteurs impliqués, notamment le secteur industriel qui représente une part significative de la consommation mondiale de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (IEO, 2016).

Dans ce secteur, l'énergie est devenue un enjeu stratégique à différents niveaux, par la prise de conscience des coûts qu'elle engendre mais aussi son impact sur l'environnement. Les entreprises industrielles se trouvent face à une conscience sociale accrue des problèmes de l'environnement. Les consommateurs sont en train de changer leurs habitudes vis-à-vis de la performance environnementale des produits qu'ils achètent. Ils ont tendance à acheter de plus en plus des produits 'verts' et 'éco énergétiques' (Bunse et al., 2011). La performance énergétique s'est donc intégrée dans les décisions des producteurs et des consommateurs. Plusieurs entreprises industrielles ont souligné que l'amélioration de leur performance environnementale en adoptant une production éco énergétique, peut améliorer leur réputation et par conséquent leur compétitivité afin de pouvoir résister dans un marché fortement concurrentiel. Cette prise de conscience, alliée à une pression politique croissante et des nouvelles directives contraignantes en vue du respect de l'environnement, a motivé les industriels ainsi que les chercheurs à trouver des solutions pour améliorer la performance énergétique dans le secteur industriel notamment dans la phase de production. Cependant, les potentielles économies d'énergie ne sont pas toujours parfaitement exploitées. Ceci est dû en grande partie à une méconnaissance du comportement énergétique des systèmes de production ainsi qu'aux liens entre la consommation énergétique et les activités de production. Pour s'affranchir de cette barrière, une modélisation fine et efficace est indispensable. Cependant, la modélisation du comportement énergétique d'un système n'est pas simple en raison de son caractère dynamique et des fortes interactions entre ses composantes (Rahimifard et al., 2010; Thiede et al., 2013). Pour s'adapter à ce dynamisme et relever ces challenges, la Simulation à Evènements Discrets (SED) est une approche prometteuse. Mais, si les logiciels de SED 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 et efficace permettant l'analyse couplée des flux de production et des flux énergétiques.

L'objectif de ce travail de recherche est donc de proposer un outil de SED permettant de modéliser et simuler les flux de production et les flux énergétiques dans une plateforme unique. Cet outil servira à soutenir les décisions pour répondre à des objectifs de performance

énergétique et de productivité difficilement conciliables. En permettant de connaître les interactions entre l'activité et la consommation énergétique, cet outil permettra par exemple de participer à l'ordonnancement des opérations sous contraintes énergétiques. Cela ouvre la voie à des démarches permettant une meilleure utilisation des énergies renouvelables. Notons que ce travail s'inscrit dans le cadre du projet d'innovation stratégique industrielle dans le domaine de transformation des polymères appelé ECOTHER. Ce projet est porté par BPI France et par le Pôle de Compétitivité ELASTOPOLE. Notre travail dans le cadre du projet ECOTHER a été un point de départ pour arriver à développer une approche générique et flexible permettant d'intégrer la modélisation de la consommation énergétique à la SED tout en répondant à certaines problématiques spécifiques notamment la problématique de la gestion des données énergétiques dans des cas complexes. Cette thèse a été financée dans le cadre d'un contrat CIFRE avec la société TECHTEAM.

Organisation du manuscrit

Ce manuscrit de thèse est organisé en 5 chapitres comme suit :

Le premier chapitre positionne ce travail de thèse dans son contexte. Il donne un aperçu sur la situation énergétique et son évolution avec une orientation particulière vers le secteur industriel. Nous introduisons à ce niveau l'enjeu du développement durable et sa relation avec la consommation énergétique en expliquant les enjeux économiques, environnementales et sociales de cette dernière. Nous discutons également des solutions existantes et des barrières empêchant une meilleure maîtrise de la consommation énergétique dans l'industrie tout en mettant l'accent sur le manque de connaissance et de compréhension du comportement énergétique des systèmes de production.

Le deuxième chapitre décrit l'état de l'art concernant la modélisation et la simulation de la consommation énergétique. Nous expliquons dans cette partie du manuscrit les objectifs de la modélisation et de la prédiction de la consommation énergétique ainsi que les méthodes proposées dans la littérature en accordant une attention particulière à la SED comme une méthode efficace pour modéliser la consommation dans une approche holistique. Dans ce contexte, nous discutons des travaux qui ont été déjà menés dans cette perspective et leurs limites, ce qui nous mène à introduire les principaux verrous scientifiques traités dans ce travail.

Le troisième chapitre introduit les concepts sur lesquels nous nous sommes basés pour développer une approche générique permettant la modélisation conjointe des flux de production et des flux d'énergie. Cette approche consiste à faire le lien entre la consommation énergétique et les processus de production en associant un profil énergétique à chaque activité. Ceci implique des problématiques de modélisation des profils énergétiques et de gestion de données d'entrée. Une méthodologie permettant de bien appréhender un projet de simulation intégrant l'énergie est également proposée à la fin de ce chapitre.

Le quatrième chapitre décrit l'implantation de cette approche à travers une bibliothèque d'objets développé sous le logiciel Arena® ayant pour objectif une création facile et rapide des modèles de SED intégrant l'énergie. Nous décrivons dans ce chapitre la démarche épistémologique qui nous a conduit au développement de cette bibliothèque en partant du projet ECOTHER. Les modules composant la bibliothèque sont décrits en détail dans ce chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à la validation et l'expérimentation de l'outil sur des applications industrielles dans le domaine de transformation des polymères. Ce chapitre valide la capacité de l'outil à prédire d'une manière précise la consommation énergétique et montre différentes utilisations de l'outil pour l'amélioration de la performance énergétique des systèmes de production considérés.

CHAPITRE 1 :
LE CONTEXTE ENERGETIQUE DANS
L'INDUSTRIE

INTRODUCTION

Ce premier chapitre décrit le contexte énergétique et son évolution avec une orientation particulière sur le secteur industriel. Il explique le défi de développement durable auquel le monde est confronté depuis les dernières décennies tout en mettant l'accent sur la consommation d'énergie comme un facteur clé pour une industrie durable. L'un des principaux objectifs de ce chapitre est de rendre compte des impacts de la consommation de l'énergie sur l'économie et l'environnement. Une première partie de ce chapitre sera consacrée à l'introduction du développement durable et particulièrement dans l'industrie. Nous expliquons également comment cette durabilité est évaluée et quelles sont les méthodes utilisées. Une deuxième section sera consacrée à l'efficacité énergétique plus particulièrement, étant une étape clé pour une industrie durable. Nous essayons dans cette partie du chapitre de décrire la situation énergétique actuelle et future, montrer ses impacts économiques et environnementales étant deux aspects principaux du développement durable et enfin évoquer les solutions pour et les barrières contre une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie. Une conclusion viendra compléter ce chapitre afin de positionner nos travaux par rapport aux différents problématiques qui y sont évoquées.

1. LE DEVELOPPEMENT DURABLE DANS L'INDUSTRIE

Une véritable révolution se déroule actuellement pour relever les défis de la production et de la consommation durable. La croissance industrielle continue à accroître la sensibilisation des gouvernements, des industriels ainsi que des consommateurs face aux impacts économiques environnementaux et sociaux du développement durable. Toutes ces parties sont aujourd'hui conscientes qu'il est temps d'arrêter de considérer la durabilité comme un objectif secondaire mais plutôt la considérer comme une stratégie principale dont les résultats favorisent la compétitivité des entreprises. Nous donnons dans cette section un bref aperçu sur le concept du développement durable dans l'industrie, les problématiques associées ainsi que les méthodes de son évaluation.

1.1. DEFINITIONS

Le développement durable, dans son contexte général, a été défini par la commission mondiale sur l'environnement et le développement (WCED, 1987) comme étant '*Un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins*'.

La durabilité industrielle, quant à elle, a été définie par le département du commerce des Etats-Unis comme '*La création de produits manufacturés qui utilisent des procédés qui minimisent les impacts négatifs sur l'environnement, conservent l'énergie et les ressources naturelles, qui sont sécurisés pour les employés, les communautés et les consommateurs et qui sont*

économiquement solides' (DOC, 2010). Elkington (Elkington, 2002) a présenté la durabilité dans les entreprises comme *'une source d'opportunité commerciale à travers une innovation technologique et une amélioration de l'éco-efficience'*. Selon Elkington, un développement durable est celui qui répond à la règle du 'Triple Bottom Line' ou en français la 'Triple Performance' (Personnes, Planète, Profit) introduite par lui-même. Ceci revient à évaluer la performance d'une entreprise sous trois perspectives :

- Sociale : conséquences sociales de l'activité de l'entreprise pour l'ensemble de ses parties prenantes (Personnes) ;
- Environnementale : compatibilité entre l'activité de l'entreprise et le respect des écosystèmes (Planète) ;
- Economique (Profit).

Donc, atteindre la durabilité industrielle exige que les fabricants intègrent les aspects environnementaux, économiques et sociaux dans leurs opérations. Cela a ajouté de la complexité dans la conception et le contrôle des systèmes de production à cause de l'interdépendance entre ces aspects (Kibira et al., 2009) . En effet, engagés dans une démarche de développement durable, les industriels se trouvent face à des problématiques multicritères pour trouver un équilibre entre les différents aspects de la durabilité (Putz et al., 2016). Par exemple, si des critères purement économiques comme le coût et la productivité étaient souvent prioritaires, la question est aujourd'hui comment ces critères sont couplés avec les critères sociaux et environnementaux. Les industriels ont donc besoin d'outils fiables et d'indicateurs pertinents pour l'évaluation de la durabilité dans leurs industries pour une meilleure prise de décision.

1.2. ÉVALUATION DE LA DURABILITE INDUSTRIELLE

L'évaluation de la durabilité industrielle est une étape cruciale pour son évolution et son optimisation. Les industriels cherchent de plus en plus à évaluer la durabilité dans leurs produits ainsi que leurs procédés en quantifiant certains aspects (l'utilisation des ressources, la production des déchets, les émissions, etc.) et en analysant d'autres (l'impact sur les personnes, sur l'environnement, sur l'économie, etc.) (Feng et al., 2010). Dans ce sens, plusieurs indicateurs et mesures de durabilité ont été développés. Notons tout d'abord qu'un indicateur est *'un paramètre utilisé pour mesurer un aspect de durabilité'* (Sarkar et al., 2011), par exemple la mesure des émissions de CO₂ ou la mesure de consommation énergétique. Pour des résultats plus fiables, ces indicateurs doivent être clairement définis selon l'objectif et la portée de l'évaluation. Il existe dans la littérature un certain nombre d'initiatives portant sur les indicateurs et les mesures de performance de développement durable (Feng et al., 2010 ; Jung et al., 2013; Singh et al., 2009).

En se basant sur ces indicateurs, plusieurs approches et outils ont été développés pour l'évaluation de la durabilité. L'approche la plus commune utilisée par les industriels pour l'évaluation de leur performance environnementale dans le cadre du développement durable est l'approche 'EMS' (Environment Management System). Un 'EMS' est un ensemble de règles et de pratiques qui permet à une entreprise de réduire ses impacts environnementaux et

améliorer son efficacité opérationnelle. Cette approche a été de plus en plus répandue et introduite dans les entreprises grâce à l'apparition des standards qui l'encadrent, notamment le EMAS implémenté par la Commission Européenne en 1993 et par l'ISO 14001 (Iraldo et al., 2009; Morrow and Rondinelli, 2002; Nawrocka and Parker, 2009).

Une autre approche qui devient de plus en plus populaire dans l'évaluation de la durabilité des systèmes industriels est l'approche de l'Analyse du Cycle du vie (ACV). Conformément à la norme (ISO 14040, 2006), l'ACV est la '*Compilation et évaluation des consommations d'énergie, des utilisations de matières premières, et des rejets dans l'environnement, ainsi que de l'évaluation de l'impact potentiel sur l'environnement associé à un produit, un procédé ou un service sur la totalité de son cycle de vie*', depuis l'acquisition de matières premières jusqu'à la production, l'utilisation à sa fin de vie (Figure 1).

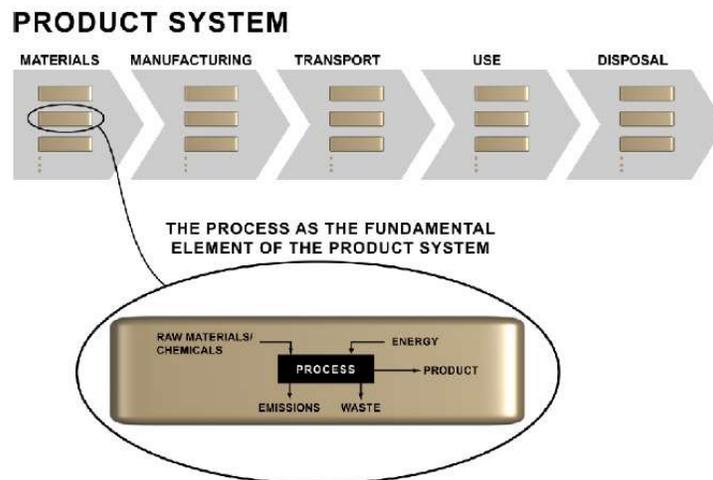


Figure 1. Cycle de vie produit (Hauschild et al., 2005)

L'analyse de cycle de vie passe par quatre étapes principales selon les normes (ISO 14040, 2006) et (ISO 14044, 2006) : (1) la définition des objectifs et du champ de l'étude (préciser l'objectif de l'ACV et son application), (2) l'inventaire de cycle de vie (ICV) (dresser l'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants, associés aux étapes du cycle de vie), (3) l'évaluation des impacts (évaluer les impacts potentiels à partir des flux de matières et d'énergies recensés) et (4) l'interprétation des résultats (valider que les résultats obtenus répondent aux objectifs de l'étude et évaluer leur robustesse).

La consommation d'énergie est l'une des considérations principales dans le cadre d'une étude ACV (Hauschild et al., 2005) et en particulier dans l'étape de l'ICV où les flux d'énergie doivent être identifiés. Cependant, en raison de la complexité accrue de la réalisation d'un ICV et le manque de précision liée à l'énergie demandée en particulier dans la phase de fabrication, des hypothèses et des simplifications importantes sont souvent faites (Seow and Rahimifard, 2011). Cela a motivé plusieurs recherches scientifiques à intensifier les efforts visant à modéliser, simuler, et évaluer la consommation énergétique des systèmes de production dans

la perspective de l'intégrer dans une démarche ACV d'une manière plus précise (Andersson et al., 2012 ; Heilala et al., 2008). En effet, les approches traditionnelles de l'ACV présentent des problèmes inhérents qui réduisent leur précision et limitent leur valeur au regard des entreprises. Les principaux problèmes associés à ces approches sont (Thiede et al., 2013) :

- L'utilisation de paramètres groupés et de modèles indépendants du site ;
- Le modèle est statique et ne tient pas compte du comportement dynamique des systèmes de production ;
- L'accent est mis principalement sur les considérations environnementales, et non sur les aspects économiques ou sociaux.

Notons que les travaux présentés dans ce document, dont le but principal est également de modéliser et de simuler la consommation énergétique au sein d'un système de production, peuvent contribuer à des ACVs plus précises étant donné que la consommation énergétique est un élément parmi plusieurs d'autres qui permettent d'évaluer la durabilité d'un système ou d'un produit notamment les émissions de gaz à effet de serre, les déchets, l'utilisation des matières toxiques, etc.

2. LA MAITRISE DE L'ENERGIE : UNE ETAPE CLE POUR UNE INDUSTRIE DURABLE

L'énergie a été abordée dans de nombreux travaux de recherches comme un facteur clé pour promouvoir le développement durable au sein des systèmes de production (Castro et al., 2015; Herrmann et al., 2014; Putz et al., 2016). La maîtrise de l'énergie dans un contexte de durabilité consiste à répondre aux besoins de l'humanité tout en réduisant l'impact économique et environnemental. Ces solutions se déclinent en une augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables pour la production de l'électricité, l'émergence de modes décentralisés de distribution et de stockage de l'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Ce travail de thèse vise à contribuer à l'amélioration de l'efficacité énergétique et par conséquent contribuer à la durabilité industrielle. En effet, si nous revenons sur l'aspect multidimensionnel de la durabilité, nous pouvons constater que la maîtrise de l'énergie intervient sur l'aspect économique (en réduisant les coûts énergétiques), environnemental (en réduisant les émissions de GES) et social (en améliorant l'image de marque de l'entreprise).

Nous expliquons ci-dessous l'impact environnemental et économique de la consommation énergétique ainsi que leur interdépendance, mais donnons tout d'abord un aperçu sur la situation énergétique dans le monde et en particulier dans le secteur industriel.

2.1. LA SITUATION ENERGETIQUE ACTUELLE ET FUTURE

D'après l'Agence Internationale de l'Energie, la consommation énergétique primaire dans le monde pour l'année 2012 s'élève à 549 quadrillions Btu. Selon les prévisions indiquées dans le International Energy Outlook (IEO) de l'année 2016 (IEO, 2016) cette consommation sera en

forte croissance et pourrait atteindre les 629 quadrillions Btu¹ 2020 et 815 quadrillions Btu en 2040 avec un taux de croissance moyen annuel de 1,4%. Une grande partie de l'augmentation mondiale de la demande d'énergie se manifeste chez les pays non membres de l'OCDE², où une forte croissance économique et une population en pleine expansion favorisent l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie. La demande d'énergie dans ces pays augmenterait de 71% de 2012 à 2040. En revanche, dans les pays de l'OCDE les plus matures par rapport à la problématique énergétique et en croissance lente, la consommation totale d'énergie augmenterait de seulement 18% entre 2012 et 2040 (Figure 2). En effet, la croissance économique parallèlement aux changements structurels qui l'accompagnent, influence fortement la consommation mondiale d'énergie.

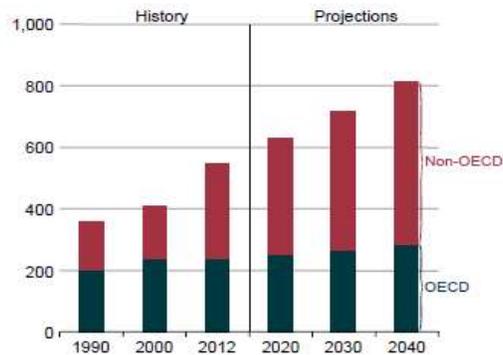


Figure 2. Consommation énergétique mondiale (Quadrillion Btu), 1990-2040

À mesure que les pays se développent et que les niveaux de vie s'améliorent, la demande d'énergie augmente rapidement. Ce développement est allié en premier lieu à un développement industriel. En effet, le secteur industriel continue de représenter la plus grande partie de la consommation d'énergie livrée aux utilisateurs finaux tout au long de la période de projection dans le cas de référence IEO2016 (IEO, 2016). Le secteur industriel mondial représentera plus de la moitié de la consommation totale d'énergie livrée jusqu'en 2040. Sa consommation d'énergie devrait augmenter en moyenne de 1,2% par an. Cette consommation varie largement d'un secteur industriel à un autre selon les procédés impliqués. En France par exemple, l'industrie la plus consommatrice d'énergie est l'industrie de Sidérurgie avec plus de 80 TWh, suivie de l'industrie chimique et de l'agro-alimentaire (Figure 3).

¹ Btu : Unité Britannique thermique correspond à $2,93 \cdot 10^{-4}$ kWh

² OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

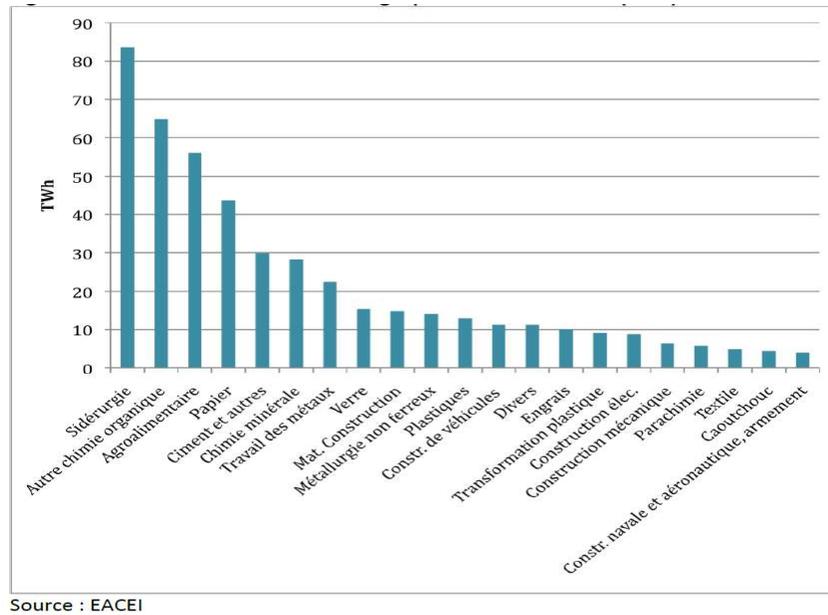


Figure 3. Consommation d'énergie par secteur industriel (Meike Fink and Vincent Legrand, 2014)

Malgré le développement significatif des énergies renouvelables, la consommation mondiale d'énergie restera majoritairement couverte par des énergies fossiles (Figure 4). D'après le cas de référence IEO2016 (IEO, 2016), les combustibles liquides, le gaz naturel et le charbon représenteront 78% de la consommation mondiale totale d'énergie en 2040 avec des combustibles liquides (notamment le pétrole) toujours en tête de liste dans la part de consommation. La consommation accrue de ces types d'énergie présente deux problèmes majeurs : un risque sur l'environnement (leur combustion est polluante et responsable de l'émission de gaz à effet de serre et du réchauffement climatique) et un problème d'approvisionnement (avec le rythme actuel, toutes les énergies fossiles seront épuisées dans moins de deux siècles et d'autres d'ici quelques décennies).

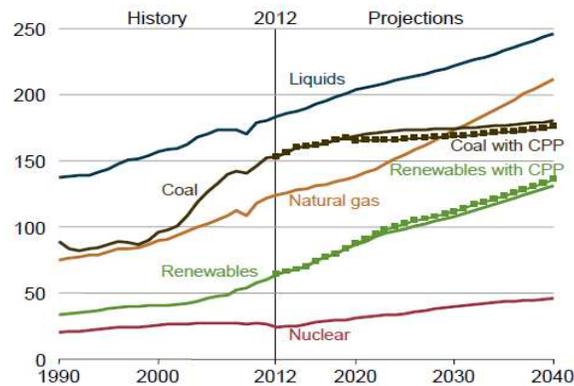


Figure 4. Consommation d'énergie par source (IEO, 2016)

2.2. L'ENJEU ENVIRONNEMENTAL ET ECONOMIQUE DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

2.2.1. L'ENJEU ENVIRONNEMENTAL

La lutte contre le réchauffement climatique est un des plus importants défis actuels auxquels doit se confronter l'humanité. Ce dernier a été perçu par « The Global Risk Report » de l'année 2016 (TGRR, 2016) comme le premier risque mondial pour les années à venir. Les conséquences du réchauffement climatique sont multiples et ont divers degrés d'impact et de réversibilité. On pourra citer entre autres que l'on peut s'attendre à une fonte des glaces aux pôles et par conséquent l'élévation du niveau moyen des mers du globe, à des phénomènes naturels extrêmes plus fréquents, une mise en péril d'espèces animales et florales, etc. (GIEC, 2014).

Étant donné que ce phénomène coïncide avec le développement industriel et économique, les activités humaines ont été rapidement accusées d'être le principal responsable des émissions de gaz à effet de serre dans lesquelles le CO₂ est le plus produit (GIEC, 2014). En effet, l'évolution rapide et alarmante de concentration de gaz à effet de serre a commencé avec le début l'ère de la révolution industrielle (Figure 5).

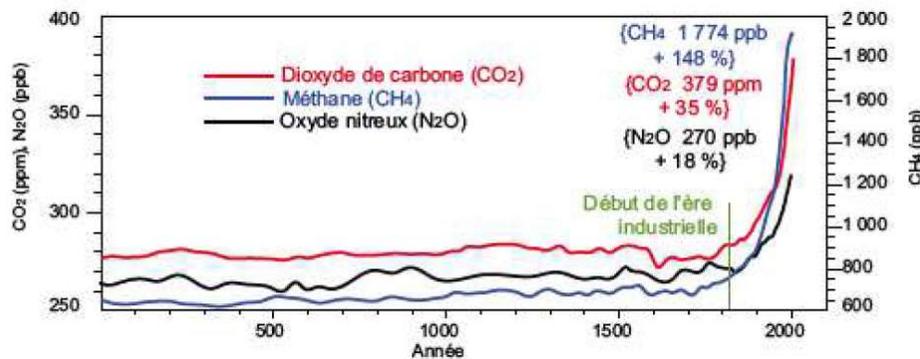


Figure 5. Evolution du taux de concentration de différents gaz à effet de serre depuis 2000 ans

Les émissions anthropiques de ce dernier proviennent principalement de la combustion des énergies fossiles, ce qui a positionné la consommation d'énergie au centre du débat sur le changement climatique. D'après (IEO, 2016), les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie passeront de 32,3 milliards de tonnes métriques en 2012 à 35,6 milliards de tonnes métriques en 2020 et à 43,2 milliards de tonnes métriques en 2040. Le charbon, qui est le combustible fossile ayant la plus forte teneur en carbone, est la principale source d'émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et présentait en 2014, 42% des émissions totales contre 37% pour le pétrole

et 21% pour le gaz naturel³.

D'après le GIEC⁴, si elles se poursuivent, les émissions de gaz à effet de serre provoqueront un réchauffement supplémentaire et une modification durable de toutes les composantes du système climatique, ce qui augmentera la probabilité de conséquences graves, généralisées et irréversibles pour les populations et les écosystèmes. Pour limiter l'ampleur des changements climatiques, il faudrait réduire fortement et durablement les émissions de gaz à effet de serre, ce qui, avec l'adaptation, est susceptible de limiter les risques liés à ces changements.

2.2.2. L'ENJEU ECONOMIQUE

L'impact économique, qui est le premier considéré quand on parle d'énergie dans les systèmes de production, est lié à son coût. Le coût énergétique est parmi les principales raisons qui ont poussé les entreprises à réduire et à mieux gérer leur consommation d'énergie et par conséquent réduire leurs factures énergétiques (Mukherjee, 2008). Pour certains types d'entreprises, notamment les industries à haute intensité énergétique (par exemple l'industrie sidérurgique, l'industrie du ciment, l'industrie du papier, les industries chimiques, etc.), le coût énergétique peut atteindre jusqu'à 60% des coûts opérationnels de l'entreprise (IEA, 2007). La réduction de la consommation énergétique permet donc dans certains cas de réduire significativement le coût du produit et donc améliorer la rentabilité. Elle permet également de réduire l'exposition de l'industrie à la volatilité des prix de l'énergie, qui a en soi un avantage économique (Steven Fawkes et al., 2016).

Mis à part le coût de l'énergie en elle-même, des coûts additionnels liés aux émissions du CO₂ peuvent joindre la facture énergétique. En effet, comme le secteur industriel est responsable d'environ un tiers des émissions carbone, différentes initiatives politiques mondiales ont imposé aux industriels de réduire leurs émissions des GES à travers des taxes, des permis d'émissions et des subventions (Morthorst, 2001; Unger and Ahlgren, 2005). Les entreprises qui améliorent leur efficacité énergétique et, par conséquent, leur empreinte carbone peut donc faire face aux défis et aux coûts résultant des réglementations actuelles et futures en matière d'émissions CO₂.

En plus des coûts engendrés directement par la consommation énergétique, cette dernière a un impact indirect sur l'économie de l'entreprise dû à une conscience sociale accrue des problèmes de l'environnement. Les consommateurs sont en train de changer leurs habitudes vis-à-vis de la performance environnementale des produits qu'ils achètent. Ils ont tendance à acheter de plus en plus des produits 'verts' et éco-énergétiques (Bunse et al., 2011). L'efficacité énergétique s'est donc intégrée dans les décisions des producteurs et aussi des consommateurs. Plusieurs entreprises manufacturières ont souligné que l'amélioration de leur performance

³ IEA : What are the energy-related carbon dioxide emissions from fossil fuels for the United States and the world? <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=79&t=11>

⁴ GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade

environnementale en adoptant une production éco énergétique, peut améliorer leur réputation et par conséquent leur compétitivité. En effet, aujourd'hui l'aspect protection de l'environnement, agit directement sur l'image de marque des entreprises et sur le marketing de leurs produits.

2.3. SOLUTIONS POUR ET BARRIERES CONTRE UNE MEILLEURE EFFICACITE ENERGETIQUE DANS L'INDUSTRIE

Comme nous avons pu le voir précédemment, les défis environnementaux et économiques auxquels le secteur industriel est confronté sont importants et celui-ci doit répondre de façon proactive. Les gouvernements ainsi que les industriels sont à la recherche continue des mesures les plus durables et les plus effectives pour améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie. Une amélioration de l'efficacité énergétique correspond à une diminution de l'apport d'énergie pour un même service rendu ou un même bien produit. Dans ce sens, l'efficacité énergétique a été définie par le standard ISO 50001 comme « *un ratio, ou autre relation quantitative, entre une performance, un service, un bien ou une énergie produits et un apport en énergie* » (ISO 50001, 2011). La performance énergétique, quant à elle, est un concept plus large et a été définie comme des « *résultats mesurables liés à l'efficacité énergétique, à l'usage énergétique et à la consommation énergétique* ».

Malgré que des solutions multiples pour une utilisation plus efficace de l'énergie existent déjà, un écart important demeure entre la théorie et la pratique (Bunse et al., 2011). Nous essayons dans cette partie de donner un aperçu sur les solutions qui ont été développées pour améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et les barrières contre une application réussite et efficace de ses solutions.

2.3.1. SOLUTIONS

De nombreuses solutions de différentes natures ont été développées pour une meilleure maîtrise de l'énergie. Nous les classons dans cette partie en trois grandes catégories (inspiré de (Abdelaziz et al., 2011)):

- Des solutions par l'impositions des politiques, des lois et des réglementations que nous détaillons ci-dessous ;
- Des solutions par l'insertion des nouvelles technologies d'efficacité énergétique ;
- Des solutions par management de l'énergie.

Les politiques énergétiques : Accords, lois, standards et réglementation

Une politique énergétique est la manière dont une entité donnée (souvent gouvernementale) a décidé d'aborder les problèmes de développement énergétique, y compris la production, la distribution et la consommation d'énergie (Abdelaziz et al., 2011). Les politiques énergétiques peuvent inclure les législations, les traités internationaux, les incitations à l'investissement, les

accords, les lignes directrices pour la conservation de l'énergie, les fiscalités, les normes d'efficacité énergétique, etc. (Jacobs, 2009; Price and Worrell, 2000). Ces politiques sont à l'issue d'une conscience accrue du problème de réchauffement climatique. En effet, il était de plus en plus urgent que les nations mettent en place des politiques énergétiques qui répondent aux enjeux majeurs liés à la problématique énergétique et environnementale dans le monde. La première concertation internationale autour du changement climatique remonte à 1992 lors du sommet de Rio au Brésil puis à 1997 avec la signature du protocole de Kyoto au Japon, premier accord international fixant un engagement contraignant pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre par les pays industrialisés. L'Union Européenne, qui semble être au premier rang contre le changement climatique, a fixé de son côté en 2008 une série d'objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre réunis dans un plan d'action intitulé « Paquet climat-énergie ». Ce plan a fixé l'objectif ambitieux des "3*20" à atteindre avant 2020 : réduire de 20% les émissions de GES par rapport à l'année de référence 1990, améliorer de 20% l'efficacité énergétique et augmenter de 20% et une part de 20% d'énergie renouvelable dans la consommation de l'union européenne. Pour atteindre cet objectif, les états membres ont présenté le plan national d'allocation de quotas (PNAQ) qui fixe un plafond d'émission pour chaque installation. Les entreprises dépassant leurs quotas, notamment les entreprises à forte consommation d'énergie, peuvent acheter des crédits inutilisés auprès d'établissements plus performants sur le plan environnemental. Si elles ne sont pas dans la mesure de restituer autant de quotas que d'émissions constatées, elles doivent payer une amende (DIRECTIVE/87/CE, 2003). Baisser la consommation énergétique est donc l'une des solutions les plus évidentes pour baisser les émissions de GES et alléger la facture énergétique.

Les technologies d'efficacité énergétique

Une bonne part des économies potentielles d'énergies provient de l'insertion de nouvelles technologies conçues pour réduire la consommation énergétique dans l'industrie. Dans les dernières décennies, le nombre de technologies d'efficacité énergétique a explosé grâce à l'encouragement et aux subventions consacrées à la recherche et au développement dans ce domaine. Par exemple, en 2000, un rapport sur les technologies éco-énergétiques émergentes a identifié environ 175 technologies pour réduire la consommation d'énergie dans une variété d'industries en développement ou à proximité de commercialisation (Martin et al., 2000).

Nous pouvons citer, parmi les technologies qui ont trouvé un grand succès dans la réduction de la consommation énergétique dans l'industrie, les variateurs de vitesse. Un variateur de vitesse est un dispositif électronique permettant de régler la vitesse et le moment d'un moteur électrique en variant la fréquence. Cette technologie a permis de faire des économies significatives d'énergie dans plusieurs applications industrielles (Mecrow and Jack, 2008) et par conséquent des réductions dans la facture énergétique et dans les émissions CO₂. Par exemple, un fabricant de produits alimentaires au Royaume-Uni a réalisé une économie d'énergie annuelle de 769 MWh, plus de 30 000 € économisés sur sa facture d'électricité et une réduction annuelle de CO₂ de 338 tonnes (Tolvanen, 2008).

Une autre technologie d'efficacité énergétique qui est devenue très appliquée dans l'industrie est l'utilisation des moteurs à haut rendement. Les moteurs électriques sont utilisés dans une

grande variété d'applications notamment les ventilateurs, les compresseurs, les machines-outils, etc. Ils utilisent environ de 60 à 80% de l'électricité consommée dans le secteur industriel en Europe. Dans l'industrie, un moteur consomme une quantité annuelle d'électricité qui coûte approximativement cinq fois plus cher que son prix d'achat (de Almeida et al., 1997). Cela a encouragé les industriels à adapter les moteurs à haut rendement qui permettent de réaliser des économies annuelles significatives. Selon (Saidur et al., 2009), l'économie d'énergie annuelle résultante de l'installation des moteurs à haut rendement avec un facteur de charge 100% peut atteindre jusqu'à 24,839 MWh.

De nombreuses autres technologies d'efficacité énergétiques existent de nos jours notamment les systèmes de récupération d'énergie, les systèmes de contrôle pour l'arrêt des machines, la tri-génération, pour n'en nommer que quelques-unes. Pour plus de détails sur les technologies de réduction de consommation énergétique se référer à (Abdelaziz et al., 2011; Pons et al., 2013).

Le management de l'énergie

Malgré l'existence de nombreuses technologies pour la réduction de la consommation énergétique, celles-ci seules restent insuffisantes pour des résultats optimaux. Les technologies doivent être déployées dans une démarche plus globale et être soutenues par des solutions organisationnelles d'où l'émergence des systèmes de management de l'énergie. Nous notons tout d'abord que le management de l'énergie est l'ensemble des processus nécessaires à l'amélioration continue de la performance énergétique de toute organisation. C'est un levier d'action pour l'économie d'énergie car il peut impacter 60 % de la demande d'énergie mondiale selon l'Agence Internationale de l'Energie. En pratique, une réduction de 5 à 40 % de la consommation énergétique est potentiellement envisageable. Le terme 'management' en lui-même peut être défini comme *'les fonctions de planification, d'organisation et de contrôle du processus de transformation et son utilité dans la fourniture d'un bien ou d'un service aux clients'* (Blackstone, 2008). O'Callaghan et Probert définissent le 'management de l'énergie' comme un management s'appliquant 'aux ressources ainsi qu'à l'approvisionnement, à la conversion et à l'utilisation de l'énergie. Essentiellement, il s'agit de surveiller, de mesurer, d'enregistrer, d'analyser, d'examiner de manière critique, de contrôler et de rediriger les flux d'énergie et de matériaux à travers les systèmes afin que le moins d'énergie soit dépensé pour atteindre des objectifs valables' (O'Callaghan and Probert, 1977). Le management de l'énergie s'est considérablement élargi dans les industries avec différents niveaux de maturité (Ngai et al., 2013). Aujourd'hui, la mise en œuvre d'un système de management de l'énergie (SMé) est encadré par des normes internationales, notamment l'ISO 50001. Cette norme est fondée sur la méthodologie d'amélioration continue dite PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Figure 6) et intègre l'efficacité énergétique dans les pratiques managériales des entreprises industrielles.

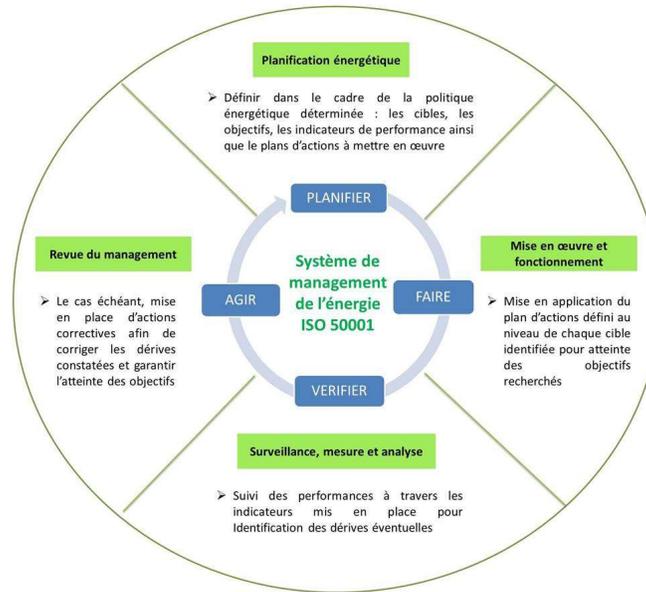


Figure 6. Version traduite du PDCA - ISO 9001

Cette norme contient des exigences pour l'installation des systèmes de monitoring d'énergie tel que les systèmes automatiques de surveillance et de suivi de l'énergie, premier SMé développé en Royaume Uni (connu sous le nom de Monitoring & Targeting system). Les SMé qu'on peut trouver aujourd'hui sur le marché, par exemple le 'eSight Energy' et le 'EnergyCap' peuvent collecter des données énergétiques en utilisant un ou plusieurs sous-compteurs liés à plusieurs capteurs d'énergie (électrique, gaz, etc.) et les afficher à différents niveaux de l'entreprise allant du terrain jusqu'au niveau des décideurs (Vikhorev et al., 2013). Malgré le fait que les SMé n'économisent pas directement de l'énergie, ils sont indispensables pour l'identification des potentiels d'efficacité énergétique et par la suite la mise en œuvre des mesures associées. Cela peut être atteint en comparant les données enregistrées par les systèmes de monitoring avec les données de référence. Selon la situation initiale, les entreprises peuvent économiser jusqu'à 10 % dès la première année de la mise en place d'un système de monitoring de l'énergie⁵. Cependant, ces systèmes souffrent d'un manque de standardisation et d'une corrélation automatique entre les données énergétiques et les activités de production. Des chercheurs ont proposés des systèmes d'information énergétique plus avancés (Zampou et al., 2014) et à aller plus loin avec les SMé en les intégrant aux MES (Manufacturing Execution System) (Karnouskos et al., 2009 ; Vijayaraghavan and Dornfeld, 2010; Vikhorev et al., 2013). Cela permet de pallier aux problèmes de corrélation de données et de l'interopérabilité des systèmes, mais il manque des algorithmes permettant d'analyser les flux de données et d'assister les prises de décisions à la fois liées à l'énergie et à la production. Des chercheurs ont donc proposé des approches systématiques pour l'analyse des données énergétiques dans les systèmes de production en utilisant la simulation (Herrmann and Thiede, 2009a; Thiede et al., 2012). Cela permet d'analyser la dynamique entre les processus de production et la

⁵ Energy Efficiency Potentials and barriers for realization in the industry sector, Juillet 2013, par World Energy Council

consommation énergétique mais aussi d'appuyer la prise de décision avec des modèles paramétrables permettant de tester tout changement éventuel de situation.

2.3.2. BARRIERES

De nombreuses solutions d'efficacité énergétique existent pour l'Industrie, pour autant celles-ci ne sont pas toujours mises en œuvre. Des exemples de la littérature et du monde industriel ont montré qu'il y a de nombreuses barrières qui font que le potentiel d'efficacité énergétique ne soit pas exploité, voir par exemple (Cagno and Trianni, 2014; Hasanbeigi et al., 2010 ; Rohdin and Thollander, 2006).

Rhodin et al. (Rohdin et al., 2007) ont classé ces barrières sous trois catégories principales :

- Des barrières économiques (liées au coût des solutions et à leur rentabilité) ;
- Des barrières comportementales (liés aux comportements des personnes impliquées, les valeurs, les ambitions, etc.) ;
- Des barrières organisationnelles (liées à la culture et au pouvoir).

Cependant, les barrières économiques restent les plus discutées dans le débat sur l'inefficacité des solutions d'efficacité énergétiques. Celles-ci se concentrent, d'une part sur des investissements relativement élevés pour des technologies efficaces et un coût l'énergie relativement faible conduisant ainsi à un temps d'amortissement peu attractif et d'une autre part sur un capital limité pour la mise en œuvre des mesures d'efficacité énergétique.

Le manque de transparence et d'information concernant le comportement énergétique de l'ensemble de système de production ou de ses parties présente aussi un obstacle contre une meilleur gestion d'énergie. En effet, l'énergie est un phénomène abstrait. Nous pouvons vite identifier des pertes de matières mais les pertes d'énergie sont plus complexes à identifier. Il est aussi important d'avoir des informations plus claires sur les grands consommateurs d'énergie pour prioriser les actions pour une meilleure maîtrise d'énergie. Cela doit se faire en analysant à la fois la puissance appelée par l'équipement consommateur et sa durée opératoire (Thiede et al., 2012). Par exemple, les machines critiques sont celles qui appellent une forte puissance et qui ont un temps opératoire élevé. Les industriels font recours dans ce cas à des systèmes de monitoring d'énergie ou à des audits énergétiques mais ces solutions sont souvent très coûteuses.

Une autre barrière qui n'est pas de moindre importance est la préoccupation des industriels concernant les influences négatives potentielles sur la performance générale de la production. En effet, les investissements en efficacité énergétique ne sont pas forcément des investissements productifs et la mise en place de telles solutions engendre parfois des conflits entre les objectifs de la production et les objectifs de l'amélioration de l'efficacité énergétique. Il faut donc trouver un équilibre adapté aux deux objectifs. Ceci n'est pas forcément facile à trouver vue l'interdépendance accrue entre les activités de production et la consommation énergétique. Cela a guidé plusieurs recherches scientifiques dans le sens de la modélisation de la consommation énergétique des systèmes de production pour une meilleur compréhension de leur comportement énergétique et en particulier pour comprendre la relation entre l'énergie

demandée et l'activité exécutée (Cataldo et al., 2013; Seow and Rahimifard, 2011; Thiede et al., 2013).

CONCLUSION

Le contexte énergétique que nous avons pu décrire dans ce chapitre fait que l'amélioration de l'efficacité énergétique devient une préoccupation importante des industriels. Pour résumer, cette dernière peut contribuer à la durabilité des industries en agissant principalement sur l'aspect économique (en réduisant les charges directes et indirectes liées à la consommation énergétique et en améliorant l'image de marque des industries qui font face à une société de plus en plus consciente des problèmes de l'environnement) et sur l'aspect environnemental en réduisant les émissions des gaz à effet de serre et par conséquent atténuer le réchauffement climatique. Malgré l'existence de nombreuses solutions pour une meilleure maîtrise d'énergie notamment l'émergence des politiques énergétiques dans le monde entier, le développement de nouvelles technologies pour la réduction de la consommation énergétique et aussi l'insertion accrue des systèmes de management de l'énergie au sein des systèmes de production, plusieurs barrières contre l'amélioration de l'efficacité énergétique existent encore. Nous mettons l'accent dans ce travail sur le manque de transparence et les conflits avec la productivité comme deux barrières principales que nous souhaitons aider à franchir. En effet, Une bonne maîtrise de la consommation passe par une meilleure compréhension du comportement énergétique du système et par une capacité de prévoir ce comportement et son influence sur la production. Dans ce travail, nous cherchons donc à proposer un outil qui aidera les décideurs à appuyer leurs décisions face à des objectifs difficilement conciliables en leur permettant de mieux comprendre l'évolution du comportement énergétique de leurs systèmes, ou une partie de leurs systèmes, et de le relier avec l'évolution des activités en cours. Cet outil leur permettra également d'identifier les pertes ainsi que les pistes potentielles d'économie d'énergie, tester virtuellement des différents scénarios notamment pour pouvoir analyser l'influence des différentes solutions technologiques ou organisationnelles sur la production. Notons enfin qu'une particularité importante des énergies renouvelables est leur disponibilité, qui dépend des conditions climatiques. Etre capable de prévoir la consommation énergétique pourra permettre une meilleure utilisation de ces énergies renouvelables en adaptant l'activité à leur disponibilité. Or, pour arriver à prévoir la consommation énergétique et comprendre son comportement, il faut la modéliser et la simuler. Nous présentons donc dans le prochain chapitre l'état de l'art sur la modélisation et la simulation de la consommation énergétique dans les systèmes de production.

CHAPITRE 2 :
MODELISATION ET SIMULATION DE LA
CONSOMMATION ENERGETIQUE :
ETAT DE L'ART

INTRODUCTION

La situation énergétique telle qu'elle est décrite dans le chapitre précédent nécessite une réponse proactive du secteur industriel pour parvenir à des solutions fiables permettant de mieux gérer la consommation énergétique dans les systèmes de production. Pour parvenir à cette fin, la modélisation et la prédiction de la consommation énergétique est une étape importante étant donné qu'elle permet une meilleure compréhension du comportement énergétique et qu'elle permet aussi d'appuyer les décisions dans un environnement complexe et contraignant.

L'importance de cette étape justifie le grand nombre des travaux qui existent dans la littérature à ce jour et qui ont tenté de modéliser, prédire et estimer la consommation énergétique à différents niveaux du système de production, dans des domaines différents et pour des intérêts différents. Nous décrivons dans une première partie de ce chapitre l'état de l'art sur ces travaux tout en précisant les objectifs, les méthodes employées ainsi que le périmètre de modélisation. Dans la deuxième partie, nous mettons l'accent sur la simulation à événements discrets comme l'une des approches pertinentes pour prédire la consommation énergétique dans un cadre global permettant de prendre en compte sa dynamique et son interdépendance avec l'environnement de production. Cette deuxième partie de chapitre décrit les travaux qui ont été déjà réalisés dans cette optique et montre les limites de ces derniers. Basés sur ces conclusions, la dernière partie de ce chapitre présentera synthétiquement les verrous scientifiques auxquels nos travaux s'intéressent.

1. LA MODELISATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Nous donnons dans cette première section un aperçu sur les objectifs de la modélisation de la consommation énergétique ainsi que les méthodes que l'on peut trouver dans la littérature.

1.1. OBJECTIFS

MODELISER POUR COMPRENDRE...

Le comportement énergétique des unités de production est difficile à modéliser. Le fait de le modéliser permet une meilleure compréhension de son évolution au cours du temps et des différents facteurs qui l'influencent. A titre d'exemple, une activité de tournage dépend de plusieurs facteurs liés aux conditions de l'outil (le matériau, la géométrie, l'usure, etc.), au matériau de la pièce à usiner (généralement en rapport avec sa dureté et son usinabilité), aux paramètres de la coupe (vitesse, profondeur, etc.) et à la lubrification (présente ou pas, micro-lubrification, etc.). Le fait de développer un modèle permet de comprendre l'influence de tous ces facteurs sur la consommation d'énergie (Li and Kara, 2011).

Modéliser la consommation énergétique c'est aussi comprendre sa dynamique, sa relation avec les activités en cours et tenir compte de son interdépendance avec les différentes parties du

système. En effet, la dynamique de la consommation d'une machine dépend de l'état de la machine et de la tâche qu'elle est en train d'effectuer (Rahimifard et al., 2010). Ces tâches (ou activités), n'apportent pas toujours de valeur ajoutée et engendrent des consommations additionnelles. Celles-ci ne dépendent pas uniquement de la machine ou du produit fabriqué mais aussi de l'organisation de la production et de la stratégie de contrôle des machines (Frigerio and Matta, 2014; Langer et al., 2014). Donc comprendre le comportement énergétique d'un système de production revient avant tout à comprendre sa relation avec l'organisation de la production.

MODELISER POUR PREDIRE, ESTIMER...

La prédiction, l'estimation et l'évaluation de la consommation énergétique dans les systèmes de production est utile à des phases avancées du développement du produit ou du système en lui-même (phase de conception), aussi bien qu'à des phases moins avancées (la phase opérationnelle). Dans la phase de conception, l'estimation et l'évaluation de la consommation énergétique sert principalement à appuyer les décisions pour renforcer la performance énergétique (Madan et al., 2015). Avec des industries de plus en plus préoccupées par le développement durable, l'estimation de l'énergie consommée est devenue nécessaire et doit être appliquée, en parallèle avec d'autres pratiques, pour contribuer à un système de production durable (Heilala et al., 2008). Des chercheurs ont également développé des modèles de consommation énergétique dans le but d'estimer cette dernière et par la suite alimenter les Inventaires de Cycle de Vie (ICV) produit (Abele et al., 2005; Kellens et al., 2011a).

Prédire la consommation énergétique au niveau d'un système de production permet aussi de respecter le contrat de fourniture d'énergie négocié au préalable avec le fournisseur ou de négocier celui-ci, si pas encore établi. En effet, les fournisseurs d'électricité exigent que leurs clients respectent un certain seuil de puissance au-dessus duquel ils sont obligés de payer des pénalités de dépassement très onéreuses. Une bonne prédiction de la consommation d'énergie (d'électricité dans ce cas) est nécessaire pour éviter des coûts supplémentaires, soit du fait des pénalités en cas de sous-estimation, soit du fait des contrats trop onéreux en cas d'une surestimation.

Du côté producteur d'électricité, il est également très important de comprendre et d'anticiper les volumes d'énergies consommés (DJEMAA, 2009). Cela leur permet de prévoir les futurs besoins électriques, adapter la production d'électricité à la demande et même envisager des investissements. Donc la prédiction de la consommation énergétique a des répercussions évidentes aussi bien sur le fournisseur que sur le consommateur d'énergie. Dans l'industrie, cette prédiction passe préalablement par l'analyse des procédés les plus énergivores et la modélisation de leur consommation énergétique.

MODELISER POUR OPTIMISER...

L'intérêt final de modéliser, comprendre et estimer la consommation énergétique est d'optimiser celle-ci en la réduisant et/ou en réduisant les coûts qu'elle engendre pour répondre finalement à des objectifs économiques et environnementaux.

Quant à la réduction de la consommation énergétique, la modélisation permet par exemple d'identifier les pertes et par conséquent chercher des pistes potentielles d'amélioration. L'une des sources majeures des pertes identifiées dans les systèmes de production est le fait que les machines restent longtemps dans des états à non-valeur ajoutée (NVA). Des recherches ont montré que la consommation énergétique dans ces états est non négligeable et doit être considérée dans le modèle (Gutowski et al., 2006; Schmidt et al., 2015). Bien que l'optimisation de ce type de consommation a été abordée dans plusieurs recherches en proposant différentes stratégies de contrôle et de réduction de temps d'inactivité (Duflou et al., 2012 ; Frigerio and Matta, 2014 ; Langer et al., 2014), les potentiels sont rarement développés dans des applications industrielles. (Weinert and Mose, 2014) ont évoqué deux causes majeures : un manque d'information sur les efforts ainsi que les avantages et une incertitude sur les effets négatifs qui en résultent. Les auteurs proposent donc d'utiliser un modèle de simulation pour étudier les stratégies de mise en veille des machines dans les périodes d'inactivité et évaluer leurs impacts.

Outre l'identification des pertes durant les périodes d'inactivité, la modélisation de la consommation énergétique permet d'établir le niveau d'énergie allouée qui n'est que le niveau raisonnable de la consommation dans des conditions spécifiques (Zhou et al., 2015). Ceci permet d'identifier les surconsommations en comparant l'énergie allouée à l'énergie réellement consommée et par conséquent l'optimiser en cherchant des mesures efficaces. Dans le même objectif d'identification des surconsommations, (Madan et al., 2015) ont modélisé et estimé la consommation énergétique d'un processus de moulage par injection et ont proposé de la comparer à un seuil de référence obtenu dans l'industrie. Cela leur permet de chercher des stratégies d'optimisation en évaluant le taux de performance énergétique qui n'est que le ratio de l'énergie estimée sur la consommation de référence.

Quant à la réduction des coûts énergétiques, celle-ci n'est pas seulement atteinte en réduisant la consommation énergétique mais elle peut aussi l'être pour la même quantité d'énergie consommée mais avec des plans de production optimisés dans le but de ne pas dépasser les seuils de puissance évoqués précédemment. Ceci a mené plusieurs recherches à s'intéresser au problème de planification sous contraintes énergétiques afin d'optimiser la consommation énergétique et le coût qu'elle engendre (Artigues et al., 2013; Tonelli et al., 2016).

1.2. METHODES ET APPROCHE DE MODELISATION ET DE PREDICTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

Nous pouvons trouver dans la littérature de nombreuses méthodes et approches qui ont été utilisées pour modéliser et prédire la consommation énergétique. Parmi ces méthodes, on peut citer les modèles mathématiques, les modèles empiriques, les graphes de liaison et la simulation de flux. Nous détaillons ci-dessous chacune de ces méthodes en nous appuyant sur les travaux déjà réalisés pour modéliser la consommation énergétique dans différents domaines.

1.2.1. LES MODELES MATHEMATIQUES

Dans certains cas, la valeur théorique de l'énergie consommée par un processus peut être calculée en fonction des connaissances existantes et /ou des modèles mathématiques appropriés. La plupart des processus de production dépendent de l'enlèvement, de la fusion, de la vaporisation ou de la déformation des matériaux, l'énergie requise peut donc être déterminée par un certain nombre de paramètres spécifiques du processus (Seow and Rahimifard, 2011). Par exemple, pour un processus d'usinage, la consommation énergétique peut être calculée théoriquement en se basant sur l'énergie spécifique de coupe du matériau et le volume à enlever. Un grand nombre de modèles mathématiques de la consommation énergétique que l'on peut trouver dans la littérature sont d'ailleurs appliqués à des machines-outils. Celles-ci présentent une part significative de la consommation totale des systèmes manufacturiers (Zhou et al., 2016). A titre d'exemple, (Liu et al., 2014) ont établi un modèle mathématique pour prédire la consommation énergétique d'une machine-outil en cours d'usinage. Les auteurs ont subdivisé le procédé en 3 périodes : une période de démarrage, une période d'inactivité et une période de coupe dont la puissance est calculée à partir des paramètres d'usinage et des coefficients de perte. (Zhou et al., 2015) ont développé un modèle mathématique pour modéliser la consommation énergétique d'une étape d'usinage comme étant la somme des consommations spécifiques de chaque sous-étapes d'usinage et le ratio de la consommation auxiliaire de l'atelier. En effet, la consommation intrinsèque de la machine est souvent insuffisante pour modéliser d'une manière précise la consommation totale d'un procédé ou d'un produit. Celle-ci dépend fortement de l'environnement de production et des conditions de production (Zhou et al., 2016). Un exemple de calcul de la consommation en tenant compte de l'environnement de production peut être trouvé dans (Rahimifard et al., 2010). Dans ce travail, les auteurs ont proposé un modèle mathématique pour le calcul de la consommation énergétique d'un produit unique en la considérant comme la somme de l'énergie directe (consommée par les procédés par exemple l'usinage, le moulage, etc.) et indirecte (consommé par l'environnement de production dans lequel le procédé a été exécuté, par exemple l'éclairage, le chauffage, etc.). L'énergie directe est à son tour la somme de l'énergie théorique nécessaire à effectuer une étape du processus de fabrication (par exemple faire fondre le métal) et de l'énergie auxiliaire requises par les machines de support appelées aussi utilités (par exemple l'air comprimé, le refroidissement, la génération de vapeur, etc.). Les auteurs ont utilisé ces modèles mathématiques pour alimenter un modèle de simulation qui leur permet de considérer l'aspect dynamique du système. La modélisation mathématique peut donc servir à alimenter d'autres projets, que ce soit des projets de simulation ou des ICVs par exemple (Abele et al., 2005; Kellens et al., 2011a).

1.2.2. LES MODELES EMPIRIQUES

Dans d'autres cas, la complexité accrue de la machine oblige à faire recours à des modèles empiriques : seule la réalisation de mesures expérimentales va permettre d'appréhender et modéliser leur consommation. Les modèles empiriques sont développés en fonction des données observées des expériences pour des variables données lorsque des modèles

déterministes de ces variables sont inconnus. Cela revient à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs qui sont susceptibles de le modifier. Il faut donc mesurer une réponse du système modélisé et essayer d'établir des relations de causes à effets entre cette réponse et les facteurs d'entrée (Montgomery et al., 2007). Pour parvenir à la définition d'un modèle empirique, il faut passer par plusieurs étapes dont la définition des facteurs, la définition du domaine expérimental, la construction du plan d'expériences, l'expérimentation et l'analyse des résultats (Rabier, 2007). Leur utilisation a plusieurs intérêts, notamment la détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé, l'optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un d'appareil de mesure et la prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Quand appliqué à la modélisation énergétique en particulier, ces modèles sont utilisés dans le but de caractériser la relation entre la consommation énergétique et les paramètres du processus. Par exemple, (Li and Kara, 2011) ont essayé de modéliser la consommation énergétique d'une machine-outil. Dans le but de comparer la consommation sous différentes conditions opérationnelles, les auteurs ont fixé une unité fonctionnelle : l'énergie consommée pour retirer 1 cm³ de matière. Le modèle empirique a été obtenu à travers des mesures de puissance réalisées sous des différentes conditions de coupe. La consommation énergétique spécifique a été exprimée en fonction du taux d'enlèvement de matière. Les résultats obtenus ont montré que le modèle développé a été capable de prédire la consommation pour un ensemble donné de paramètres avec une précision de 90%. La même méthode a été employé par (Qureshi et al., 2012) pour modéliser la consommation énergétique d'un processus de moulage par injection et par (Li et al., 2013) pour modéliser la consommation d'une ligne d'extrusion.

Comme expliqué par (Li et al., 2013), le problème majeur des modèles empiriques réside dans le fait qu'ils nécessitent un effort considérable pour les mettre en place et un domaine d'application borné. Ceci est principalement dû au grand nombre d'expériences qui doivent être menées afin de tirer statistiquement des résultats valides pour différents paramètres opérationnels.

1.2.3. LES GRAPHES DE LIAISON

Les graphes de liaison ou 'bond graph' en anglais est une méthode graphique de modélisation pluridisciplinaire de systèmes dynamiques. Les graphes de liaison affichent à la fois des échanges d'énergie et de signaux entre composants ou éléments des systèmes par une représentation graphique simple basée sur des lignes et des symboles. Ils ont pour objectif de combler l'écart entre l'ingénierie de contrôle et les parties de la science de l'ingénierie où la puissance et l'efficacité ont une plus grande importance, y compris la conversion de l'énergie (Thoma, 2016). Cet outil met en avant les relations entre les flux et les efforts mécaniques, l'électricité, la thermodynamique, la thermique, l'énergétique, etc.

La modélisation d'un système par bond graph en elle-même est assez simple vu qu'il y a peu d'éléments à mettre en place et la démarche à suivre est relativement simple. Toute la difficulté réside dans le fait qu'une telle modélisation nécessite une bonne connaissance des systèmes physiques.

1.2.4. LA SIMULATION DE FLUX

La simulation de flux est une technique puissante pour prédire le comportement de systèmes complexes en phase de conception ou pour optimiser les performances du système existant. Traditionnellement, les projets de simulation accordent plus d'attention aux objectifs de productivité, aux délais, aux ressources nécessaires, aux coûts de production, etc. Depuis quelques années, de nouvelles études pour prédire la consommation énergétique au sein des systèmes de production apparaissent progressivement. Cette prédiction est souvent basée sur les états opérationnels de la machine et les niveaux de puissance qui leur correspondent (Kohl et al., 2014; Lorenz et al., 2012). Ces états sont liés par des transitions justifiant les passages possibles d'un état à l'autre et par conséquent un changement dans le comportement énergétique de la machine et du système (Cataldo et al., 2013). L'avantage de la simulation est qu'elle permet d'orchestrer dynamiquement les consommations engendrées par les différentes parties du système (machines, utilités, transport) et en déduire la consommation totale dans le but de l'optimiser (Gomes et al., 2013; Kruse et al., 2015a) et/ou réduire ses coûts notamment à travers des stratégies de planification et de contrôle optimisées (Solding and Petku, 2005; Solding and Thollander, 2006). Bien que la simulation soit une méthode de prédiction dans un cadre global du système de production, elle peut être supportée par les méthodes citées ci-dessus pour alimenter les données de consommation énergétique correspondant aux différents composants du système (Thiede et al., 2013).

La simulation a été utilisée pour prédire la consommation énergétique dans plusieurs domaines différents, notamment la robotique (Lorenz et al., 2012), la fonderie (Solding and Thollander, 2006), l'automobile (Herrmann and Thiede, 2009b), l'industrie du semi-conducteur (Page and Wohlgemuth, 2010), etc. Elle a été employée pour prédire la consommation énergétique et en même temps appuyer les décisions dans le sens de l'optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes de production. Cependant, et malgré les efforts déjà réalisés dans ce domaine de recherche, l'utilisation de la simulation pour la prédiction de la consommation énergétique présente toujours certains problèmes, notamment le problème de la gestion des données d'entrée et en particulier les données d'énergie (Kouki et al., 2017).

Une étude plus détaillée sur les travaux de simulation intégrant la consommation énergétique est présentée dans la section 2.2.

1.3. GRANULOMETRIE

La littérature présente de nombreux travaux liés à la prédiction de la consommation énergétique, mais ces travaux adoptent des points de vue relativement différents concernant le niveau de granulométrie du modèle, et plus précisément de l'évaluation de la consommation énergétique des moyens simulés. Cette section a pour objectif de présenter les deux approches principales et leurs justifications respectives.

1.3.1. NIVEAU PROCESSUS UNIQUE OU MACHINE UNIQUE

La fabrication d'un produit ou d'un composant nécessite souvent l'intégration d'une succession de processus uniques. Un processus de fabrication est une étape nécessaire pour transformer de la matière première ou semi-finie jusqu'à atteindre le produit fini. Une analyse et évaluation pertinente de la performance énergétique doit passer en premier lieu par la modélisation et l'analyse de la consommation énergétique d'un processus unique, souvent associé à une machine unique (Madan et al., 2015).

La consommation énergétique d'une machine est une fonction de la puissance appelée par celle-ci et sa durée de fonctionnement. La consommation d'une machine n'est pas constante au cours du temps mais dépend dynamiquement de processus de production et de son état actuel (*Figure 7*). Une machine est généralement composée de plusieurs équipements consommateurs d'énergie qui génèrent des profils de puissance lorsqu'ils sont activés à une étape donnée du fonctionnement de la machine (Gutowski et al., 2006).

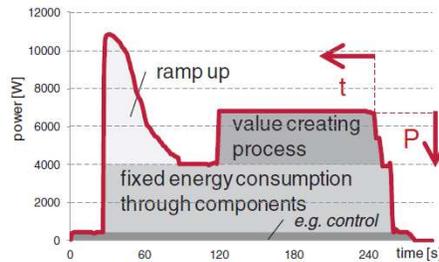


Figure 7. Profil énergétique typique d'une machine (Thiede et al., 2012)

Au cours de son fonctionnement, une machine passe par plusieurs états avec chacun un niveau de puissance différent. Un exemple de classification de ces états peut être trouvé dans (Devoldere et al., 2007; Dietmair and Verl, 2009). Les états standards et les plus communs des machines sont données dans le *Tableau 1*, la puissance appelée dans ces états pouvant être fixe ou variable. La puissance fixe est demandée pour maintenir l'état opérationnel de la machine (Li et al., 2011), et ne dépend pas du procédé de fabrication. La puissance variable est celle demandée pour opérer les équipements responsables de l'exécution du procédé de fabrication.

Il est à noter que l'effort de modélisation et de prédiction de la consommation énergétique d'une machine unique dépend fortement de sa complexité. Dans ce contexte, (Schmidt et al., 2015) ont identifié 4 groupes de machine selon les caractéristiques de leurs consommations énergétiques. Ces groupes sont, dans l'ordre de complexité croissante :

- Les machines simples ;
- Les machines simples réglables ;
- Les machines complexes à usage unique ;
- Les machines complexes à usages multiples.

Tableau 1. Exemple d'états de machine

Etat	Description	Puissance
En arrêt	La machine est complètement éteinte. Aucune consommation énergétique n'est enregistrée	Constante
Démarrage	Des pics de consommation peuvent être enregistrés à cet état à cause du démarrage de certains équipements ou de certaines phases de préchauffage, etc.	Variable
Libre	La consommation énergétique dans cet état est relativement constante, la machine est prête à produire	Constante
En veille	La machine a la majorité de ses équipements à l'arrêt, mais quelque uns restent activés pour réduire le temps de réactivation de la machine.	Constante
En production	La machine commence à être opérationnelle et crée de la valeur ajoutée (par exemple enlèvement de matière).	Variable

La procédure de classification utilise un ensemble de paramètres ajustables. Par exemple, si les paramètres de machine sont fixes, la machine est classée simple. Si un seul paramètre varie au cours de la production, la machine est classée réglable, sinon elle est classée complexe. La Figure 8 présente un exemple de profils énergétiques d'une machine simple (paramètres fixes) et d'une machine complexe (plusieurs paramètres variables). Cette classification a été déterminée dans le but d'adapter la méthode de prédiction la plus adéquate et par conséquent minimiser au maximum les efforts tout en assurant une bonne qualité de résultats.

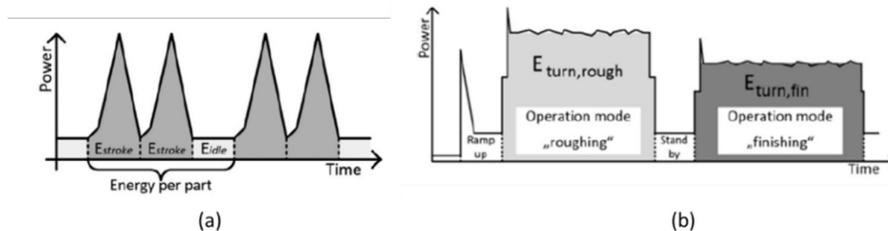


Figure 8. Profil énergétique d'une machine simple Vs profil énergétique d'une machine complexe (Schmidt et al., 2015)

1.3.2. NIVEAU SYSTEME DE PRODUCTION/USINE

Un système de production est une combinaison de différents processus de production et se compose généralement de diverses machines de fabrication ou de transport ainsi que du personnel. Tous ces facteurs de production sont planifiés et contrôlés par un système de

management de la production (Duflou et al., 2012). Tous les équipements techniques impliqués dans le système, avec chacun un comportement énergétique différent, entraînent des courbes de consommation énergétique cumulatives. L'étude de la consommation énergétique d'un système de production ne résulte pas d'une simple sommation de ces courbes car les différentes parties du système interagissent et peuvent avoir une influence négative ou positive les uns sur les autres (Apostolos et al., 2013). Une évaluation efficace des potentiels d'efficacité énergétique doit donc passer par une modélisation globale de l'ensemble du système de production (Dietmair and Verl, 2009; Fysikopoulos et al., 2012; Weinert et al., 2011). Cela inclut les machines qui composent le système et leurs interactions (la structure du système de production, les stocks tampons, etc.) ainsi que les aspects d'organisation de la production (les tailles de lots, la planification des ordres de production, la cadence, etc.). Un exemple montrant l'influence d'un aspect organisationnel, en particulier l'impact de la planification des ordres de production sur la consommation énergétique d'un système de production, est présenté dans la Figure 9. La figure montre qu'en changeant le séquençement des ordres de production, le profil de consommation change aussi. Un tel changement peut dans ce cas abaisser ou au contraire augmenter la puissance maximale appelée par le système de production.

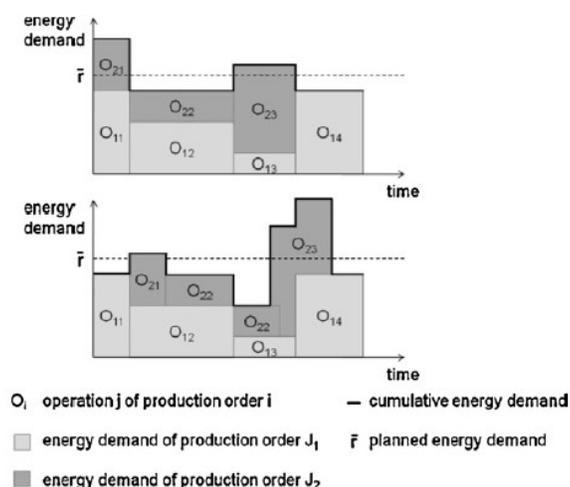


Figure 9. Influence de la planification de la production sur la demande d'énergie (Duflou et al., 2012)

Modéliser et prédire la consommation énergétique du système de production dans son ensemble permet donc d'optimiser l'organisation de la production aussi bien au niveau conception qu'au niveau opérationnel afin de réduire au mieux la consommation énergétique et les coûts associés.

En général, quand on parle de l'optimisation de l'organisation de production sous des contraintes énergétiques trois perspectives sont considérées :

- L'évitement des pics de consommation (Lorenz et al., 2012) ;
- La réduction des pertes d'énergie dans les périodes d'inactivité (Weinert and Mose, 2014) ;

- Le placement des activités énergivores dans les périodes de la journée ou l'énergie est la moins chère.

Pour couvrir ces problématiques, la simulation de flux a été largement utilisée dans la littérature, surtout à ce niveau de granulométrie de modélisation (Thiede et al., 2013). Elle permet de gérer la dynamique des flux énergétiques et des flux de production conjointement. La simulation permet de couvrir les différents niveaux du système de production allant de la simple machine jusqu'à l'usine complète. A ce niveau, (Herrmann and Thiede, 2009b) présentent une modélisation holistique de l'usine en intégrant les machines de production, les machines supports ou utilités jusqu'au bâtiment. Les différentes composantes du système modélisé ainsi que leurs interdépendances sont présentés dans la Figure 10.

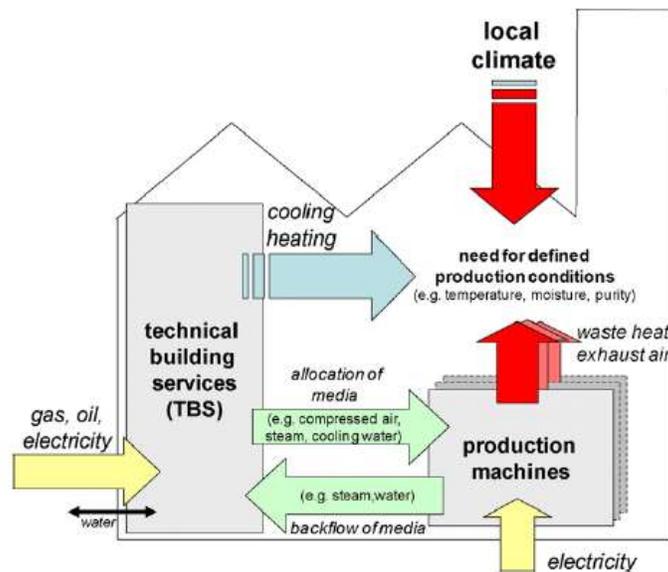


Figure 10. L'usine de production comme un système complexe (Herrmann and Thiede, 2009b)

2. LA SIMULATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

La Simulation à Evènements Discrets (SED) est, comme nous avons pu le voir dans la section précédente, la méthode la plus efficace et la plus utilisée quand on souhaite modéliser la consommation énergétique dans un cadre générale et plus précisément quand on souhaite tenir compte de sa dynamique et de son interdépendance avec les différentes composantes du système de production. La simulation présente plusieurs types d'approches et d'objectifs différents.

2.1. LA SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS

La SED est une technique qui permet de reproduire le comportement dynamique d'un système réel sur une maquette informatique afin de le mieux comprendre, maîtriser son évolution dans le temps et évaluer ses performances. Cette technique a démontré son utilité et sa puissance pour résoudre des problèmes complexes dans les phases de conception et d'analyse des systèmes de production (Law and Kelton, 2000). Comparant avec des méthodes de modélisation statiques, la SED permet d'aller à un niveau avancé de détails et permet aussi de s'affranchir d'hypothèses contraignantes et non réalistes.

2.1.1. LA SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS : QUELS AVANTAGES ET QUELLES LIMITES ?

La SED a été utilisée depuis plusieurs décennies dans plusieurs domaines d'application (automobile, aéronautique, agriculture, transport, etc.) pour résoudre différentes problématiques. Jusqu'à maintenant, ces problématiques sont principalement axées sur la conception générale du système, tels que la configuration et la disposition des installations, la manutention, le respect des deadlines, le dimensionnement des stocks, etc. Pour plus de détails sur l'utilisation de la simulation dans des travaux antérieurs, se référer à (Jahangirian et al., 2010; Negahban and Smith, 2014; Smith, 2003).

Cette technique présente de nombreux avantages, principalement en raison de sa capacité à capturer la dynamique d'un système. Certains des avantages de la SED ont été représentés dans (Law, 2007; Pegden et al., 1995) et synthétisés par (Thiede et al., 2013) comme suit :

- De nouvelles politiques, procédures d'exploitation, règles de décision, flux d'information, procédures organisationnelles, etc., peuvent être explorées sans perturber le système réel ;
- La conception de nouveaux équipements, des installations physiques, des systèmes de transport, etc., peuvent être testés sans avoir recours à des ressources réelles ;
- Des hypothèses sur pourquoi et comment certains phénomènes se produisent peuvent être testées pour des questions de faisabilité.
- Le temps peut être compressé ou étendu, ce qui permet une accélération ou un ralentissement des phénomènes à l'étude.
- Possibilité d'obtenir des informations sur l'interaction de certaines variables.
- Possibilité d'obtenir des informations sur l'importance de certaines variables pour la performance du système.
- L'analyse du goulot d'étranglement peut être effectuée
- Contribuer à la compréhension de la manière dont le système fonctionne réellement, et éviter une situation où les individus se contentent de croire qu'ils savent comment le système fonctionne.

- Des questions de type « Que se passe-t-il si ? » peuvent être résolues. Ceci est particulièrement utile dans la conception de nouveaux systèmes.

En parallèle à ce qu'elle peut faire et les avantages qu'elle présente, la simulation présente également quelques limites et inconvénients, (Banks et al., 2010) ont cité quelques-uns :

- Les résultats de SED peuvent être difficiles à interpréter en raison de présence du stochastique dans la majorité des modèles ;
- La SED peut être gourmande en temps et en ressources ;
- La SED est parfois utilisée abusivement alors que des solutions analytiques sont applicables et plus simples à mettre en œuvre ;
- L'élaboration d'un modèle de SED nécessite une expérience importante, la simulation si réduite à un simple exercice de programmation peut mener à des résultats erronés.

En plus de ces limites, nous soulignons la complexité de l'établissement certains modèles de simulation, ce qui limite l'expansion de l'utilisation de la simulation dans des problématiques spécifiques, et notamment la problématique environnementale qui nous intéresse lus particulièrement. Cependant, les logiciels de simulation évoluent constamment pour accélérer et faciliter la construction des modèles en proposant des modules paramétrables. L'un d'entre eux, Arena® de Rockwell Automation, propose ainsi des bibliothèques personnalisables qui permettent de répondre à un besoin spécifique en encapsulant du code dans des modules paramétrables qui faciliteront la construction des modèles et donneront la main à des non-spécialistes de la simulation pour gérer des projets de modélisation et de simulation.

2.1.2. LE PROCESSUS DE SIMULATION A EVENEMENTS DISCRETS

Plusieurs propositions pour décrire les étapes d'un processus de SED existent dans la littérature. L'une des plus simples est la démarche en 4 étapes comme décrit dans la Figure 11 (Ye, 2013).

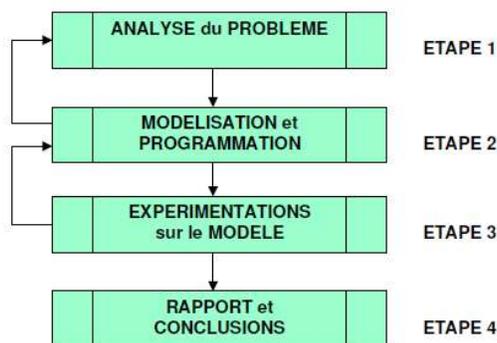


Figure 11. Les 4 étapes d'un processus de simulation

Cette démarche est la plus simple et synthétique pour l'élaboration d'un projet de SED (d'autres plus complexes et plus détaillés existent, par exemple (Balci, 1990; Nordgren, 1995)).

- Analyse du problème : L'analyse du problème est une étape préliminaire et indispensable dans tout projet de simulation. C'est dans cette première étape que les objectifs, les résultats ainsi que le niveau de précision attendu sont fixés. Il faut pouvoir fournir à cette étape une description du flux (cartographie des processus) ainsi que les données numériques nécessaires pour faire tourner le modèle et reproduire le comportement réel du système (données relatives aux gammes de produits, aux moyens de production, aux systèmes de manutention, aux stocks, etc.).
- Modélisation et programmation : Cette étape consiste à coder le modèle dans un langage informatique approprié. (Davis, 1998) définit cette étape comme étant '*la traduction du modèle conceptuel en une forme compréhensible par un ordinateur*'. Dans cette étape, le choix de l'outil est d'une importance capitale (Law and Kelton, 2000). Ces outils sont souvent regroupés en deux grandes catégories : des langages de programmation et des logiciels de simulation. L'utilisation des langages de programmation (par exemple Fortran, C, C++, etc.) présente plusieurs avantages tel que la flexibilité, la durée d'exécution, le coût relativement faible des logiciels de programmation. Cependant, l'effort de développement des modèles complexes est parfois très lourd et contraignant. Cela peut être résolu avec les logiciels de simulation qui ont beaucoup évolué pour offrir des plateformes de modélisation et de simulation dotées de fonctionnalités préprogrammées à l'aide des interfaces graphiques, interactives et intuitives. Malgré l'évolution des logiciels de simulation, certaines fonctionnalités restent manquantes ou difficiles à exploiter.
- Expérimentation : C'est l'étape de l'exploitation de la simulation pour évaluer le comportement du système. Pour bien mener cette étape, il faut avoir défini au préalable les paramètres sur lesquels on va agir pour répondre aux objectifs définis dans la première étape. La variation de ces paramètres génère plusieurs scénarios qu'on peut exploiter et analyser dans la prochaine étape.
- Rapports et conclusion : cette étape consiste à exploiter les résultats fournis par le modèle de SED lors de la phase d'expérimentation et les analyser. Cela permet d'évaluer la performance du système en analysant les indicateurs préalablement définis. La comparaison des différents scénarios et le choix de la meilleure solution se font aussi à cette étape d'étude. Cette étape d'analyse peut nécessiter des outils annexes surtout quand il s'agit des modèles stochastiques. Les éditeurs de logiciels de simulation ont donc proposé des modules statistiques pour l'analyse des résultats, notamment Output analyzer dans Arena®, AutoStat dans Promod, SimRunner dans Promodel, etc.

Considérant la SED intégrant l'énergie, plusieurs questions se posent lors du développement des solutions, et qui correspondent à chaque étape de processus de simulation :

- Comment l'utilisateur va-t-il incorporer ses propres données de consommation énergétique dans le modèle et comment faire pour adapter le niveau de précision souhaité aux données disponibles ?
- Comment peut-il construire son modèle facilement et rapidement d'une manière qui soit flexible et réutilisable ?
- Quels sont les paramètres les plus pertinents sur lesquels il doit agir dans la phase d'expérimentation ?
- Quels sont les résultats et indicateurs les plus pertinents qu'il souhaite visualiser afin d'analyser le système et prendre des décisions ?

Pour répondre à ces questions, nous avons étudié de près les projets intégrant la consommation énergétique dans la SED présents dans la littérature afin d'avoir une idée sur ce qui existe en réponse à cette problématique et afin de déterminer les limites de la littérature sur ces sujets.

2.2. LES PROJETS INTEGRANT LA CONSOMMATION ENERGETIQUE A LA SED DANS LA LITTERATURE

Plusieurs initiatives pour coupler la modélisation de la consommation énergétique et la SED existent dans la littérature. En réponse aux préoccupations actuelles de la société, la communauté scientifique s'est intéressée avant tout aux impacts environnementaux. Les recherches portant sur la modélisation des flux d'énergie couplée à la SED ont essentiellement été orientées vers l'amélioration des performances de durabilité des systèmes de production. Une production durable doit être éco-efficace et les impacts environnementaux associés aux produits devraient être évalués, notamment la consommation énergétique. Cela impose plusieurs paramètres à gérer simultanément et crée probablement de possibles conflits d'intérêts. De ce fait, les décideurs ont besoin d'outils fiables pour appuyer leurs décisions lors de la conception ou du contrôle d'un système de production durable.

Une méthode utilisée est l'évaluation du cycle de vie (ECV), mais elle permet simplement une modélisation statique par rapport à la SED (Thiede et al., 2013). La modélisation dynamique utilisant la SED est un moyen fiable pour intégrer des facteurs environnementaux tout en analysant le système de production dans une approche holistique avec toute sa dynamique et ses interactions. Le projet SIMTER a été parmi les premiers efforts développés à cette fin (Heilala et al., 2008). Il considère les aspects environnementaux (consommation d'énergie, émissions, déchets matière, etc.), l'ergonomie et le niveau d'automatisation afin de résoudre les conflits d'intérêts issus de ces trois problèmes dans la phase de planification et de conception du système. Par exemple, d'un point de vue environnemental, un matériau peut avoir des excellentes caractéristiques mais d'un point de vue ergonomique il peut être nocif. Plusieurs cas d'étude joignant l'ACV et la SED ont été développés à l'issue du projet SIMTER ainsi que d'autres projets notamment REELIV et EcoProIT (Andersson et al., 2012). Ces expériences ont

été évaluées et comparées par (Andersson et al., 2012) qui a souligné la nécessité d'approches standards et un manque de résultats solides. Les auteurs ont aussi constaté que la gestion des données dans tous ces cas d'étude est problématique. (Lee et al., 2014) ont introduit une nouvelle approche de modélisation et de simulation pour l'ACV dans les systèmes manufacturiers. Les auteurs ont donc défini les indicateurs de durabilité, une méthode d'évaluation et une méthode de gestion des informations dans le but d'évaluer la performance des systèmes manufacturiers en matière de durabilité.

Dans le même contexte, (Page and Wohlgemuth, 2010) estiment que leur approche pour relier la SED et l'analyse écologique des flux de matière peut être considérée comme une contribution substantielle à l'Informatique Environnementale. Cette dernière a été définie comme une '*sous-discipline spéciale de l'informatique appliquée traitant des méthodes, des techniques et des outils de l'informatique pour analyser, soutenir et mettre en place les procédures de traitement de l'information qui contribuent à l'analyse, à l'évitement et à la réduction du fardeau environnemental et ses dommages*'. L'approche proposée est basée sur les Réseaux de Petri (RdP). En effet, lorsqu'ils sont combinés avec la SED, les RdPs fournissent un modèle plus fiable qui peut analyser les flux de production et les flux d'énergie explorant à la fois les impacts environnementaux et économiques des décisions commerciales. Le concept de base de cette approche repose sur l'activation et la désactivation des plug-ins appropriés. Deux groupes de plug-ins développés à cet effet peuvent être distingués. Le premier offre des fonctionnalités pour la simulation à événements discrets (plug-in pour créer des variables aléatoires, plug-in pour la gestion du temps et la gestion de la liste des événements, etc.). Le second traite des aspects de l'analyse du flux de matériaux (plug-in pour l'administration des matériaux utilisés dans le modèle, le plug-in avec les indicateurs de matériel, etc.).

Bien que ces approches et quelques autres ont été développées pour relier la SED et la modélisation des facteurs environnementaux, notamment la consommation énergétique, il reste un écart entre les outils commercialisés disponibles, les besoins réels de l'industrie et la littérature scientifique. Dans ce contexte, (Thiede et al., 2013) ont mené une étude sur treize logiciels de simulation existants afin de comprendre leurs caractéristiques et leurs capacités. Les auteurs ont intégré les approches existantes de simulation axées sur l'environnement (y compris la modélisation de la consommation énergétique) et ont souligné la nécessité d'un développement plus poussé des efforts déployés dans ce sens.

Selon (Thiede et al., 2013), ces approches de modélisation et de simulation de systèmes de production liées à l'environnement peuvent être classées en trois paradigmes de base en fonction de leur interface avec d'autres outils d'évaluation et de simulation :

- Dans le paradigme A, les résultats obtenus à partir des outils de SED classiques sont intégrés dans une deuxième étape dans un outil d'évaluation externe et sont convertis en variables liées à l'environnement ;
- Le paradigme B permet une analyse plus détaillée de l'ensemble du système avec l'intégration de simulations supplémentaires, mais conduit souvent à des modèles assez complexes ;
- Dans le paradigme C, toutes les fonctionnalités pertinentes sont implémentées dans une seule application, mais l'utilisateur reste limité par l'environnement de simulation utilisé.

Bien que ces travaux aient considéré la consommation d'énergie comme une composante parmi d'autres (émissions, déchets, etc.) et l'ont intégré partiellement, d'autres ont mis l'accent sur l'énergie, étant le premier contributeur à l'éco-efficacité et à la durabilité des systèmes de production. L'incorporation des aspects énergétiques au sein de la SED a été d'abord étudiée par (Solding and Petku, 2005) pour simuler une production à forte intensité énergétique dans une fonderie suédoise. Les auteurs expliquent brièvement comment intégrer les flux énergétiques avec la SED en appuyant cela avec des exemples de données et de codes. Ce travail a été ensuite exploré par (Solding and Thollander, 2006) qui ont montré qu'un modèle de SED intégrant l'énergie est un outil fiable pour réduire l'utilisation et plus particulièrement le coût de l'énergie en planifiant la production de manière plus efficace. En fait, la réduction de la consommation et du coût de l'énergie a été la cible de tous les travaux qui joignent la modélisation énergétique et la SED jusqu'à maintenant, chacun avec une problématique ou un domaine d'application spécifique.

Par exemple, (Rahimifard et al., 2010) ont utilisé la SED pour prédire et minimiser l'énergie consommée par un seul produit. Ils considèrent que cette énergie est la somme de l'énergie directe (théorique et auxiliaire) et de l'énergie indirecte consommée par les différents processus qui constituent la ligne de production. Chaque type d'énergie est déterminé pour chaque étape de fabrication soit à travers des équations théoriques, des modèles empiriques ou des mesures directes. Cette approche permet uniquement de réduire la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit mais elle est incapable de déterminer ou réduire son coût énergétique vue qu'elle considère uniquement la quantité d'énergie consommée par les processus de production. (Kruse et al., 2015a, 2015b) ont également mis l'accent sur la quantité d'énergie consommée en étudiant les pertes d'énergie dans les systèmes multi produits ainsi que ses facteurs d'influence (par exemple la taille du lot, le nombre de variétés de produit, etc.) afin d'améliorer la transparence par rapport à l'inefficacité économique et environnementale qui peut résulter d'une mauvaise organisation de la production. (Gomes et al., 2013) ont employé la SED intégrant l'énergie dans un événement Kaizen appliqué au secteur automobile. Dans ce travail, la consommation d'énergie a été calculée à partir des équations théoriques afin d'évaluer l'efficacité énergétique et proposer une amélioration des procédés et de l'organisation de production. Cela a été réalisé en comparant différents scénarios et en évaluant les attentes production étant des états à non-valeur ajoutée mais qui consomment de l'énergie. Cette problématique a été aussi explorée par (Weinert and Mose, 2014) qui ont proposé une approche pour définir les potentiels d'économie d'énergie en mettant l'équipement de production en mode veille pendant les périodes de non productivité. Cette approche a été appliquée pour un système de production dans l'industrie électronique. Pour l'estimation de la consommation d'énergie, des valeurs moyennes ont été appliquées pour chaque état de la machine. Les résultats de cette étude ont montré que des réductions importantes sont possibles avec une meilleure gestion d'énergie dans les périodes d'inactivité.

Certes, une diminution de la quantité d'énergie consommée induit systématiquement une diminution du coût énergétique mais elle reste insuffisante pour évaluer une gestion rentable de la consommation d'énergie, car le coût de l'énergie dépend généralement non seulement de la quantité d'énergie consommée mais aussi de la tarification horaire au cours de la journée et de dépassement des seuils de puissance fixés par le fournisseur d'énergie. Par conséquent, une

gestion des profils énergétiques et une représentation réaliste de la dynamique de la consommation au niveau de la machine et de l'usine sont nécessaires pour une analyse complète des solutions (Thiede et al., 2011). La SED intégrant l'énergie peut être utile pour résoudre ce type de problème, par exemple une application à une fonderie suédoise pour faire face aux prix de l'énergie qui augmentent rapidement en Suède (Solding and Thollander, 2006) a montré que ces modèles de simulation peuvent réduire les coûts énergétiques en planifiant la production de manière plus efficace. Dans ce contexte, (Herrmann and Thiede, 2009b) ont proposé une approche flexible et modulaire dans laquelle ils modélisent l'ensemble du système de production avec toutes les interdépendances et la dynamique des équipements techniques impliqués (procédés de fabrication, équipements de transport et utilités). Cette approche leur permet de récupérer un profil de puissance total pour aboutir à une analyse des coûts énergétiques, y compris les coûts de dépassement résultant d'une planification de production inefficace. Pour inclure la gestion des profils énergétiques, les auteurs associent à chaque équipement un profil de puissance qui peut être fixe ou variable selon la fonction assurée par l'équipement. En effet, la puissance n'est pas toujours constante au cours du temps, mais elle est souvent très dynamique selon le processus de production et l'état actuel de la machine. Ainsi, la plupart des travaux impliquant la gestion des profils énergétiques ont utilisé une approche basée sur l'état qui consiste à affecter un niveau de puissance à chaque état de la machine (par exemple, en production, en veille, etc.).

(Cataldo et al., 2013) ont décrit la consommation d'énergie de chaque machine en considérant ses états et en les mettant en œuvre au moyen des automates à états finis (AEF). Le comportement énergétique de la machine a ensuite été traduit en code C # pour être exécuté dans le simulateur avec le comportement mécanique et les fonctionnalités de contrôle, également conçu au moyen des AEF. Une expérimentation en utilisant le modèle de simulation sur une ligne d'assemblage en série d'un moteur a été effectuée pour tracer la puissance totale absorbée par la ligne de production et aussi la consommation totale d'énergie en kWh. Les auteurs ont souligné que la considération des profils de puissance pourrait être utile pour l'identification des pics de consommation et l'évaluation de l'efficacité de la planification de la production. Cela a été également étudié par (Lorenz et al., 2012) pour réduire la puissance maximale appelée par un système de production piloté par robots. Les auteurs ont distingué six états du robot (attente, ramassage, pose, maintien, travail et déplacement) et ont associé à chacun d'eux un niveau de puissance constant afin d'obtenir le profil énergétique total du système de production.

Cette méthode de modélisation ne peut pas être appliquée avec des résultats précis pour des systèmes multi-produits car la puissance demandée dépend également des caractéristiques du produit. Pour résoudre ce problème, (Kohl et al., 2014) ont proposé de sélectionner un profil de puissance particulier pour chaque produit passant sur la machine selon un attribut défini par l'utilisateur (par exemple la taille du rotor). Les profils de puissance sont stockés dans une base de données organisée selon des états standard de la machine (production, attente, configuration ou bloqué). Cette méthode de modélisation de la consommation énergétique basée sur les états de la machine a été utilisée par la majorité des travaux de SED intégrant l'énergie, mais ne semble pas être la méthode la plus adéquate. Ces états sont souvent des états standards et liés à des domaines d'application spécifiques ce qui limite l'extensibilité de la solution.

Le Tableau 2 résume les travaux de SED intégrant l'énergie discutés précédemment sur la base du :

- Périmètre de modélisation ;
- Domaine d'application ;
- Paradigme de l'approche ;
- Type d'énergie considéré : directe (liée au procédés), indirecte (liée aux équipements supports) et l'énergie consommée par les moyens de transport ;
- Et la cible de modélisation : Consommation d'énergie (CE) en kWh et/ou profil de puissance totale.

2.3. LA GESTION DES DONNEES D'ENTREE DANS LA LITTERATURE

La gestion des données d'entrée est souvent la tâche la plus cruciale dans les projets de simulation considérant le temps nécessaire et la fiabilité du modèle. Le temps consacré à la phase de définition des données d'entrée, habituellement appelée «collecte de données», représente généralement 10 à 40% du temps total des projets de SED contre 10 à 40% pour le développement du modèle (Trybula, 1994). Le reste concerne la définition et l'analyse du problème, la vérification et la validation du modèle, l'expérimentation et l'analyse des résultats. Dans les projets SED traditionnels, il a été prouvé que le temps de traitement de données est le plus consommateur, avec environ 42% dans la phase de collecte données d'entrée (Skoogh and Johansson, 2009). Cependant, dans les projets de SED intégrant l'énergie, des efforts supplémentaires doivent être faits pour collecter des données de consommation énergétique liées à cette phase de gestion de données. Cette section a pour objectif de proposer en premier lieu un panorama sur l'ensemble des méthodes entrevues dans la littérature pour la phase de gestion de données.

De plus, contrairement aux paramètres d'entrée traditionnels qui ont été inclus dans la norme «Core Manufacturing Simulation Data (CMSD)» fournie par les «Simulation Interoperability Standards Organizations (SISO)», il n'existe aucune spécification concernant les données d'entrée liées à l'énergie (Skoogh et al., 2011). De ce fait, la modélisation de l'énergie dans les projets de SED n'est pas standardisée ni codifiée. Toutefois, on peut identifier dans la littérature une primitive de modélisation très répandue et suffisamment flexible pour s'adapter aux différents cas rencontrés. Cette primitive, dénommée « Energy Blocks », est présentée dans la dernière partie de cette section.

Tableau 2. Tableau de synthèse n°1

Référence	Périmètre de modélisation	Domaine d'application	Paradigme	Type d'énergie			Cible
				Directe	Indirecte	Transport	
(Solding and Thollander, 2006)	Usine Fonderie	Fonderie : Procédé de moulage	C	x	x	x	CE + profil de puissance
(Heilala et al., 2008)	Ligne de production	Assemblage, peinture, emballage	A	x	x		CE
(Herrmann and Thiede, 2009b)	Ligne de production	Industrie automobile : Alésage, durcissement, repolissage	C	x	x	x	CE + profil de puissance
(Rahimifard et al., 2010)	Ligne de production	Moulage, peinture et contrôle ultrasons	C	x	x		CE
(Page and Wohlgemuth, 2010)	Ligne de production	Industrie de semi-conducteurs : Procédé de lithographie	C	x		x	CE
(Weinert et al., 2011)	Ligne de production	Procédés de fraisage et de tournage	C	X			CE + profil de puissance
(Thiede et al., 2011)	Ligne de production	Tissage, Assemblage circuit imprimé	C	x	x		CE + profil de puissance
(Thiede et al., 2012)	Atelier	Tissage	C	x	x		CE + profil de puissance
(Kohl et al., 2014)	Ligne de production	Fabrication des moteurs électriques Enroulement, sertissage et and imprégnation	C	x			CE + profil de puissance
(Kruse et al., 2015a)	Pas d'application		C	x		x	CE
(Kruse et al., 2015b)	Ligne de production	Industrie métallurgique Découpage, formage, soudage, assemblage, revêtement	C	x	x	x	CE + profil de puissance
(Gomes et al., 2013)	Usine	Industrie automobile : Machines-outils	C	x			CE
(Weinert and Mose, 2014)	Ligne de production	Industrie électronique	C	x			CE
(Cataldo et al., 2013)	Ligne de production	Assemblage : Usinage, soudage, Vissage, perçage	C	x			CE + profil de puissance
(Lorenz et al., 2012)	Atelier	Industrie automobile : Robots industriels	C	x			CE + profil de puissance

2.3.1. COLLECTE DES DONNEES ENERGETIQUES

Pour alimenter les modèles de simulation, les profils de consommation sont souvent acquis grâce à l'acquisition de données métrologiques à l'aide de dispositifs de mesure, mais ils peuvent être évalués dans certains cas par des modèles empiriques ou des modèles mathématiques (Abele et al., 2015), à partir des bases de données ICV (Inventaire de Cycle de Vie) disponibles ou même une documentation technique (Figure 12). La précision et la fiabilité du modèle de simulation intégrant l'énergie dépend de la qualité de ces données avec des degrés d'importance différents en fonction du but de la simulation (e.g. factures d'électricité virtuelles, cartographie de la consommation d'énergie, évaluation des impacts environnementaux, évaluation de l'efficacité énergétique, réorganisation, planification de la production sous des contraintes énergétiques, etc.).

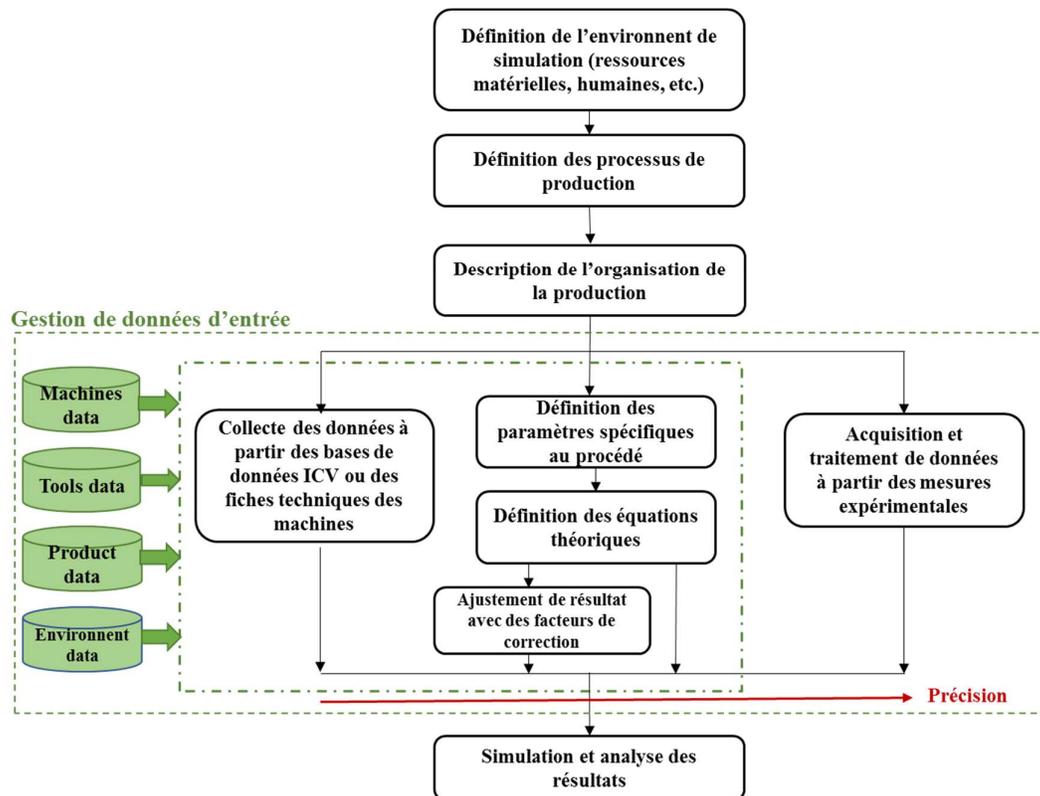


Figure 12. Les méthodes de collecte des données énergétiques d'après la littérature (Kouki et al., 2017)

- **Bases de données ICV**

Ces bases de données sont principalement utilisées pour les efforts d'ACV et offrent des données liées à l'environnement, y compris la consommation d'énergie. Ce concept a été

proposé par (Hauschild et al., 2005) et a ensuite été orienté vers l'analyse d'inventaire d'un processus unitaire par (Kellens et al., 2011a, 2011b) au travers du programme de recherche coopératif CO2PE!.

L'une des bases de données les plus reconnues et cohérentes est l'Ecoinvent, qui propose plus de 10000 ensembles de données ICV dans différents domaines d'activité. Elle donne accès aux données au niveau de processus unique ainsi qu'au niveau du système. En outre, elle permet d'accéder aux relations mathématiques et aux paramètres utilisés pour calculer les échanges dans les ensembles de données.

D'autres initiatives pour l'élaboration de bases de données ICV ont été réalisées par certaines régions du monde, parmi lesquelles on peut citer la base de données ICV des États-Unis créée par le NREL, la base de données européenne (ELCD), la coréenne (KLCI), ou l'australienne (AusLCI).

Les organisations industrielles ont également fait des efforts pour fournir des bases de données ICV liées à leurs activités, parmi lesquelles Plastics Europe (PE), American Plastics Council (APC), American Iron and Steel Institute (AISI), European Aluminium Association (EAA), European Copper Institute (ECI), l'Institut international du fer et de l'acier (IISI), etc. Ces bases de données sont souvent gratuites ou sous licence si elles sont utilisées à des fins commerciales. Ils offrent une accessibilité facile et rapide, mais le problème réside toujours dans le fait que les données disponibles couvrent les procédés, les matériaux et les produits les plus couramment utilisés et ignorent les autres.

▪ **Documentations techniques**

En cas d'indisponibilité de données détaillées de consommation, la valeur de puissance nominale peut être une alternative pour alimenter le modèle. Cette valeur se trouve dans la documentation de la machine ou directement sur la plaque signalétique. Cette valeur standard correspond souvent à la puissance maximale et reflète rarement la demande de puissance réelle. Néanmoins, il peut servir de base à une première estimation et à une classification et hiérarchisation des plus grands consommateurs d'énergie dans l'entreprise afin de prioriser les actions (Thiede et al., 2012).

▪ **Modèles mathématiques**

Récemment, un nombre croissant de travaux sur la modélisation énergétique ont été développés et publiés dans la littérature. Ces travaux utilisent généralement des équations mathématiques pour modéliser la consommation d'énergie en fonction des lois fondamentales de la physique (Liu et al., 2014, 2015; Zhou et al., 2015). Ces équations sont utilisées pour calculer statistiquement la consommation d'énergie théorique qui est généralement l'énergie minimale nécessaire pour obtenir le processus physique. Pour utiliser un modèle mathématique pour la prédiction de l'énergie, tous les paramètres requis utilisés dans les expressions théoriques doivent être introduits et définis. Ces paramètres peuvent être liés aux machines (technologie, données techniques, etc.), outils (matériaux, densité volumique, etc.) ou au produit (forme,

poids, etc.). Les résultats du calcul théorique peuvent être ajustés à l'aide de facteurs de correction (si disponibles) pour se rapprocher de la réalité.

- **Mesures expérimentales**

Pour obtenir des résultats précis, la mesure réelle est connue pour être une méthode appropriée pour alimenter les modèles de SED intégrant l'énergie avec les données nécessaires. Cependant, le problème est qu'il peut être assez difficile et coûteux dans certains systèmes de production complexes et étendus de mettre en œuvre ces mesures, surtout lorsqu'elles doivent être enregistrées sur une longue période. Les travaux antérieurs de la littérature ne donnent pas de détails sur la façon dont les mesures réelles doivent être enregistrées et transformées en données d'entrée pour le modèle de SED intégrant l'énergie, ce qui nous a amené à prendre cette problématique de gestion de données d'entrée particulièrement en considération dans nos travaux de recherche (Kouki et al., 2017).

2.3.2. PRIMITIVE DE MODELISATION : LA NOTION D'ENERGY BLOCKS

La consommation d'énergie d'une machine n'est généralement pas constante dans le temps, mais elle dépend dynamiquement du processus de production et de l'état réel de la machine (Thiede et al., 2012). Chaque état possède un niveau de puissance spécifique. Le concept de prise en compte de l'énergie basée sur les états des machines a été appliqué dans plusieurs travaux pour modéliser les profils de consommation et a été à l'origine de la définition des blocs d'énergie. Ce concept a été introduit par (Weinert et al., 2011) pour la planification et l'exploitation de systèmes de production éco-efficients. Cela consiste à décrire la consommation d'énergie d'une machine de production tout au long de ses différents états de fonctionnement. Chaque état est défini par un bloc d'énergie. Le bloc d'énergie est représenté par un niveau de puissance et une durée de sorte que le profil d'énergie de l'ensemble du processus puisse être reproduit par une succession de ces blocs. La durée et la puissance requises pour chaque état de fonctionnement peuvent être fixes ou variables selon les différents paramètres du processus. Le même principe a été appliqué à la demande d'énergie des machines-outils à commande numérique (MOCN), en divisant, dans une deuxième étape, les états opérationnels en segments supplémentaires pour chacun des composants utilisés (Peng et al., 2014).

On peut noter que la modélisation de la consommation d'énergie à l'aide de blocs d'énergie a été largement utilisée dans les travaux de simulation liés à l'énergie, en particulier ceux qui souhaitent récupérer le profil de puissance total en plus de la consommation totale d'énergie (Tableau 3).

Tableau 3. Tableau de synthèse n°2

Référence	Périmètre de modélisation	Domaine d'application	Utilisation des « Energy Blocks »	Acquisition des données d'énergie		
				Documentations/ Base de données ICV	Equations théoriques	Mesures
(Solding and Thollander, 2006)	Usine Fonderie	Fonderie : Procédé de moulage				x
(Heilala et al., 2008)	Ligne de production	Assemblage, peinture, emballage		x	x	
(Herrmann and Thiede, 2009b)	Ligne de production	Industrie automobile : Alésage, durcissement, repolissage		x		x
(Rahimifard et al., 2010)	Ligne de production	Moulage, peinture et contrôle ultrasonique				x
(Page and Wohlgemuth, 2010)	Ligne de production	Industrie de semi- conducteurs : Procédé de lithographie		-	-	-
(Weinert et al., 2011)	Ligne de production	Procédés de fraisage et de tournage	x	x		
(Thiede et al., 2011)	Ligne de production	Tissage, Assemblage circuit imprimé	x			x
(Thiede et al., 2012)	Atelier	Tissage	x			x
(Kohl et al., 2014)	Ligne de production	Fabrication des moteurs électriques : Enroulement, sertissage et and imprégnation	x			x
(Kruse et al., 2015a)	Pas d'application			Indéfini		
(Kruse et al., 2015b)	Ligne de production	Industrie métallurgique Découpage, formage, soudage, assemblage, revêtement	x			x
(Gomes et al., 2013)	Usine	Industrie automobile : Machines-outils			x	x
(Weinert and Mose, 2014)	Ligne de production	Industrie électronique	x			
(Cataldo et al., 2013)	Ligne de production	Assemblage : Usinage, soudage, Vissage, perçage				
(Lorenz et al., 2012)	Atelier	Industrie automobile : Robots industriels				

3. SYNTHÈSE ET PROBLÉMATIQUES

A partir de l'état de l'art présenté dans ce chapitre et en particulier les travaux de recherches réalisés dans le but d'intégrer la consommation énergétique dans la SED nous avons pu tirer deux conclusions principales :

Conclusion n°1 : manque de généralité et d'extensibilité des approches intégrant l'énergie dans la SED

Nous avons pu remarquer que les approches citées précédemment étaient motivées académiquement et par conséquent adaptées à des cas d'étude bien spécifiques. Les chercheurs ont donné des exemples de modèles appliqués à des domaines différents en mettant l'accent sur les intérêts d'utilisation de telles approches mais ne donnent pas des solutions générales ou des outils prêts à utiliser pour intégrer la modélisation de la consommation énergétique dans la SED. La méthode d'intégration de la consommation énergétique est rarement décrite techniquement, seuls des concepts sont donnés (spécification de la consommation pour chaque état de la machine, sélection du profil d'une base de données, etc.). Cela revient au fait que l'intégration de la consommation énergétique dans la SED soit une tâche un peu complexe et nécessite des compétences avancées dans la simulation et le développement informatique. Pour pallier à cette problématique, Siemens a pris l'initiative d'ajouter la composante énergie dans son logiciel de simulation Plant mais avec des fonctionnalités d'intégration qui restent très limitées et qui manquent de flexibilité.

Conclusion n°2 : Manque de méthodologie d'intégration des données de consommation énergétiques (en particulier celles obtenues par des mesures réelles) suffisamment efficace pour couvrir les cas des unités de production complexes

Durant un projet de SED intégrant l'énergie, la tâche la plus difficile est la gestion des données d'entrée. Généralement, un profil énergétique doit être associé à chaque processus, ce profil est représenté par des données de puissance et de durée. Il n'existe à ce jour aucune spécification concernant la gestion des données d'entrée liées à ces données. Les travaux existants ne mettent pas l'accent sur la manière dont ces données liées à l'énergie doivent être traitées et introduites dans la SED. Le contexte actuel est limité à la modélisation de machines simples (MACN, forge, assemblage, etc.) qui sont généralement utilisées pour valider les approches proposées de manière déterministe. Cependant, la modélisation de la consommation d'énergie s'avère être plus complexe dans certains cas. La consommation de systèmes thermo-régulés, par exemple, nécessite plus d'efforts pour être modélisée. De tels systèmes interagissent avec l'environnement de production et évoquent l'introduction du stochastique dans leur modélisation. Il est donc nécessaire de préciser comment les profils de consommation doivent être modélisés et comment les données acquises à partir des mesures doivent être traitées pour être introduites dans le modèle de SED intégrant l'énergie.

A partir de ces deux conclusions, les verrous scientifiques que nous allons chercher à résoudre dans ces travaux de thèse sont les suivants :

Verrou n°1 : Comment développer une méthodologie outillée permettant de systématiser et faciliter la prise en compte de l'énergie consommée dans la SED ?

Dans ce travail, nous avons l'intention de proposer une approche de modélisation générique qui va être ensuite implémenté en proposant un outil de SED qui permet de prendre en compte la consommation énergétique des processus de production d'une manière efficace. Cette approche doit offrir une certaine flexibilité et extensibilité à la modélisation de la consommation énergétiques dans la SED. De plus, nous proposons de fournir une solution facile à utiliser qui ne nécessite pas de grande compétence dans la SED et dans le développement informatique de manière qu'elle soit utilisée par des non spécialistes de la simulation notamment les responsables énergie. Cela va être achevé concrètement par le développement d'une bibliothèque d'objets proposant un ensemble de modules paramétrables permettant une construction facile et rapide de modèles de SED intégrant l'énergie.

Verrou n°2 : Comment intégrer efficacement des mesures de consommation réelles dans un modèle de SED intégrant des équipements ayant des profils de consommation complexes ?

Pour répondre à ce verrou, nous allons présenter dans ce travail comment gérer et traiter les données obtenues à partir des mesures réelles pour fournir les paramètres d'entrée requis pour compléter les modèles de SED intégrant l'énergie même pour des systèmes complexes dont l'extraction d'un profil répétable n'est pas évidente. Pour l'insertion de ces données, nous allons utiliser l'approche des « Energy Blocks » qui nous permettra de modéliser les profils énergétiques avec des puissances et des durées déterministes ou stochastiques si les valeurs varient d'un cycle à un autre.

Nous notons que la réponse à ce verrou scientifique a été l'objet d'un article scientifique publié dans le Journal of Cleaner Production (Elsevier) (Kouki et al., 2017).

CHAPITRE 3 :
CONCEPTS DE BASE &
METHODOLOGIE

INTRODUCTION

L'état de l'art présenté au chapitre 2 a montré que l'intégration de la modélisation de la consommation énergétique dans la SED présentait plusieurs défis. Ces défis sont d'autant plus faciles à appréhender que l'intégration se fait dans le cadre d'une application bien ciblée et dédiée à un système bien défini. La complexité et la diversité des systèmes de production rendent plus difficile la détermination d'une solution générique mais qui soit en même temps une solution de qualité capable de relever les défis liés à la modélisation conjointe des flux énergétiques et des flux de produits dans un cadre unique.

Dans ce contexte, nous souhaitons à travers ce chapitre présenter les concepts sur lesquels nous nous sommes basés pour élaborer une approche de SED intégrant l'énergie. Cela évoque deux approches principales : une approche de modélisation des activités de production basée sur les processus que nous expliquons dans une première partie de ce chapitre, et une approche de modélisation de la consommation énergétique basée sur les « Energy Blocks » (ou blocs d'énergie) que nous expliquons dans une deuxième partie. Nous justifions tout au long de ces sections les choix que nous avons fait et nos réflexions pour aboutir à une approche de modélisation générique alliant les deux approches. Nous présentons son concept et sa méthodologie dans une dernière partie du chapitre.

1. UNE APPROCHE DE MODELISATION BASEE SUR LES PROCESSUS

Comme évoqué précédemment, la consommation énergétique est fortement liée à l'activité de production et suit sa dynamique. Cette forte liaison, alliée aux critères et aux exigences identifiées pour une solution de qualité, nous a amené à opter pour une approche de modélisation basée sur les processus. Cette approche consiste à considérer un système de production comme un ensemble d'activités organisées en série et/ou en parallèle et reliées entre elles de façon plus ou moins complexe pour accomplir une tâche donnée. La logique de modélisation est donc relative à des séquences d'activités prédéterminées ou processus.

Pour une meilleure compréhension des concepts de base que nous allons présenter tout au long de ce chapitre, nous avons élaboré une étude de cas fictive. Le système proposé est décrit dans la Figure 13. Il est composé d'une presse à injecter, d'une fraiseuse, de deux postes de contrôle, d'un four et d'une machine d'assemblage. La presse à injecter forme des pièces en élastomère qui seront contrôlés à la sortie de la machine. Si la pièce est bonne, elle passe pour être assemblée avec une pièce métallique déjà usinée avec la fraiseuse, contrôlée et préchauffée dans le four pour permettre le frettage des deux pièces. Sinon, elle part en recyclage.

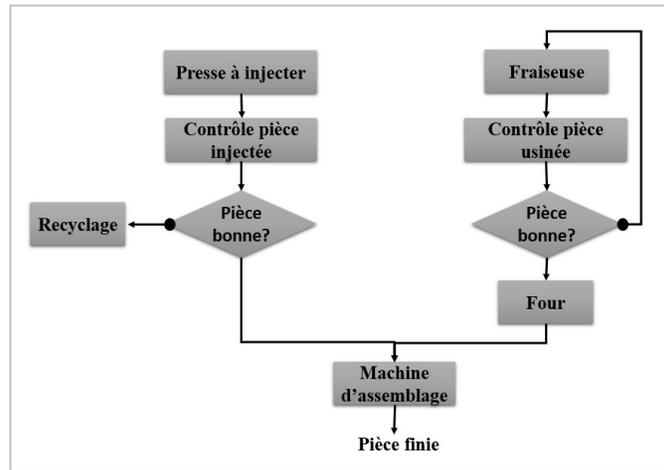


Figure 13. Description du système

1.1. LA NOTION DE PROCESSUS

D'après l'organisme international de normalisation (ISO 9000, 2005), un processus est défini comme « *un ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie* ». Modéliser un processus de production revient donc à décrire une séquence d'activités reliées entre elles de façon plus ou moins complexe visant à accomplir un objectif donné, impliquant de ce fait un ensemble de ressource et d'acteurs. Si l'on reprend l'exemple défini dans la Figure 13, le processus de fabrication permettant de réaliser des pièces finies peut être représenté par la séquence d'activités décrite dans la Figure 14.

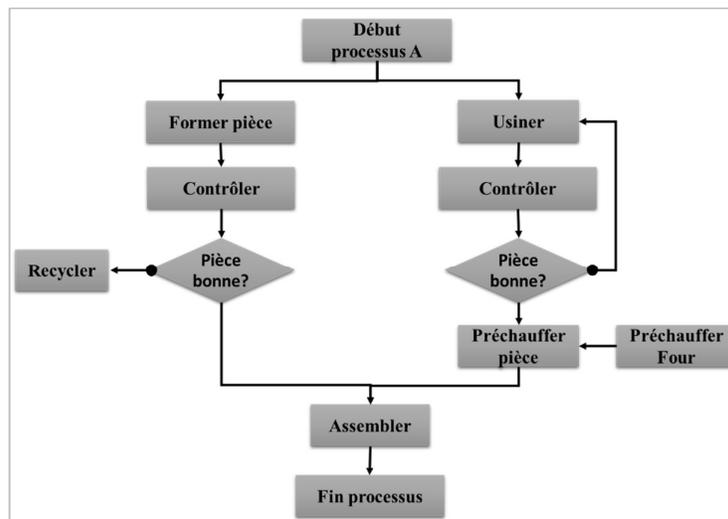


Figure 14. Processus de fabrication (cas d'étude fictif)

Suivant cette logique, la modélisation de tout système nécessite :

- Une cartographie des processus : Il s'agit de déterminer les différents processus composant le système ;
- La description, jusqu'au niveau de détail souhaité, de chaque processus : Il s'agit de déterminer le cheminement, activité par activité, de l'entrée à la sortie du processus ;
- La description des interactions entre les processus et entre les activités.

1.1.1. CARTOGRAPHIE DES PROCESSUS

Une première étape pour la modélisation du système consiste à repérer tous les processus existants. Généralement ce repérage peut être différent selon le choix du modélisateur.

En effet, un processus peut être décomposé en plusieurs sous-processus selon le niveau d'analyse et le périmètre de modélisation. La définition d'un processus peut donc être variable. La règle que nous avons adoptée dans ce travail est de considérer que les processus sont des enchainements d'activités qui pourront être ordonnancés dans le temps. Chaque processus est donc l'ensemble des activités permettant de réaliser un ordre de fabrication (OF) lancé à une date donnée.

Par exemple, il est possible de décomposer le processus global A défini dans la Figure 14 en trois processus B, C et D si nous souhaitons positionner ces trois processus dans le temps (les ordonnancer) au moyen de trois OF (Figure 15).

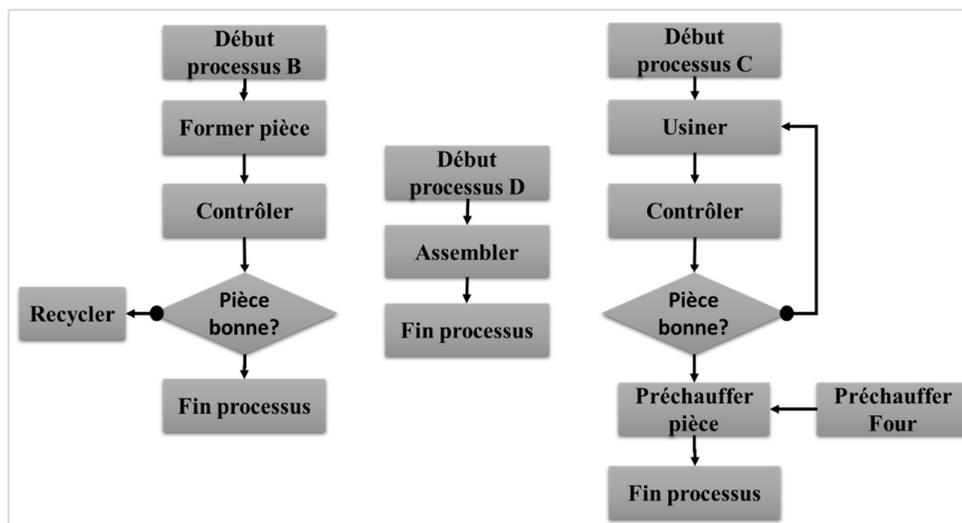


Figure 15. Décomposition du processus

Le modélisateur a le choix de descendre jusqu'au niveau de détail souhaité dans la description des activités. Ce choix repose sur le regroupement ou la séparation de certaines activités.

Pour être modélisé, un processus a besoin d'un flux de matières d'entrée (e.g. matière première ou produit semi-fini) et d'un flux d'informations d'entrée appelées encore paramètres d'entrée (Figure 16). Ces informations peuvent concerner sa date de lancement, la quantité de produits à réaliser et d'autres informations souvent partagées par plusieurs activités. Le processus génère des produits finis et des informations de sortie, appelées aussi résultats, relatives à sa date de fin, le taux de rebut, les taux d'occupations des ressources, etc. Ces résultats peuvent aussi intégrer des informations relatives à la consommation énergétique nécessaire à la réalisation du processus de fabrication. A ce niveau, nous ne considérons pas les flux énergétiques comme un élément lié directement au processus global, mais plutôt comme un élément lié aux activités qui le compose.

Pour résumer, la notion de processus intègre plusieurs éléments principaux : un objectif principal qui est la réalisation de l'OF correspondant, les flux de matières (d'entrée et de sortie), les paramètres d'entrée, les résultats de sortie et les activités que nous considérons comme un élément de base dans cette approche de modélisation et que nous détaillons dans la prochaine section.

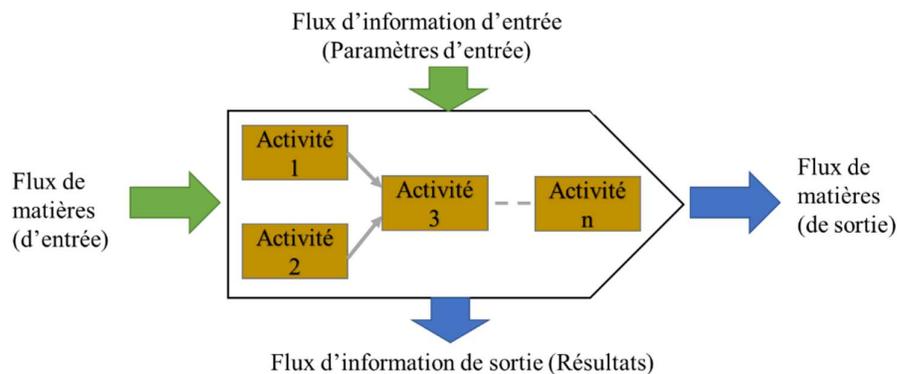


Figure 16. Les éléments principaux d'un processus

1.1.2. DESCRIPTION DU PROCESSUS

Il existe plusieurs manières pour la description des processus. Afin de couvrir au mieux les différents cas de figures qui peuvent exister dans un système de production, nous présentons un processus par une séquence d'activité dont l'enchaînement est assuré par des liens directs ou par des éléments de décision ou de synchronisation. Ces activités sont bornées par un début et une fin de processus pour délimiter chaque processus (Figure 17).

L'ensemble de ces activités doit être modélisé dans le respect des procédures établies (implicitement ou explicitement) par l'entreprise ou, à un niveau plus bas, dans le respect des procédures établies par le constructeur de la machine.

Nous détaillons ci-dessous les différents éléments qui nous permettent de modéliser un processus de fabrication de début jusqu'à la fin.

- Début processus : Cet élément sert à identifier le début du processus, son nom et les différents paramètres d'entrée nécessaires à son exécution ;
- Divergence : Cet élément sert à modéliser des activités en parallèle. Par exemple, les activité 21 et 22 doivent être lancées en parallèle juste après la fin de l'activité 1(Figure 17) ;
- Convergence : Cet élément, contrairement au précédent, sert à converger de plusieurs activités à une seule. Il joue donc le rôle d'une étape de synchronisation. Dans ce cas, des phases d'attente peuvent s'intercaler entre la fin d'une activité et le début de la suivante. Par exemple, l'activité 3 ne peut pas être lancée avant la fin de l'activité 21 « ET » de l'activité 22 (Figure 17) ;
- Décision : Cet élément permet de sélectionner ou non une partie du processus (une ou plusieurs activités) sous des conditions bien définies. En effet, l'organisation de la production diffère selon le système en lui-même, selon son environnement et selon les conditions de production à un instant donné, plus particulièrement en fonction de la clientèle, de la nature de produit, des quantités à réaliser, des disponibilités des moyens de production, etc. Nous notons que cet élément permet de modéliser des décisions stratégiques mais aussi opérationnelles ;
- Fin : Sert à identifier la fin du processus et renvoyer les résultats ;
- Activité : Cet élément est l'élément de base pour la description des processus et c'est celui qui contient le plus d'informations. Nous détaillons dans la section suivante la notion d'activité, ses types et ses interactions avec les différentes composantes du système de production.

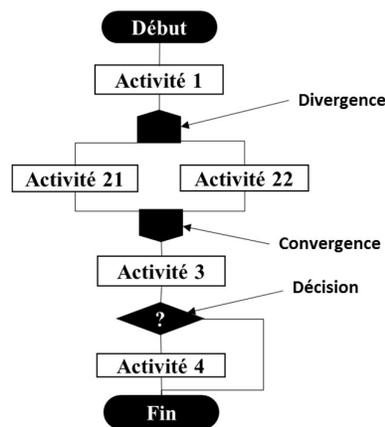


Figure 17. Description du processus

1.2. LA NOTION D'ACTIVITE

Après avoir défini la notion de processus, nous détaillons dans cette section la notion d'activité qui constitue un élément de base de notre approche de modélisation. Pour généraliser le plus possible notre méthode de modélisation, plusieurs questions se sont posées par rapport aux types d'activités qui peuvent exister et à leurs interactions avec les composantes du système de production.

1.2.1. LES TYPES D'ACTIVITES

La diversité des produits, des procédés associés et des organisations au sein du système de production font que les activités de production sont très diverses. Toujours dans le contexte d'une modélisation générique des systèmes manufacturiers, nous avons identifié plusieurs types d'activités selon leurs occurrences dans le processus et selon leurs conditions de déclenchement ou d'arrêt.

- **Activité événementielle** : Ce type d'activité est représentatif d'un événement ou d'une opération qui sera exécuté pendant une durée donnée et une seule fois dans le processus. A titre d'exemple, le four servant à préchauffer les pièces avant le fretage (Figure 14) doit être préchauffé avant de commencer la production. On dit alors que l'activité 'préchauffage four' est événementielle ;
- **Activité répétitive** : Au contraire de l'activité événementielle, ce type d'activité sera répétée jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit atteinte. Par exemple, dans le cas d'une production par lot des pièces injectées (Figure 14), l'activité 'injecter pièce' doit être répétée jusqu'à atteindre la taille de lot. On dit alors que l'activité 'Injecter pièce' est répétitive ;
- **Activité continue** : Nous désignons par activité continue tout type d'activité qui sera exécutée en continue tout au long du processus de production. Les seules conditions d'arrêt pour ce type d'activité sont des conditions liées aux horaires d'ouverture, fermeture ou de pause du système de production. Par exemple, le maintien en température du four (Figure 14) est considéré activité continue ;
- **Activité conditionnée** : Ce type d'activité ne sera exécutée dans le processus que si une condition prédéfinie est validée. Cette condition sera définie dans le bloc de décision qui précédera l'activité et définira son exécution ou non. Par exemple, l'activité de recyclage est conditionnée par la nature de la pièce après injection (Figure 14), celle-ci n'étant exécutée que si la pièce est mauvaise. On dit alors que le recyclage est une activité conditionnée.

1.2.2. RESSOURCES ET CONDITIONS

Pour être exécutée, une activité doit être supportée par un ensemble de ressources (matérielles et humaines) et, dans le cas d'une activité automatique ou semi-automatique, d'énergie. Ces ressources ne sont pas toujours les mêmes et diffèrent d'une activité à une autre, en nature et en quantité. Concernant les ressources matérielles, celles-ci peuvent être soit des machines, des équipements, des outillages ou bien encore de la matière première ou des produits semi-finis.

Les ressources peuvent être classées en deux grandes classes :

- Des ressources principales : qui sont actives et qui ont une certaine indépendance du reste du système. Elles peuvent évoluer selon l'activité associée. Les ressources principales peuvent être des machines, des moyens de transfert, des robots, etc.
- Des ressources auxiliaires : qui sont passives et qui permettent à des ressources principales d'accomplir une tâche. Elles peuvent être associées à une seule ressource (ex. cas d'un outil monté sur une machine) ou partagées par plusieurs (ex. cas d'un circuit d'air comprimé partagé par les ressources de l'atelier). Les ressources auxiliaires peuvent être des utilités, des outillages, etc.

Les questions que l'on peut se poser lorsque l'on souhaite modéliser une activité sont donc les suivantes :

- L'activité nécessite-t-elle la réservation d'une ressource ou d'un équipement ? Si oui quelle machine ou quel équipement et quel profil énergétique lui sont associés ?
- L'activité nécessite-t-elle des ressources auxiliaires ? Si oui quelles ressources ? Si ces ressources consomment de l'énergie, quel profils énergétiques lui sont associés ?
- L'activité nécessite-t-elle des opérateurs ? Si oui, de quelle compétence et combien d'opérateurs nécessite-t-elle ?
- L'activité nécessite-t-elle de la matière ? Si oui, quel type de matière et quelle est la quantité nécessaire ?

Une activité doit donc vérifier la disponibilité de toutes les ressources concernées, mais elle doit aussi vérifier la fin de(s) activité(s) précédente(s) et l'autorisation d'exécution qui est déterminée par le calendrier du fonctionnement du système, pour satisfaire toutes les conditions nécessaires à son exécution (Figure 18).

On note que le calendrier de fonctionnement d'un système (périodes d'ouverture, de fermeture et de pause) est un élément fondamental pour la modélisation et la simulation de tout système réel puisqu'il permet de définir l'aspect chronologique de l'occurrence des activités ainsi que leurs interruptions et relancements. Cet élément est d'autant plus important dans ce travail de modélisation intégrant l'énergie qu'il permet de prendre en considération l'énergie consommée dans les périodes d'inactivité définies par celui-ci. Le fait de considérer le calendrier de

fonctionnement du système permet aussi de reproduire exactement le comportement énergétique du système et de prédire une courbe de consommation proche de la courbe de consommation réelle

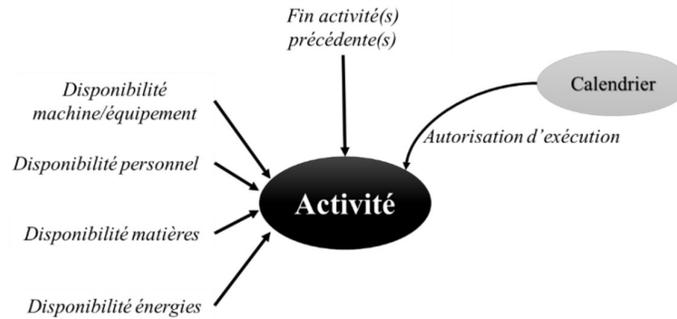


Figure 18. Conditions nécessaires à l'exécution d'une activité

1.3. INTERACTIONS INTER-ACTIVITES ET INTER-PROCESSUS

Un système de production n'est pas seulement un ensemble d'activités et de processus, mais aussi l'ensemble de leurs interactions (Figure 19). Ces interactions peuvent être entre processus (interaction inter-processus) ou entre activités (interaction inter-activités).

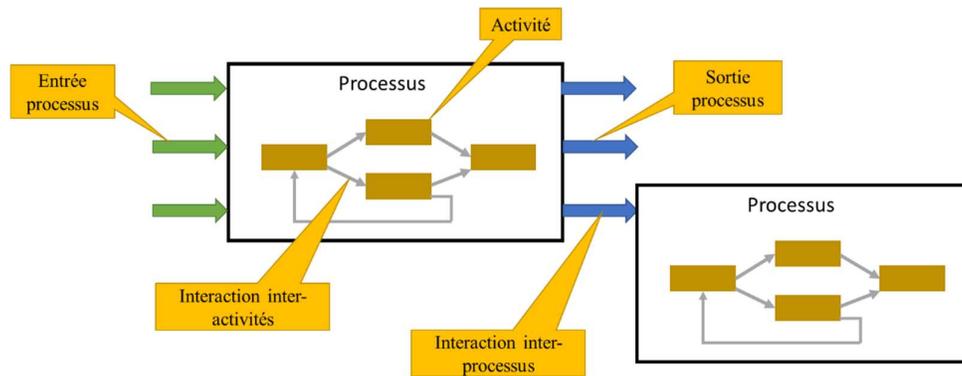


Figure 19. Interactions inter-processus et inter-activités

Les interactions entre activités ou entre processus peuvent être des interactions directes ou indirectes. Les interactions directes présentent souvent des flux de matières (circulation directe ou passage par un stock intermédiaire). Dans ce cas, une ou plusieurs sorties d'une activité ou d'un processus sont aussi une entrée pour un autre processus ou une autre activité. Nous prenons comme exemple un processus de fabrication de mélange en élastomères, qui en sortie génère

une quantité destinée à la vente et une deuxième quantité qui sera consommée par un autre processus de fabrication de pièces.

Concernant les interactions indirectes, celles-ci présentent le partage des ressources entre les activités du même processus ou des processus différents. Par exemple, deux activités qui utilisent le même outil ou le même opérateur.

La prise en compte et la maîtrise des interactions inter-processus et inter-activités permettent donc de valider la cohérence de fonctionnement du système de production et la bonne planification des activités et des processus.

2. MODELISATION ENERGETIQUE : UNE APPROCHE BASEE SUR LES « ENERGY BLOCKS »

Comme évoqué précédemment dans l'état de l'art, les approches de modélisation de l'énergie sont nombreuses et dépendent fortement du cadre d'application, du périmètre de la modélisation, de la disponibilité des données et de plusieurs facteurs qui font que, le choix d'une approche appropriée soit indispensable pour avoir des résultats fiables et interprétables. Dans ce travail, nous avons choisi les « Energy Blocks » comme approche de modélisation. Cette approche semble être la plus adéquate dans le cadre de l'intégration de la modélisation énergétique dans la SED (chapitre 2 section 2.2).

2.1. L'APPROCHE « ENERGY BLOCKS »

Nous rappelons que cette approche consiste à modéliser un profil énergétique par une suite de blocs (Weinert et al., 2011). Chaque bloc est représenté par un niveau de puissance et une durée et reflète un changement survenu dans le comportement de la machine modélisée. En effet, une machine n'est qu'un ensemble d'équipement (électriques, pneumatiques, hydrauliques, etc.) qu'on active, désactive ou qu'on régule à une consigne donnée pour parvenir à un comportement désiré. Ceci se traduit par un changement dans le niveau de la puissance appelée par la machine (Figure 20), d'où un passage à un nouveau bloc d'énergie.

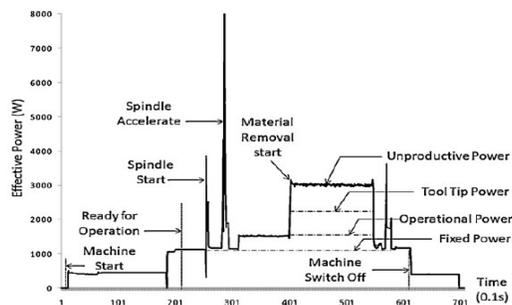


Figure 20. Profil énergétique d'une machine de tournage(Duflou et al., 2012)

2.1.1. AVANTAGES DE LA METHODE

Nous mettons l'accent dans un premier temps sur la capacité de l'intégration de cette approche dans les systèmes à événements discrets. En effet, la consommation énergétique est une variable continue et doit être, dans le meilleur des cas (d'un point de vue précision de résultats), modélisée par des modèles continus. Ces modèles sont typiquement utilisés pour décrire le comportement interne d'un système et sont souvent basés sur des lois de la physique qui ne sont pas tout le temps connues. Intégrés dans la SED, les modèles continus sont généralement décrits par des équations différentielles dont la résolution peut être très consommatrice de temps. En effet, cette résolution se fait à travers des algorithmes d'intégration numérique de manière à reproduire approximativement les variations continues en les mettant à jour à des intervalles de temps très courts.

Les modèles discrets en revanche permettent de capturer les changements plus grossièrement. Ces changements sont susceptibles de se produire moins régulièrement et les intervalles de temps sont dans ce cas plus larges. La méthode des « Energy blocks » nous paraît alors adéquate pour discrétiser les profils énergétiques et échapper aux inconvénients des modèles continus. Cette discrétisation engendre une perte d'information et également une perte de précision mais fait beaucoup gagner en contrepartie en termes de temps de calcul. Le modélisateur a alors le choix de naviguer entre :

- Un découpage trop fin du profil énergétique donc un très grand nombre de blocs d'énergie et par conséquent plus de paramètres à rentrer par le modélisateur → Plus de précision mais une perte de temps dans la collecte des données ;
- Un découpage trop grossier du profil énergétique donc un nombre moins important de blocs d'énergie et par conséquent moins de paramètres à rentrer → Moins de précision mais un gain de temps dans la collecte des données.

Prenons l'exemple du profil énergétique du moteur hydraulique d'une presse à injecter. Celui-ci peut être modélisé finement à travers 9 blocs, donc 18 valeurs de puissance et de durée à identifier (Figure 21-a) ou plus grossièrement à travers 3 blocs seulement et par conséquent 6 valeurs à identifier (Figure 21-b).

Nous notons aussi que cette méthode permet de récupérer, outre que la quantité totale d'énergie consommée par machine, par processus ou par le système entier, un profil de puissance totale. Ce résultat permet alors d'étudier des problématiques liées à la gestion des profils de charge, notamment les problématiques d'ordonnancement sous des contraintes énergétiques (dépassement de seuil de puissance, coût d'énergie variables au cours de la journée, etc.).

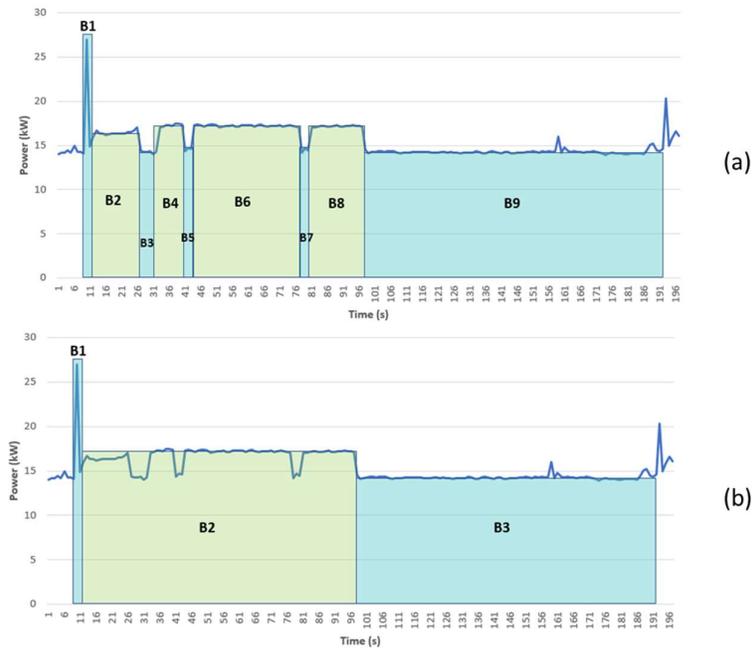


Figure 21. Exemples de découpage d'un profil énergétique en « Energy Blocks »

2.1.2. LIMITES DE LA METHODE

Cette méthode convient d'autant plus que la variation de la puissance demandée se fait par palier. Dans le cas où cette dernière est une fonction linéaire au cours de temps, par exemple le cas d'un profil de puissance d'une machine de forgeage (Figure 22), la méthode des « Energy Blocks » ne peut reproduire d'une manière précise le comportement énergétique de la machine car la puissance appelée par cycle a un profil triangulaire. Modéliser cette consommation par des blocs à puissance constante va inévitablement générer des erreurs dans la puissance évaluée.

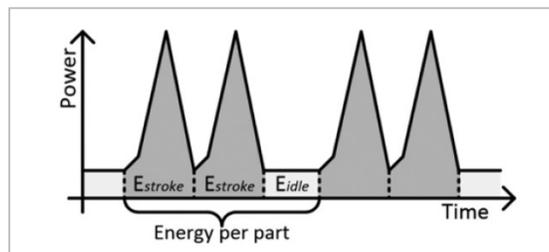


Figure 22. Profil énergétique d'une machine de forgeage (Schmidt et al., 2015)

2.2. COLLECTE ET GESTION DE DONNEES

La tâche la plus critique dans la modélisation par « Energy blocks », et dans la modélisation de la consommation énergétique en général, est la collecte et la gestion des données d'entrée pour remplir les différents blocs identifiés de chaque profil énergétique. Ces données ne sont pas toujours disponibles et ceci est considéré comme un problème majeur dans la modélisation et la prédiction de la consommation énergétique d'une installation. Un des intérêts justifiant le choix de cette approche de modélisation est sa capacité de pallier à des problèmes de manque ou d'absence de données.

Comme évoqué dans le chapitre précédent, ces données peuvent être générées à partir des bases de données ICV, des modèles mathématiques, des fiches techniques de la machine ou bien des mesures expérimentales. La précision et la fiabilité des résultats dépendent donc de la méthode de collecte de données et de sa qualité avec un degré d'importance plus au moins important selon la finalité de la modélisation énergétique (cartographie de consommation, estimation de coût énergétique, évaluation de l'impact environnemental, planification sous des contraintes énergétiques, etc.).

Nous essayons dans ce travail de relever certains défis liés à la gestion des données de la consommation énergétique dans le cadre de l'intégration de la modélisation de celle-ci dans la SED. En effet, les données énergétiques ne peuvent pas être introduites dans le simulateur dans leur état brut. Une phase de traitement est nécessaire pour identifier dans une première étape un profil répétable et pour identifier dans une seconde étape les données associées à chaque bloc d'énergie (puissance et durée).

2.2.1. REPETABILITE DES PROFILS DE PUISSANCE

Dans le cas de l'intégration de la modélisation énergétique dans la SED, il est nécessaire d'extraire des profils de puissance répétables qui seront lancés à chaque fois que les activités associées se répètent au cours d'une simulation. Le problème est que, dans certains systèmes complexes (par exemple les systèmes thermorégulés), ce profil peut ne pas être identifiable directement. La Figure 23 montre un exemple d'un profil de puissance appelée par une presse à injecter durant la phase de production.

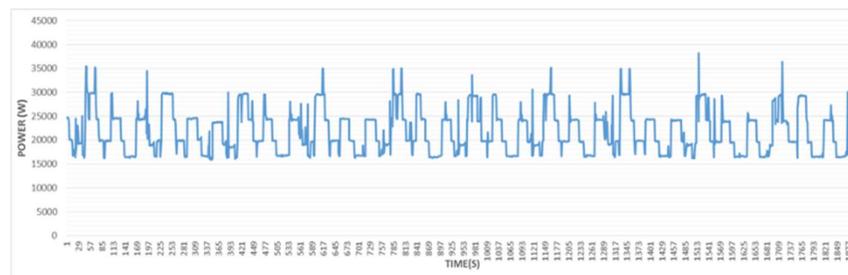


Figure 23. Évolution de la puissance électrique appelée sur une presse à injecter

Nous remarquons qu'à partir de l'allure de cette courbe, il est impossible d'identifier un profil répétable relatif à un cycle de production. En effet, la presse à injecter est une machine composée de plusieurs équipements thermorégulés. L'activation et la désactivation des pots de chauffes par exemple en fonction des pertes thermiques du système masque la répétabilité du profil énergétique. Il est donc crucial de subdiviser la machine en équipements consommateurs dans le but de modéliser leur consommation séparément.

Dans le cas des équipements thermorégulés, la puissance appelée à un instant t dépend de la différence entre la température du système à cet instant et la température consigne. La puissance est donc régulée pour maintenir cette consigne. La complexité de la modélisation de la consommation énergétique d'un tel système réside dans le fait que la différence de température dépend de l'ampleur des pertes d'énergie ainsi que de la température extérieure. Cela pourrait être vrai pour tout système contrôlé (température, pression, etc.) qui dépend de l'état physique du système. La modélisation mathématique de ces systèmes peut être assurée par les lois de la physique. Cela nécessite l'utilisation d'équations différentielles qui doivent être ensuite discrétisées par le simulateur, toujours dans le cadre de l'intégration de la modélisation de la consommation énergétique dans la SED. Néanmoins, afin de ne limiter les temps de calcul nécessaires, nous proposons dans la suite de ce document une approche originale de modélisation de l'asservissement basée sur l'identification de distributions stochastiques de la variation des valeurs des puissances et des durées des blocs d'énergie d'un cycle à un autre.

2.2.2. VARIABILITE DES PROFILS ENERGETIQUES & TRAITEMENT DE DONNEES

Les mesures directes sont souvent considérées comme des données brutes et doivent être traitées et transformées en données d'entrée pour le modèle. Cette phase de traitement dépend de l'allure du profil énergétique et de sa variabilité d'un cycle à un autre. Nous avons classé dans ce sens les profils énergétiques en 5 catégories comme le montre la Figure 24. En effet, la procédure de traitement des données dépend nécessairement de la catégorie du profil énergétique.

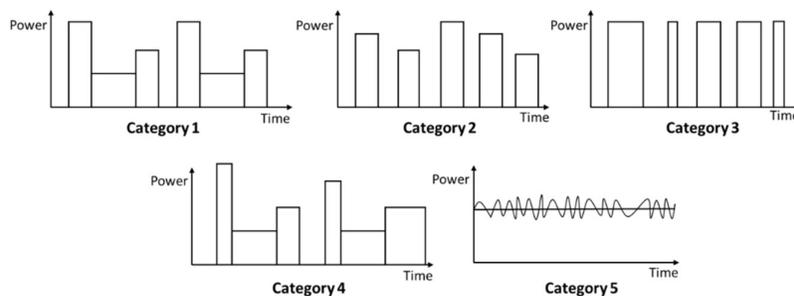


Figure 24. Les catégories des profils énergétiques

Selon ces catégories, la puissance et/ou la durée de chaque bloc d'énergie peuvent être représentées par des valeurs déterministes, stochastiques ou encore par une valeur moyenne.

Nous décrivons ci-dessous les différentes catégories identifiées.

- Catégorie 1 : Le profil énergétique est régulier d'un cycle à un autre, avec des puissances et des durées constantes. Dans ce cas, seules des valeurs déterministes sont utilisées. Cette catégorie peut être représentative des machines à commande numérique, où une fois configurées, le profil énergétique reste le même pour une même production et dans les mêmes conditions ;
- Catégorie 2 : Le profil énergétique présente des puissances variables d'un cycle à un autre (pour le même bloc d'énergie). Dans ce cas, des lois de distributions peuvent être utilisées pour modéliser la variation de puissance ;
- Catégorie 3 : Contrairement à la catégorie 2, les valeurs de puissance sont constantes alors que les durées varient d'un cycle à un autre. Cette catégorie peut présenter par exemple les systèmes à régulation on/off ;
- Catégorie 4 : La puissance et la durée sont toutes les deux variables d'un cycle à l'autre. La variation du niveau de puissance peut résulter d'une perte de charge ou encore de l'interaction du système avec son environnement extérieur tandis que la variation de la durée résulte souvent de l'intervention du facteur humain ;
- Catégorie 5 : La puissance oscille en continu autour d'une valeur moyenne. Dans ce cas, le profil énergétique peut être tout simplement modélisé par un seul bloc d'énergie répétitif, avec une valeur de puissance correspondante à la valeur moyenne. Cette catégorie de profil correspond généralement à l'énergie de base constatée quand aucune activité n'est observée sur la machine (par exemple dans les états de veille).

Dans le cas où la puissance et/ou la durée sont considérées comme des paramètres stochastiques, une loi de distribution représentative de ce paramètre doit être identifiée. Dans ce cas, l'enregistrement de plusieurs cycles est indispensable pour plus de crédibilité dans la modélisation.

Dans cette optique, le processus de gestion de données d'entrée que nous proposons dans le cas de l'acquisition des données à partir des mesures expérimentales doit être repensé et est décrit dans la Figure 25.

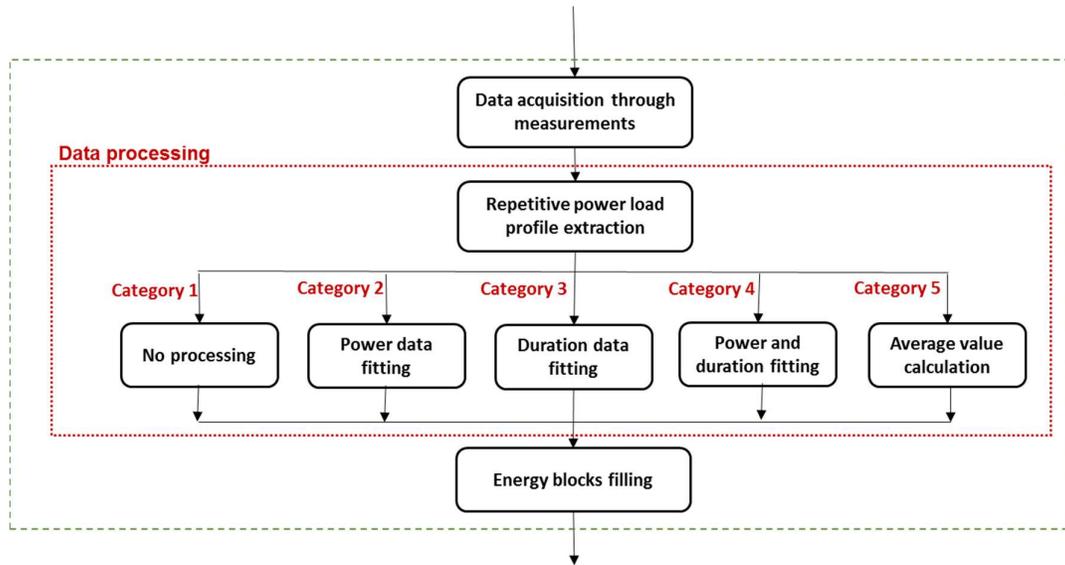


Figure 25. Gestion des données d’entrées selon la catégorie du profil énergétique (Kouki et al., 2017)

En plus de la possibilité de variabilité des profils énergétiques d’un cycle à un autre, il est aussi possible que celui-ci varie d’un produit à un autre. Deux produits qui passent sur la même machine peuvent avoir la même allure de profil mais avec des valeurs de puissances et/ou de durée différents selon les caractéristiques du produit (Kohl et al., 2014). Pour pallier à cette variabilité, nous proposons de modéliser la consommation énergétique par des courbes paramétrées. Nous désignons par courbe paramétrée toute courbe de puissance dont les blocs d’énergie peuvent être ajustés selon des paramètres donnés (Figure 26).

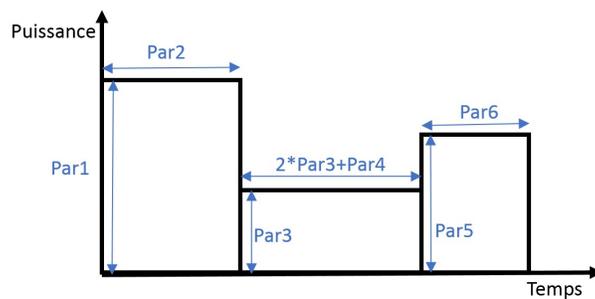


Figure 26. Courbe paramétrée

3. LA METHODOLOGIE « ERDES »

Après avoir défini dans les deux premières sections les concepts de base liés aux approches de modélisation des activités de production et de la consommation énergétique, nous allons dans

cette troisième partie présenter notre méthodologie « ERDES » pour l'intégration de la consommation énergétique dans la SED en se basant sur ces deux approches.

Nous notons dans un premier lieu que l'acronyme « ERDES » est dérivé du terme anglais « Energy Related Discrete-Event Simulation ». Ce terme a été proposé pour nommer le travail que nous avons élaboré au cours de cette thèse et qui sera utilisé tout au long de ce manuscrit pour désigner notre approche et notre outil de simulation à événements discrets intégrant la modélisation de la consommation énergétique.

Nous présentons notre approche ERDES comme une approche basée sur les processus et qui intègre les « Energy Blocks » pour la modélisation de la consommation énergétique. Dans ce sens, nous associons à chaque activité nécessitant de l'énergie un profil énergétique, représenté par des « Energy Blocks » tel qu'ils sont définis dans la section 2.1. La consommation totale n'est donc que la somme des différents profils énergétiques selon leur ordre de lancement dans la séquence associée (Figure 27). Travaillant dans un environnement à événements discrets, la mise à jour de la puissance totale et notamment de l'énergie totale va se faire à chaque fin de bloc (passage d'un niveau de puissance à un autre).

Cette approche d'intégration de la consommation énergétique dans la SED, contrairement à d'autres qui existent déjà dans la littérature, offre une grande flexibilité dans la modélisation et une facilité d'adapter le modèle au changement. En rassemblant tous les avantages liés d'un côté au choix de la modélisation par processus et au choix de la modélisation par « Energy blocks » d'un autre côté, nous avons abouti à une solution performante pour la modélisation et la simulation dynamique des flux de production et des flux énergétiques simultanément.

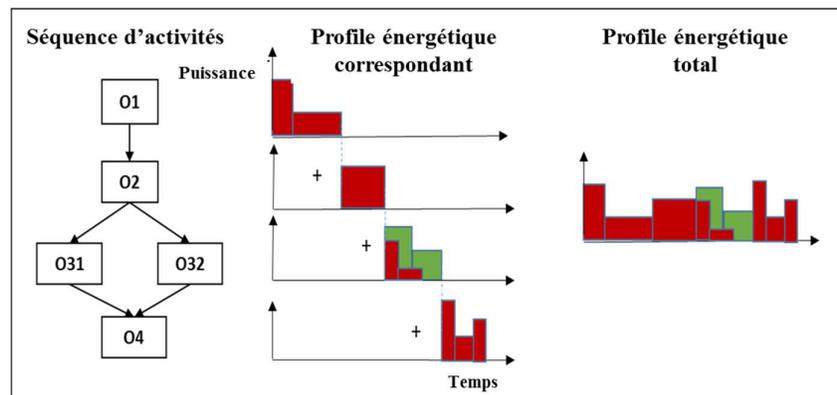


Figure 27. Concept de l'approche ERDES

Les séquences d'activités sont généralement imposées par le procédé de fabrication ou par des choix d'organisation de la production. Ces séquences restent les mêmes sous des conditions de fonctionnement normal et continu du système de production. Néanmoins, un système de production n'est jamais stable et subit souvent des perturbations internes ou externes qui viennent interrompre son fonctionnement. Ces interruptions peuvent être liées aux machines, aux outils, aux produits ou même au facteur humain et peuvent arriver d'une manière aléatoire

(pannes, rupture d'un stock, etc.) ou déterminée (pauses, arrêt du soir, arrêt weekend, changement produit, etc.).

Cela a deux conséquences principales :

- Intercalage des états à non-valeur-ajoutée (NVA) : Ces états, malgré le fait qu'ils n'apportent rien au système, consomment de l'énergie. Ils correspondent aux phases où la machine ne produit pas mais reste sous tension ou en veille. L'énergie consommée durant ces états est plus au moins importante selon la configuration de l'état de veille et le nombre d'équipements qui restent sous tension pendant cet état. Selon les caractéristiques spécifiques du système, les dépenses associées à ces états, considérées comme des pertes, peuvent s'élever à plusieurs milliers d'euros par an. A titre d'exemple, le coût annuel associé à la consommation d'énergie durant des phases de non production, notamment les weekends, d'une usine automobile hautement automatisée est plus de 400.000 € (Weinert and Mose, 2014).
- Changement dans la séquence des activités : Dans certains systèmes de production plus ou moins complexes, en particulier ceux qui traitent des flux thermiques (par exemple les transformateurs de polymères), des 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'outillage). Dans de tels cas, les interruptions de production nécessitent de relancer ces opérations et le système consomme d'avantage d'énergie.

Les interruptions de production ont donc un impact significatif sur la consommation énergétique mais aussi sur la production. Malgré le fait que la stratégie d'arrêt des machines durant les phases d'inactivité ait des raisons multiples, son application dans le milieu industriel reste un sujet de discussion usuel. Dans la majorité des cas, elle n'est d'ailleurs pas appliquée pour deux raisons majeures :

- Un manque d'information par rapport aux efforts et aux bénéfices associés : ce manque d'information est essentiellement dû à un manque de précision dans le suivi de la consommation énergétique, s'il existe. La consommation énergétique est souvent considérée dans sa totalité et le suivi détaillé est assez rare. La consommation dans les états à NVA peut être grossièrement estimée connaissant les durées d'inactivité du système (associées aux pauses et aux arrêts de weekends par exemple) et le niveau de puissance absorbée mais ne peut pas être toujours précise puisqu'elle est aussi liée aux événements qui peuvent survenir d'une manière indésirable et non planifiée (rupture de matière, absence d'opérateur, etc).
- Une incertitude dans les conséquences potentiellement négatives : l'arrêt et le redémarrage des équipements de production n'est pas toujours simple et n'est pas toujours rapide. Il peut demander beaucoup de temps pour réatteindre les conditions nécessaires au lancement de la production. En effet, la disponibilité de la machine, donc le gain de temps, et le gain en termes de consommation énergétique sont deux

paramètres difficilement conciliables. Les industriels préfèrent donc souvent laisser les machines en marche pour ne pas augmenter les délais de remise en production.

Les interruptions de production doivent être donc prises en compte dans le modèle de simulation afin de répondre aux questions associées et choisir la meilleure stratégie de gestion des interruptions. Notre approche ERDES est donc en mesure de gérer les interruptions de production, quantifier les pertes associées et identifier des pistes potentielles d'amélioration. Elle permettra de trouver un compromis entre ces deux paramètres en testant plusieurs stratégies de mise en veille ou d'arrêt machine durant les phases d'inactivité et en analysant les données qui en résultent.

Pour bien mener un projet ERDES, nous proposons la méthodologie décrite dans la Figure 28. Selon cette méthodologie, une première étape consiste à définir l'environnement de simulation (1). Celui-ci est constitué de l'ensemble des ressources matérielles (machines, outils, stocks, etc.) et humaines (les opérateurs, les équipes). Cette première étape consiste en une description détaillée des composantes du système de production étudié. Une deuxième étape consiste à définir les processus de fabrication (2). Ceci revient à faire la cartographie des processus comme décrit précédemment. A ce niveau, toutes les activités, leurs conditions de déclenchements et leurs interactions sont décrites. La troisième étape consiste à définir comment la production est organisée (3). Cela revient à décrire le calendrier d'ouverture et de fermeture du système de production, le nombre de changements d'équipe par jour et aussi les stratégies d'arrêt ou de mise en veille des machines. Cette étape consiste aussi à décrire les ordres de fabrications qui vont être simulés en les reliant au processus déjà définis dans le modèle. Passant à la modélisation de la consommation énergétique et la gestion des données d'entrée (4), les données liées au profil énergétique de chaque activité doivent être introduites par l'une des méthodes discutées précédemment selon leurs disponibilités. Pour un calcul théorique détaillé (4.2), toutes les données nécessaires pour remplir 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 disponible, afin de se rapprocher au plus près de la réalité. Dans le cas de l'indisponibilité des données ou la difficulté de les déduire, les valeurs des puissances et de durées peuvent être sélectionnées à partir des fiches techniques des machines ou à partir des données disponibles dans des bases de données notamment les bases des ICV (4.1). Cette solution est proposée afin de maîtriser une absence éventuelle de 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 (4.3). Dans ce cas, une étape de traitement de données est nécessaire comme indiqué Figure 25. Une fois le modèle établi et la simulation exécutée, les résultats de simulation classiques ainsi que les résultats liés à la consommation d'énergie peuvent être analysés et évalués (5).

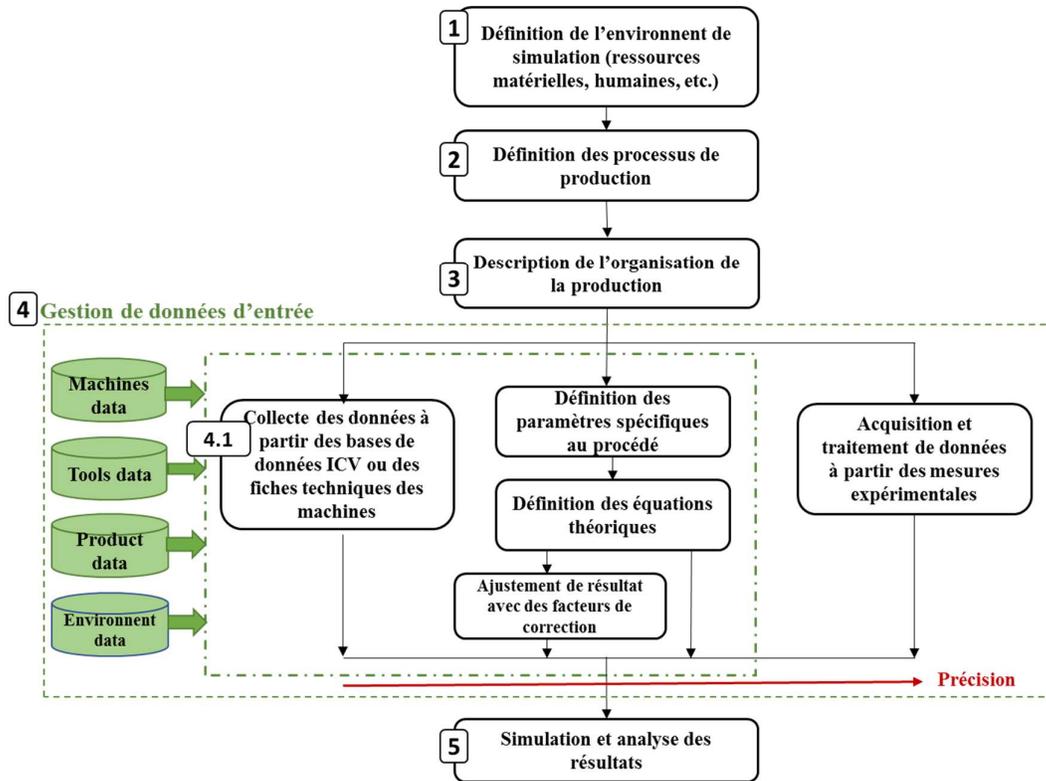


Figure 28. La méthodologie ERDES

CONCLUSION

La méthodologie de modélisation que nous avons présentée est un cadre conceptuel global et générique permettant de traiter un problème d'intégration de la consommation énergétique dans la SED afin de modéliser, simuler et analyser les flux de production et les flux énergétiques simultanément en allant de l'analyse du système à l'analyse des résultats. Ainsi, des questions de granularité de modèle, de flexibilité de modèle, de traitement et de gestion de données se sont posées et nous avons cherché à donner des réponses à ces questions pour préparer le passage du modèle conceptuel à l'outil utilisable industriellement. Dans le chapitre suivant, cette méthodologie sera employée et implémentée dans le cadre de la réalisation d'un outil de simulation intégrant l'énergie.

CHAPITRE 4 :
IMPLANTATION DE L'APPROCHE
ERDES : DEVELOPPEMENT D'UNE
BIBLIOTHEQUE D'OBJETS POUR
APPLICATION INDUSTRIELLE

INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, des concepts de base et une méthodologie générale de conduite d'un projet de simulation dynamique intégrant l'énergie ont été présentés. Si les étapes de la définition d'une approche appropriée pour l'intégration de la modélisation de la consommation énergétique dans la SED et sa représentation conceptuelle ne présentent pas des difficultés particulières, il n'en est pas de même pour l'étape de son implantation. Un certain nombre d'étapes et de choix ont été faits pour bien mener l'implantation de l'approche ERDES à travers le développement d'une bibliothèque d'objets sous le logiciel Arena®. Cela vient combler essentiellement un manque de logiciels supportant d'une manière native la modélisation intégrée des flux de production et des flux énergétiques. Nous proposons dans une première partie une description du projet ECOTHER, qui est à l'origine de nos travaux. La bibliothèque a été développée suivant une démarche épistémologique que nous expliquons dans une seconde partie de ce chapitre. Puis, nous montrerons dans un deuxième temps comment cet outil permet d'implémenter facilement des bibliothèques d'objets pour la simulation. Dans un troisième temps, nous décrirons les modules de la bibliothèque tout en précisant leur paramétrage, leurs interactions ainsi que les choix faits dans leur développement. Enfin, nous expliquerons comment utiliser notre bibliothèque dans le cadre d'un projet ERDES.

1. LE PROJET ECOTHER

ECOTHER est un projet d'innovation stratégique industrielle, 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 (plastique, élastomère et composite). Il a pour ambition de proposer de nouveaux procédés et outils de modélisation pour des filières industrielles énergétiquement efficaces dans le but d'améliorer leurs compétitivités face à une concurrence internationale accrue mettant en jeu leur compétitivité. En effet, l'industrie de polymères en France a subi ses dernières années une pression accrue due à la concurrence intra-Européenne (Europe centrale et de l'Est) et à l'émergence des pays asiatiques très agressifs sur les prix de vente, ce qui a provoqué une baisse des parts de marché des filières françaises. Cela a été accompagné d'une hausse de charge liée à la matière première et à l'énergie. Cette dernière présente jusqu'à 5% du chiffre d'affaire des entreprises impliquées présentant ainsi un impact économique non négligeable mais aussi un impact environnemental ce qui a fait de la maîtrise de l'énergie un objectif important dans le projet ECOTHER.

Sur le niveau stratégique, le projet est organisé en comité de pilotage (tenue par les leaders des lots qui sont principalement Sacred, REP, CLM, Pinette et Techteam) et en collège de transformateurs (Wattelez, CooperStandard, Sacred, Spencer Moulton, Anvis, EFJM, Mecaplast et Plastic Omnium). Le comité de pilotage se charge d'informer le collège des transformateurs qui en retour l'aide à orienter ses décisions (Figure 29).

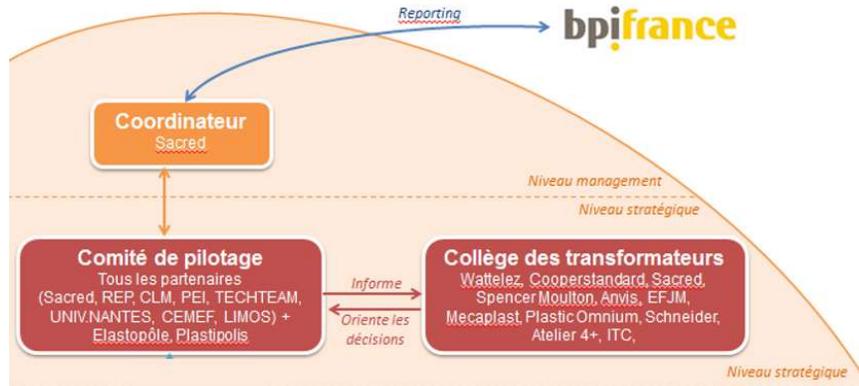


Figure 29. Organisation du projet ECOTHER au niveau stratégique

Sur le niveau opérationnel, le projet est organisé en 3 lots principaux (Figure 30) :

- Un lot 1 chargé du développement d'un procédé de dévulcanisation mécano-thermique permettant le recyclage des déchets de production. La preuve de concept d'un procédé de dévulcanisation visant au broyage fin de la matière et permettant la rupture des ponts de vulcanisation sans rompre les polymères a été obtenue à échelle laboratoire. Le projet consiste donc à concevoir et développer un procédé continu à échelle industrielle. Le développement de ce procédé est porté par la société REP (PME fabricant des presses hydrauliques pour la filière élastomère) en collaboration avec le laboratoire GPEA ;
- Un lot 2 divisé en trois sous-lots : un premier sous-lot chargé du développement d'un procédé de maîtrise des températures permettant le chauffage au plus près de l'empreinte au sein des moules composites et élastomères, porté par les sociétés CLM et SDC (PMEs moulistes respectivement pour la filière composite et pour la filière élastomère) en collaboration avec le laboratoire GPEA; un deuxième chargé du développement d'un procédé permettant de maîtriser les homogénéités de températures sur un process de 250 à 450°C et de récupérer et stocker l'énergie pour les process à 450°C sur les presses adaptées aux composites, porté par la société Pinette Emidecau Industries (PME spécialisée dans le développement de machines spéciales) en collaboration avec le laboratoire GPEA et un troisième chargé du développement d'un algorithme de commande de la température pour les outillages de mise en forme des polymères porté par le laboratoire GPEA ;
- Un lot 3 divisé aussi en deux sous-lots : un premier, dans lequel s'inscrit le présent travail pour la création d'une bibliothèque d'objets permettant le développement d'un modèle virtuel pour une usine de transformation des polymères et d'élastomères, à travers ce lot le projet vise à coupler les flux de production et les flux énergétiques lors de la réorganisation d'ateliers et/ou de site voire la création de nouveaux sites, ce sous-lot dans lequel nous travaillons est porté par la société Techteam en collaboration avec le laboratoire LS2N, et un deuxième pour l'optimisation du plan de production sous des

contraintes énergétiques, porté par la laboratoire LIMOS. Les deux travaux vont interagir entre eux même et avec d'autres travaux des lots cités ci-dessus. En effet, le projet ECOTHER rassemble à la fois des acteurs et des problématiques qui doivent être traités de manière globale au sein d'un seul et même projet. Par exemple, l'élaboration du modèle de simulation permet également de faire le lien entre tous les procédés puisqu'il intègrera l'ensemble des procédés développés au sein du modèle et permettra aux transformateurs de pouvoir étudier de nouvelles implantations ou de se réimplanter en prenant en compte tous les résultats du projet, à la fois en termes de procédés mais également en prenant parfaitement en compte les flux énergétiques au même titre que les flux logistiques. Le modèle virtuel constituera un argument commercial majeur pour les fabricants de moyens vendeurs de leurs solutions auprès de leurs clients en démontrant la pertinence scientifique de la démarche globale.

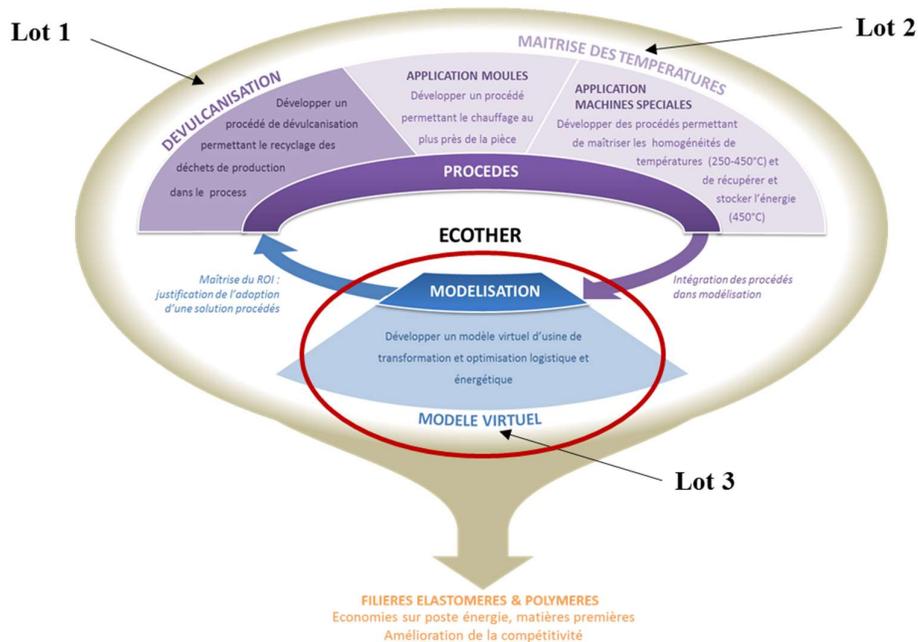


Figure 30. Organisation du projet Ecother au niveau opérationnel

2. DEMARCHE EPISTEMOLOGIQUE

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du lot N°3 du projet ECOTHER. Ce lot N°3 a pour objectif général d'aider les transformateurs de polymères (produits plastiques, élastomères et composites) à réduire leur consommation énergétique afin d'améliorer leur compétitivité. Ce lot se décline en deux parties. La première (Lots 3.1 et 3.2 du projet) consiste à développer un outil permettant de simuler la consommation énergétique d'un système de production, ce qui fait l'objet de cette thèse. La deuxième partie (Lot 3.3 du projet), réalisée par le laboratoire LIMOS de Clermont Ferrand dans le cadre d'une autre thèse (Kemmoie et al., 2017), consiste à

proposer un outil d'ordonnancement prenant en compte la consommation énergétique. Bien sûr, ces deux parties du lot N°3 sont complémentaires. Le résultat du lot 3.3 permettra d'ordonnancer une production qui sera testée grâce à l'outil que nous avons développé dans cette thèse.

Dans un premier temps, nous nous sommes donc attachés à développer une bibliothèque d'objets très concrets destinés aux transformateurs de polymères. Ces objets étaient concrets dans le sens où ils correspondaient très exactement à la description d'ateliers de production. Grâce à eux, l'utilisateur industriel de notre bibliothèque pouvait décrire des moyens de production (Presse à injecter, moule d'injection, ...), des produits (mélange élastomère, produits finis...) et décrire les processus permettant la production en utilisant ces moyens. Cela a conduit à la version V0 de notre bibliothèque. Pour aboutir à cette version, nous avons été amenés à réaliser des visites chez les industriels impliqués dans le projet pour cibler les procédés les plus importants à modéliser. Une fois ces procédés identifiés, nous avons pu étudier de près leur fonctionnement, les machines qui leur sont associées et aussi l'organisation des systèmes de production en eux-mêmes (Figure 31). Nous précisons que les procédés qui étaient identifiés pour intégrer dans la bibliothèque V0 sont :

- Le moulage par injection ;
- L'extrusion ;
- La fabrication des mélanges ;
- La dévulcanisation.

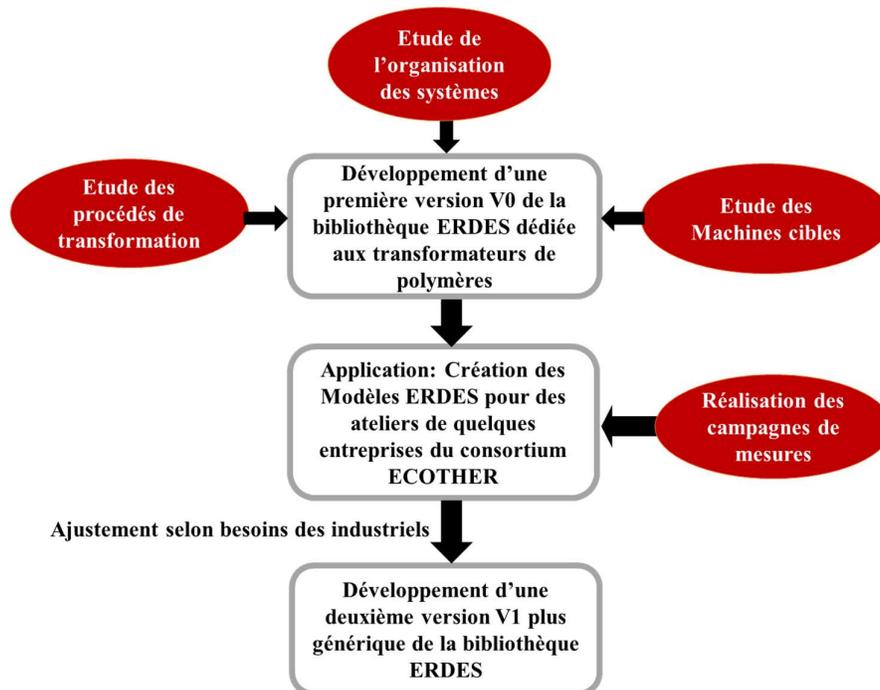


Figure 31. Démarche épistémologique

Dans un deuxième temps, nous avons présenté notre bibliothèque V0 à des industriels et nous avons cherché à modéliser des ateliers réels des partenaires du projet ECOTHER. Cela nous a permis de constater deux choses. La première est que chaque industriel utilise des moyens de production annexes, consommateurs d'énergie, manquant dans la version V0 de la bibliothèque. Ces moyens étant très divers, il n'était pas question de décrire chacun d'eux par des nouveaux objets de notre bibliothèque. Cela aurait conduit à une inflation du nombre d'objets qui aurait nuit à la simplicité d'utilisation recherchée. Nous avons donc proposé une première généralisation de notre travail en ajoutant des objets permettant de décrire n'importe quelle ressource consommatrice d'énergie. La deuxième constatation lorsque nous avons utilisé la bibliothèque V0 en milieu industriel est que, si les processus de production sont relativement standards, chaque industriel utilise des variantes de ces processus qui lui sont propres. Nous avons donc retravaillé la notion de processus en permettant la description de processus plus complexes, faisant intervenir des décisions. Ces deux évolutions ont conduit à la mise en place d'une version V1 de cette bibliothèque. Notons que cette généralisation en passant de la version V0 à V1 de notre bibliothèque constitue l'un des apports majeurs de cette thèse. Elle a montré que nos travaux, d'abord appliqués à un secteur de production très pointu (transformation de polymères), pouvaient être généralisés à d'autres secteurs de la production. Une des évolutions de notre travail et de pousser plus loin cette généralisation en permettant la description de n'importe quel système consommateur d'énergie.

3. LE PRINCIPE DE LA BIBLIOTHEQUE D'OBJETS

3.1. LA BIBLIOTHEQUE D'OBJETS : QUELS OBJECTIFS ?

Nous désignons par bibliothèque d'objets un ensemble cohérent de modules paramétrables conçus et utilisés pour créer des modèles de simulation rapidement et facilement. La création des modèles se fait en disposant les modules suivant une certaine logique et en les paramétrant.

Cette technique a été utilisée à la fois pour ajouter l'aspect énergie dans la SED et pour répondre à des enjeux souvent rencontrés lors de la création d'un modèle de simulation. En effet, le développement d'un modèle de simulation est une activité coûteuse en temps. Le développeur du modèle doit mettre en œuvre ses compétences et son expertise dans le domaine de la modélisation et de la simulation pour aboutir à une description algorithmique du fonctionnement du système à simuler. Cela implique souvent des efforts considérables déployés pour le développement d'un modèle qui va répondre à une problématique bien définie mais qui sera rarement réutilisable et ré-exploitable. Or, les systèmes de production correspondent souvent à des problèmes complexes qui évoluent dans le temps. Il est donc nécessaire de développer des solutions de modélisation et de simulation qui s'adaptent avec cette évolution mais dont le développement soit économe en termes de temps et d'efforts. La création des bibliothèques est dans ce sens une solution efficace pour répondre à ces besoins. Elle permet de simplifier le rôle du modélisateur qui n'a plus forcément besoin d'être un spécialiste de SED. En effet, le constructeur de la bibliothèque devient le responsable de l'analyse de

l'environnement de la simulation, de la définition des objets, de leurs périmètres et de leurs communications (Figure 32). Les objets qu'il crée, qui encapsulent déjà un code, seront tout simplement exploités et paramétrés par le modélisateur qui les spécifie et les adapte à sa problématique tout en définissant le cadre expérimental. Cela donne la possibilité à des non-spécialistes de simulation de créer plus rapidement et plus efficacement des modèles. Cela permet dans certains cas de fusionner le rôle de modélisateur et d'utilisateur final qui utilise le modèle pour tester des scénarios et analyser leurs résultats.

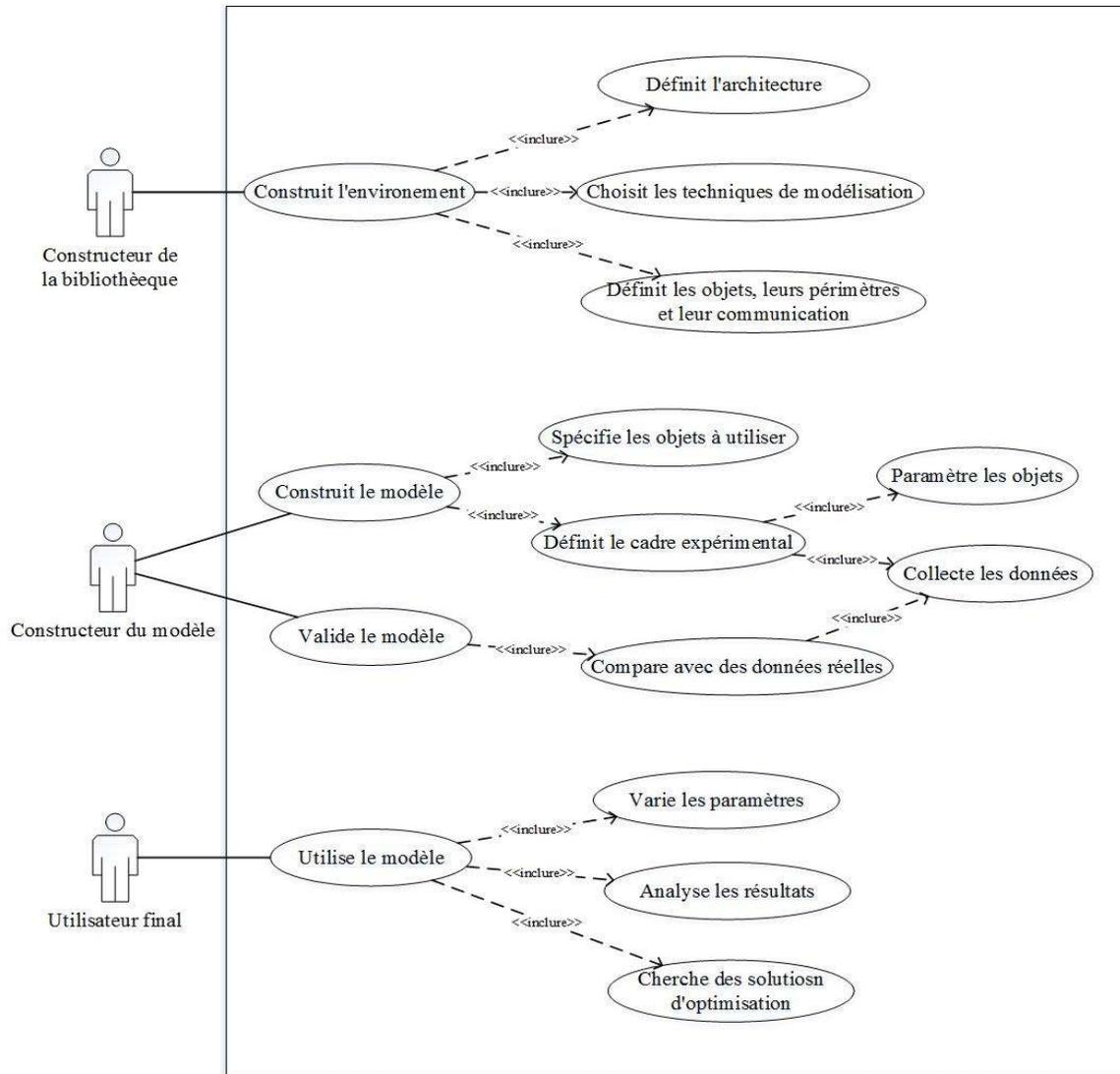


Figure 32. Diagramme de cas d'utilisation UML d'une bibliothèque d'objets

Pour résumer, les objectifs de la création d'une bibliothèque d'objets en simulation peuvent être présentés comme suit :

- Création rapide et plus simple de modèles de simulation ;
- Modularité, flexibilité et réutilisation des modèles avec un effort réduit dans leur adaptation au changement du système ;
- Création de modèles bien structurés et plus compréhensibles ;
- Considération native de la consommation énergétique que l'on cherche à combler à travers la création d'une bibliothèque d'objets tout en profitant de tous les avantages cités ci-dessus.

3.2. ENVIRONNEMENT DE DEVELOPPEMENT

Avant de passer à la description de la bibliothèque d'objets, nous décrivons dans cette section l'environnement de développement tout en précisant brièvement les fonctionnalités les plus importantes qui nous ont servies à la création de la bibliothèque ERDES.

Notons tout d'abord que le logiciel avec lequel la bibliothèque ERDES a été développée est le logiciel Arena® édité par Rockwell Software. Arena® est un logiciel de SED basé sur le langage Siman (Pegden et al., 1995). Le choix d'Arena® s'est fait pour trois raisons importantes. Tout d'abord, ce logiciel est l'un des plus connus et des plus utilisés dans la SED aussi bien dans le domaine de la recherche que dans l'industrie. Ensuite, c'est un outil particulièrement bien adapté à la construction de bibliothèques. Enfin, cet outil est commercialisé par la société TECHTEAM qui finance en partie cette thèse. Notons que l'un des inconvénients d'Arena® est la pauvreté de son animation notamment 3D, mais cela n'affecte en rien les objectifs de nos travaux. Dans Arena®, les fonctionnalités du langage sont incorporées dans des objets, appelés aussi modules, à partir desquels des modèles de simulation peuvent être construits. En se basant sur leur type et leur niveau de fonctionnalité, ces modules sont regroupés dans des panels appelés « Template » ou encore « Bibliothèques » (ex. 'basic process', 'advanced process', 'advanced transfert', etc.). Dans de nombreux cas, il est assez simple de construire un modèle en cours d'exécution à partir de ces modules de bas niveau disponibles dans Arena®. Néanmoins, il peut être difficile de mettre en œuvre un modèle si une fonction requise n'a pas été construite dans le langage. En effet, les bibliothèques natives d'Arena® peuvent ne pas être suffisantes pour construire efficacement des modèles de simulation. Les développeurs doivent donc implémenter leurs propres modules dans des bibliothèques d'objets personnalisées.

Le logiciel propose dans sa version professionnelle un ensemble de fonctionnalités permettant la création de ces bibliothèques. Ce panel permet de créer une liste d'objets chacun avec une interface, un code et une animation. Nous décrivons ci-dessous les quatre composantes principales d'un objet de bibliothèque.

L'interface : Cette composante permet de définir les paramètres de l'objet ainsi que toutes les options qui lui sont associées. Le constructeur du modèle utilisera cette interface pour renseigner des données spécifiques et instancier l'objet afin de l'adapter à une problématique

particulière. Néanmoins, dans sa conception, un objet doit répondre à un certain niveau d'abstraction. Dans cette cible, le logiciel propose plusieurs fonctionnalités particulières pour gérer cette abstraction. Nous décrivons ci-dessous les plus importantes et qui nous ont servi au développement de la bibliothèque ERDES.

- Les 'Check box' : permettent d'activer ou désactiver une option. Dans l'exemple défini dans la Figure 33, on peut préciser si la ressource a besoin d'opérateur ou non. Cette option, si désélectionnée, cache toutes les informations en relation avec l'utilisation des opérateurs ;
- Les 'Radio Button Group' : permettent de sélectionner une option dans une liste prédéfinie. Par exemple, on peut préciser si la ressource est une ressource principale ou une ressource secondaire (Figure 33) ;
- Les 'Combo box' : permettent d'introduire ou de sélectionner une valeur ou un élément dans une liste. Cette liste peut être déjà définie dans un autre objet. Dans ce cas, les éléments de la liste sont référencés. Cela peut être pratique pour les objets qui interagissent et qui partagent des informations. Par exemple, les noms des équipes peuvent être sélectionnés dans une liste qui a été précédemment définie dans un autre objet 'Equipe' (Figure 33) ;
- Les 'Repeat group' : permettent au développeur de la bibliothèque de créer des listes ou des tableaux de même type de telle manière que l'utilisateur puisse introduire autant d'éléments qu'il le souhaite. Par exemple, dans l'objet « Ressource », l'utilisateur a la possibilité de définir une liste de composants d'entrée. Cette liste est un tableau de structures, chaque structure renfermant la référence de composant, le stock qui lui est associé et la quantité nécessaire (Figure 33).

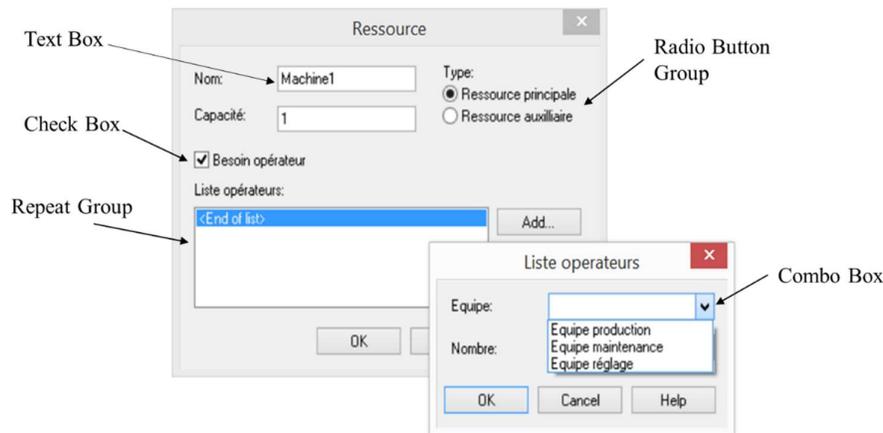


Figure 33. Exemple d'interface objet bibliothèque sous Arena®

Le code : C'est la composante la plus importante de chaque objet, dans lequel on encapsule son fonctionnement général. Le logiciel fournit des fonctionnalités qui permettent de faire le lien avec celles de l'interface. Par exemple :

- Les 'Operand' : permettent de faire le lien avec les champs renseignés dans l'interface. Lors de la création du modèle, chaque 'Operand' prendra la valeur du champ qui lui correspond ;
- Les 'Modules Repeater' : permettent de faire le lien avec les 'Repeat Group' définis dans l'interface pour reproduire une partie de code pour chaque élément de la liste définie par celui-ci (Figure 34). Deux options sont possibles : soit reproduire le code en série soit le reproduire en parallèle ;
- Les 'Switch' : permettent de faire le lien avec les options définies dans l'interface, soit à travers des 'Check box', soit à travers des 'Radio Button Group'. Cela permet d'acheminer les entités vers la bonne partie du code selon l'option sélectionnée (Figure 34).

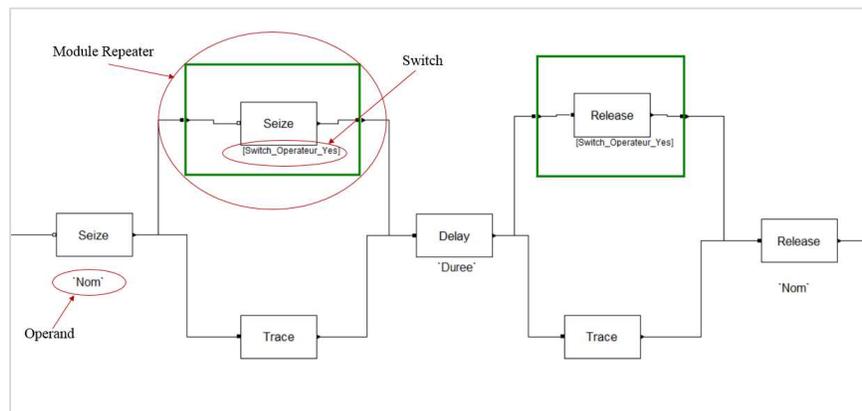


Figure 34. Exemple de code d'objet bibliothèque sous Arena®

L'animation graphique : cette composante permet d'associer à chaque objet une animation graphique qui apparaîtra lors de la simulation du modèle. Les animations graphiques sont généralement adaptées pour optimiser la compréhension de la dynamique du système simulé (changement des activités et changement des états des objets).

4. DESCRIPTION DE LA BIBLIOTHEQUE ERDES

Suivant la démarche décrite tout au début du présent chapitre, la version de la bibliothèque qu'on va décrire dans cette section (version V1) est une amélioration et généralisation de la première version V0 qui était dédiée aux seuls transformateurs de polymères. Autrement dit,

cette version V1 permet bien sûr de créer des modèles de simulation dédiés aux transformateurs des polymères pour répondre aux besoins définis dans le projet ECOTHER, mais elle permet aussi de créer d'autres modèles plus génériques. Cela permet de répondre à un double objectif :

- La création de modèles de simulation pour des usines de transformation des polymères dans le but de prédire et optimiser leur consommation énergétique. Cet objectif correspond à notre mission principale dans le cadre du projet ECOTHER ;
- La création de modèles de simulation pour d'autres types d'industrie. Ceci permet d'étendre l'utilisation et la commercialisation de la bibliothèque ERDES en dehors du projet ECOTHER pour répondre à une absence de logiciels dédiés alliant SED et modélisation énergétique.

Nous décrivons dans cette partie du manuscrit les principaux modules de la bibliothèque ainsi que leurs interactions.

4.1. DESCRIPTION DES MODULES

Nous pouvons classer les modules de la bibliothèque en quatre grandes catégories (Figure 35). Chaque catégorie contient un ensemble de modules présentant de fortes interactions entre eux mais aussi avec les modules des autres catégories.

Nous détaillons ci-dessous les objets les plus importants selon la catégorie à laquelle ils appartiennent tout en justifiant les choix qui ont été faits dans le développement.

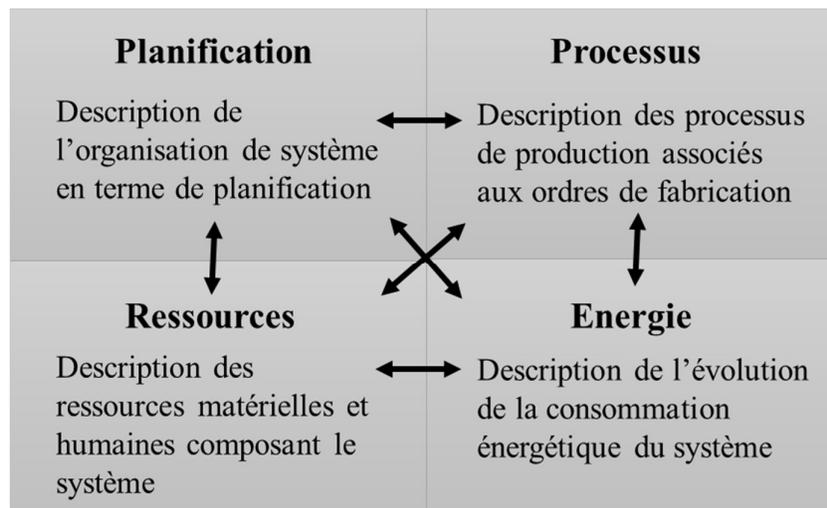


Figure 35. Catégories des modules de la bibliothèque d'objets

4.1.1. LES MODULES RESSOURCES

Nous classons les modules ressources en 4 sous-catégories :

- Des ressources liées au procédé de moulage par injection ;
- Des ressources liées au procédé d'extrusion ;
- Des ressources liées au procédé de fabrication de mélange ;
- Une ressource liée au procédé de dévulcanisation ;
- Des ressources standards qui peuvent être utilisées dans n'importe quel procédé de fabrication.

▪ Les ressources liées au moulage par injection

Le moulage par injection est parmi les procédés les plus utilisés dans le domaine de transformation des polymères. Connu pour être un procédé énergivore, ce procédé a attiré l'attention de plusieurs chercheurs dans le but de prédire, évaluer, analyser et réduire sa consommation énergétique (Kanungo and Swan, 2008; Madan et al., 2015; Müller et al., 2014; Ribeiro et al., 2012; Spiering et al., 2015).

Le procédé de moulage par injection consiste à remplir les cavités d'un moule préchauffé avec de la matière à l'état fondu (Injection plastique) ou non polymérisé (Injection de polymères), puis à démouler la pièce obtenue après le refroidissement ou la vulcanisation de la matière. Le remplissage est réalisé en introduisant sous pression de la matière à l'état pâteux dans les cavités du moule, également appelées empreintes. La température des empreintes est régulée à une valeur permettant de vulcaniser la matière injectée. A la fin du cycle, les pièces injectées sont extraites du moule après son ouverture. L'éjection peut être automatique ou manuelle selon le type de la machine. Dans le deuxième cas, la présence d'un opérateur est nécessaire.

Afin de modéliser et simuler ce procédé de transformation toujours en tenant compte de sa consommation d'énergie, deux modules ont été développés : le module 'Presse à injecter' et le 'Moule'.

Le module 'Presse à injecter' : Ce module encapsule toutes les activités qui peuvent décrire un processus de fabrication de pièces en polymère par injection. En plus des paramètres dédiés à la description de la machine et en particulier à la gestion de la matière (Ex. capacité trémie, seuil bas), ce module contient d'autres paramètres dédiés à la gestion de l'énergie (Figure 36). En effet, en observant de près le fonctionnement d'une presse à injecter et en faisant des mesures électriques préliminaires sur la machine, nous avons pu repérer 5 courbes de consommations liées aux équipements les plus consommateurs sur la presse à injecter. Ces courbes sont soit liées à la machine (Courbe de préchauffage machine et courbe de maintien en température machine) soit liées au moule (courbe de préchauffage moule, courbe de maintien en température moule et courbe d'injection).

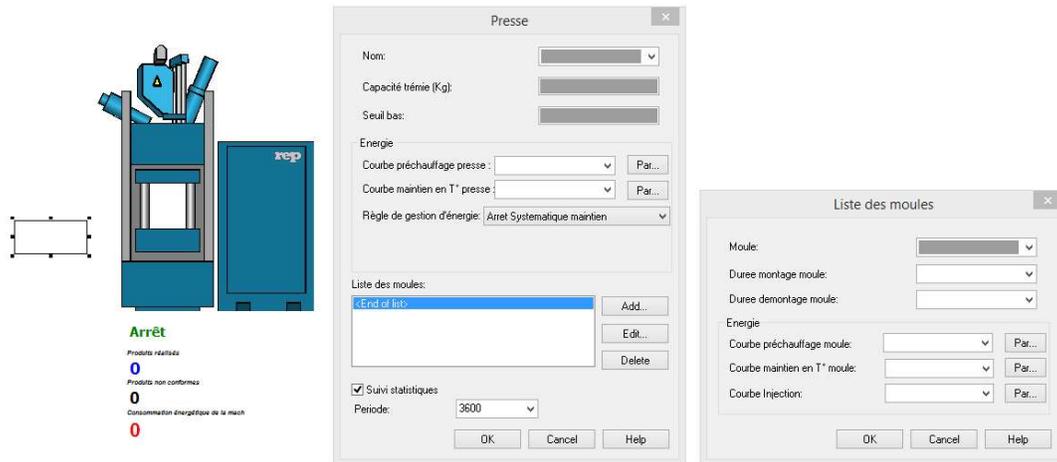


Figure 36. Objet 'Press à injecter'

En plus des courbes de consommation, ce module comporte un paramètre définissant la règle de gestion de l'énergie sur la ressource en particulier dans les périodes d'interruption de la production. Trois options sont proposées :

- Un arrêt systématique de maintien : dans ce cas, la presse est complètement éteinte pendant les interruptions. Aucune consommation n'est enregistrée, mais en contrepartie, des opérations de préchauffages sont nécessaires à la reprise pour rétablir le système dans un état prêt à produire ;
- Une marche systématique du maintien : contrairement au cas précédent, la machine reste systématiquement en maintien de température jusqu'à la reprise de la production, cela implique une consommation à non-valeur ajoutée, mais en contrepartie, permet de reprendre la production directement à la fin de la période de pause ou de fermeture de l'atelier ;
- Un arrêt conditionnel du maintien : cette option rassemble les deux dernières mais avec une condition. En effet, l'arrêt ou la marche du maintien est décidée selon une durée limite : si cette durée est dépassée, la machine est complètement éteinte. Cela permet par exemple d'éteindre complètement la machine pendant les weekends et les soirs et les laisser en maintien pendant les petites pauses.

Ces options permettent de tester plusieurs scénarios avec des règles de gestion différentes et en déduire la meilleure à la fois en termes de réduction de la consommation notamment dans les périodes d'inactivité (Langer et al., 2014; Weinert and Mose, 2014) et en termes de respect des objectifs de production.

Le module 'moule' : Ce module permet de sélectionner les caractéristiques du moule dans le but de gérer la matière consommée et produite au cours d'un cycle d'injection. En effet, en plus

de la matière première consommée à chaque injection, les pièces injectées peuvent nécessiter des inserts (Figure 37). Par conséquent, le stock correspondant à ces inserts doit être décrémenté à chaque fin de cycle. En revanche, le nombre d'empreintes indiqué dans le moule permet d'incrémenter le stock de produits injectés.

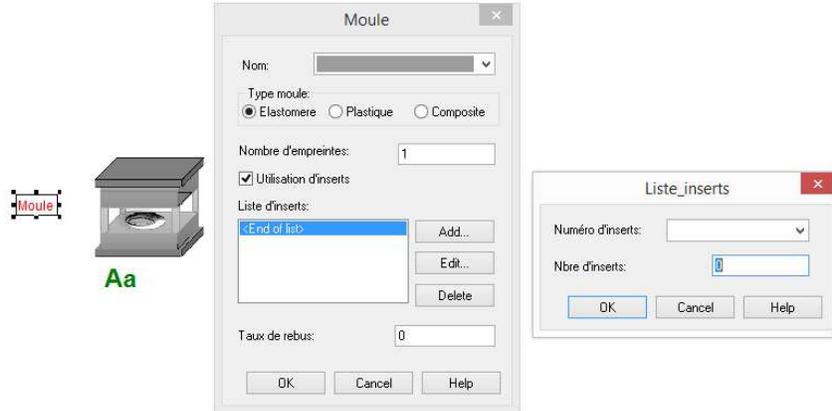


Figure 37. L'objet 'Moule'

▪ Les ressources liées à l'extrusion

L'extrusion est considérée comme le plus important des procédés de mise en forme des polymères. Le principe de base de l'extrusion mono-vis est l'utilisation d'une vis sans fin, qui tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique. Procédé continu, l'extrusion est utilisée pour fabriquer des produits finis ou semi-finis de section constante (films, plaques, tubes, profilés...) par passage au travers d'un outillage appelé filière. Dans ce cas, les fonctions principales du procédé sont d'assurer la fusion du polymère solide, puis la mise en pression et le mélange du polymère fondu, afin d'alimenter dans de bonnes conditions la filière, qui donnera sa forme au produit fabriqué. Le procédé a été appliqué dès le début du XX^e siècle au domaine des élastomères, puis s'est largement développé depuis dans celui des matières thermoplastiques.

Une ligne d'extrusion est généralement composée d'une extrudeuse en début de ligne, une succession de différents postes selon le produit à fabriquer et une machine de découpe en fin de ligne pour découper le boudin extrudé. Donc pour pouvoir la simuler, 4 modules ont été développés : un module 'Extrudeuse', un module 'Poste d'extrusion', un module 'Poste de découpe' et un module 'Ligne d'extrusion' pour organiser les postes déjà cités.

Extrudeuse : Ce module permet de définir l'extrudeuse en début de ligne. Il permet également de définir le nombre de têtes d'extrusion donnant ainsi la possibilité de simuler des procédés d'extrusion multi-matières. Les données liées à chaque tête (matière, diamètre de profilé, etc.) sont indiquées dans l'objet OF pour simplifier ce module et pour pouvoir utiliser la même ligne pour plusieurs produits simulés.

Module 'Poste d'extrusion' : Un poste d'extrusion peut être un four ou autre poste quelconque (un poste de vernissage, un poste de marquage, une cabine de colle, etc.). Le choix de grouper les différents postes d'extrusion dans un seul poste a été fait dans le but de simplifier la

bibliothèque après avoir remarqué que le nombre d'objets peut considérablement augmenter avec les différents postes qui peuvent exister dans une ligne d'extrusion et qui ont des fonctionnalités différentes mais sans réel intérêt pour la SED.

Module 'Poste de découpe' : Ce module est à mettre en fin de ligne pour générer des produits finis fabriqués par la ligne d'extrusion. L'information requise par ce poste est la longueur de la pièce à fabriquer.

Le module 'Ligne d'extrusion' : L'objet 'ligne d'extrusion' permet de lister les postes décrits ci-dessus dans l'ordre afin de décrire la ligne. Il permet aussi de définir un mode de gestion d'énergie comme montré dans la Figure 38. Ce mode de gestion a été introduit dans l'objet décrivant la ligne puisqu'il s'applique de manière identique à tous les postes qui la composent. Enfin ce module permet la gestion de la matière, gestion qui est complexe du fait du nombre important de postes constituant généralement la ligne. Une ligne d'extrusion peut représenter plusieurs centaines de mètres. Il faut donc par exemple anticiper l'arrêt de l'extrudeuse lors d'un arrêt de la ligne pour ne pas rebuter trop de matière. Cette durée d'anticipation dépend à la fois de la vitesse d'extrusion et de la longueur de chaque élément constituant la ligne.

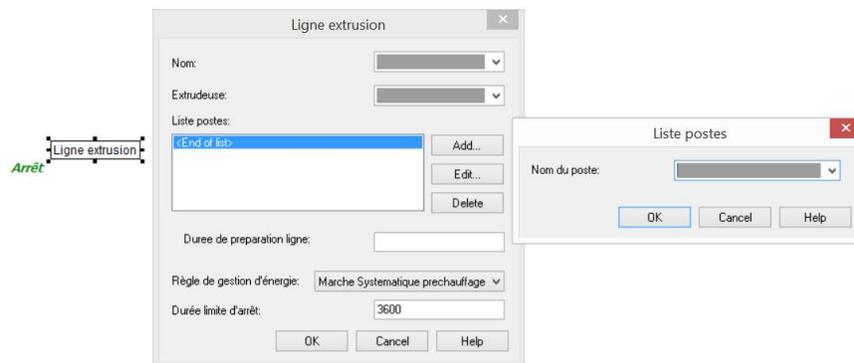


Figure 38. L'objet 'Ligne d'extrusion'

- **Les modules de fabrication mélange**

La fabrication des mélanges est l'un des procédés énergivores que l'on a pu observer chez les entreprises partenaires du projet ECOTHER. D'après un audit énergétique que nous avons réalisé chez l'une de ces entreprises, un mélangeur peut consommer jusqu'à 450 kWh par heure avec un volume annuel de production qui s'élève à 4438 heures (année de référence 2014). Cette consommation significative nous a poussé à considérer ce procédé dans notre bibliothèque.

La fabrication des mélanges consiste à bien malaxer le mélange élastomère avec des additifs selon une formule préalablement définie. L'opération de fabrication de mélange passe souvent par un premier mélangeur interne (à rotors sécants ou tangents) pour incorporer les ingrédients puis par un mélangeur externe (à cylindres) pour la mise en bande du mélange. Le mélange est ensuite refroidi, contrôlé et stocké avant d'être utilisé dans des procédés de transformation, notamment le moulage et l'extrusion.

Le seul module ressource qui a été développé pour la fabrication des mélanges est le module mélangeur qui peut représenter soit un mélangeur interne soit un mélangeur externe.

Le module 'Mélangeur' : Ce module est caractérisé principalement par le nom du mélangeur, sa capacité et la liste des mélanges qu'il peut fabriquer avec chacun une période de préparation spécifique. Concernant la consommation énergétique, l'utilisateur doit indiquer quel courbe de consommation est associée au mélangeur. Cette courbe peut être différente d'un mélange à un autre selon les caractéristiques de celui-ci (par exemple sa viscosité). Elle peut donc être ajustée selon le mélange en cours grâce à la notion de courbes paramétrées décrite dans le chapitre suivant. Les paramètres sont passés en attribut à partir du module 'OF' afin d'indiquer les valeurs de puissance et de durée associées à chaque mélange.

▪ Le module de dévulcanisation

La vulcanisation est une étape nécessaire consistant à incorporer un agent vulcanisant (soufre, le plus souvent) à un élastomère brut pour former après cuisson des ponts entre les chaînes moléculaires. Cette opération est considérée comme irréversible chimiquement. Les déchets de production vulcanisés (carottes, tapis...) représentent 15% du caoutchouc technique sans compter les rebuts et représentent un gisement français de 67.7kT et un gisement mondial de 2.5MT qui sont aujourd'hui mis en décharge. Un procédé de dévulcanisation permettrait de valoriser ces déchets et générer des économies majeures pour les transformateurs car, après dévulcanisation, leur sera restitué un mélange recyclé qui sera réincorporé dans la formule initiale à hauteur du taux de déchet. Ces procédés sont actuellement en cours de développement et les premières machines devraient arriver rapidement sur le marché.

Module 'Machine de dévulcanisation' : Ce module est caractérisé par le nom de la machine, sa capacité (pour des fins de gestion de matière) et par une courbe de consommation qui définira à la fois la consommation énergétique de la machine ainsi que son temps de cycle (Figure 39).

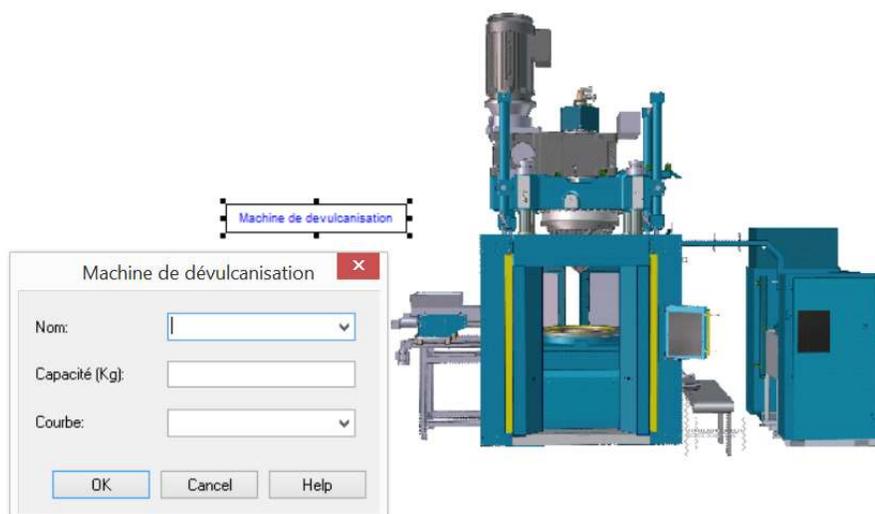


Figure 39. Module 'Machine de dévulcanisation'

▪ **Les modules ressources standards**

Cette sous-catégorie de modules ressources représente essentiellement celles qui peuvent être utilisées dans un procédé quelconque soit en tant que ressource standard, développée dans le but de la généralisation de la bibliothèque, soit en tant que ressource partagée entre plusieurs procédés comme les ressources humaines ou les stocks.

Le module ‘Machine Standard’ : Ce module fait le lien entre l'activité et la ressource qu'elle utilise pour être exécutée. En effet, on y retrouve plusieurs activités qui peuvent être des activités de préchauffage, de maintien ou d'opération quelconque (Figure 40). Ce module présente une forte interaction avec l'objet ‘Activité’ puisque les activités qui vont être définies dans les processus vont pointer dans cet objet.

Faisant le parallèle avec la presse à injecter, ce module comporte un paramètre définissant la règle de gestion de l'énergie sur la ressource dans les périodes d'interruption de la production. Les options que nous proposons permettent de définir l'état de la machine dans les périodes d'inactivité, ce qui revient à tester l'influence des différents modes de gestion sur la consommation globale de la machine.

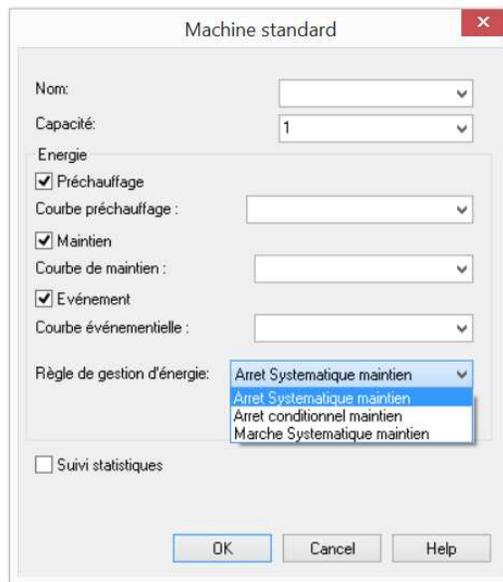


Figure 40. Interface du module ‘Machine Standard’

Module ‘Opérateurs’ : Ce module est représentatif du type ‘ressource humaine’ tel que présenté dans le chapitre précédent. Nous avons choisi d'organiser les opérateurs en équipes. Ainsi, le modélisateur peut sélectionner pour chaque activité un nombre d'opérateurs dans une équipe selon la compétence requise (Figure 41). Plusieurs règles de sélection sont proposées par Arena®, notamment la règle du premier disponible, la sélection cyclique, la sélection aléatoire, etc. L'objectif principal du choix d'organiser les opérateurs en équipe est de s'assurer

que le nombre d'opérateur disponible dans chaque équipe est suffisant ou non en évaluant leurs taux d'occupation et le taux des temps d'attente liés à une absence d'opérateur. En effet, dans le cas où le nombre d'opérateurs disponibles est insuffisant, des temps d'attente seront enregistrés. Ces temps d'attente provoquent dans certains cas une surconsommation d'énergie.

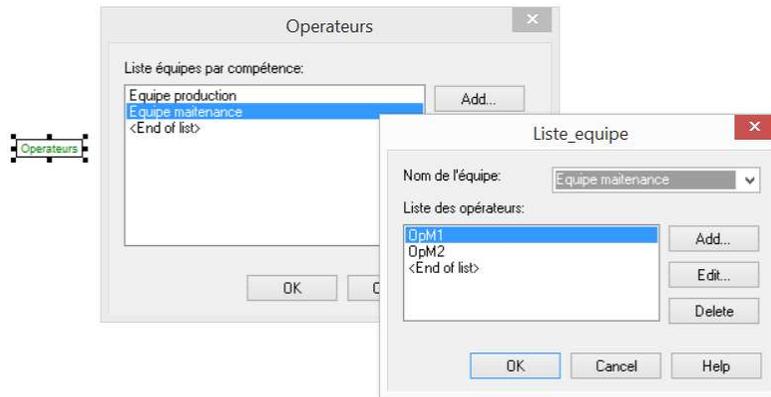


Figure 41. Interface module 'Opérateurs'

Module 'Produits' : Ce module a été développé dans le but de gérer la matière dans les stocks (matières premières, produits finis ou semi-finis). Il permet de déclarer des stocks initiaux qui vont être ensuite incrémentés ou décrémentés au cours de la simulation selon les activités auxquelles ils sont associés. Par exemple, une activité de fabrication de mélange va incrémenter un stock de mélange alors qu'une activité de moulage par injection va en consommer et par conséquent décrémenter le stock.

La gestion de matière a été considérée vue son influence directe sur la consommation d'énergie. En effet, une rupture de stock peut mettre les machines dans des états à non-valeur ajoutée qui consomment d'avantage d'énergie.

4.1.2. LES MODULES D'ORGANISATION DE LA PRODUCTION

Le module 'OF' : Ce module sert à importer depuis une source extérieure (dans notre cas Excel) un fichier d'Ordres de fabrication (OFs) (Figure 42). Cela permet de récupérer les OFs à simuler avec tous les détails nécessaires à leur simulation dont la date de lancement, la quantité à fabriquer, le processus correspondant et le jeu de paramètres associés. Ce dernier a été rajouté pour pouvoir introduire des courbes paramétrées. De cette manière nous pouvons réduire le nombre de courbes définies dans le modèle et aussi changer, dans la même simulation, les dimensions des profils énergétiques pour la même activité. Par exemple, un profil énergétique lié à une activité de production peut être ajusté selon des paramètres liés au produit en cours.

Notons aussi que le fichier OF contient aussi les limites de puissance, définies heure par heure. Ce sont des limites données par le fournisseur d'électricité que l'on cherche à ne pas dépasser

car l'énergie consommée avec des puissances supérieures à ces limites coûte beaucoup plus cher (Figure 43). A partir de ces courbes limites, le module « courbe » décrit plus loin pourra calculer l'énergie consommée en sur-limite.

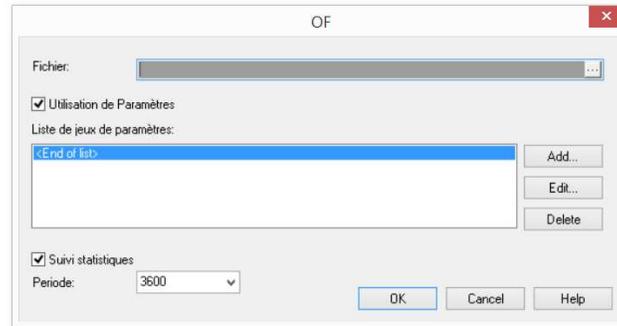


Figure 42. Interface de l'Objet OF

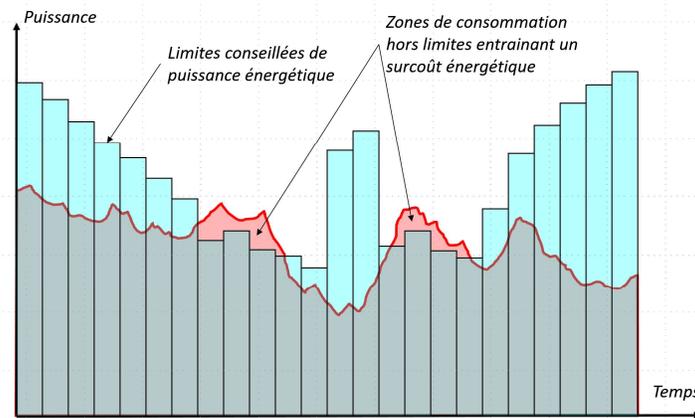


Figure 43. Seuils de puissance et dépassements

Le module 'Calendrier' : Ce module a été développé de façon à prendre en compte le calendrier du travail du système réel (les horaires d'ouvertures et de pauses). Si, dans certains cas, la considération du vrai calendrier n'est pas indispensable, dans le cas des projets intégrant l'énergie, cet élément est très important pour la gestion de l'énergie et en particulier la consommation d'énergie à non-valeur ajoutée. Comme évoqué précédemment, les interruptions de production ont un impact significatif sur la consommation énergétique. Il est donc crucial de considérer les horaires de travail dans la modélisation et la simulation des projets ERDES.

Afin de garantir plus de souplesse dans la modélisation, nous avons choisi d'importer les horaires du calendrier depuis un fichier externe : cela permet de paramétrer des horaires spécifiques à chaque cas d'utilisation. Néanmoins nous avons proposé des calendriers standards pour des organisations en 1*8, 2*8, 3*8 et 3*8 samedi dimanche pour faciliter la tâche du

constructeur du modèle. De plus, nous avons développé ce module de telle façon que l'on puisse simuler un système de production avec différentes organisations. Par exemple, le système peut être divisé en deux ateliers, un premier qui travaille en 1*8 et un deuxième qui travaille en 3*8. Pour ce faire, nous associons à chaque calendrier des moyens de production de manière à pouvoir définir plusieurs calendriers dans le même modèle, chacun avec les moyens qui lui sont associés (Figure 44).

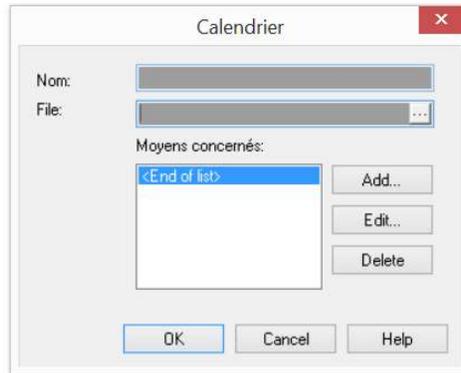


Figure 44. Interface de l'objet Calendrier

4.1.3. LES MODULES PROCESSUS

Pour décrire un processus de production, plusieurs modules ont été développés. Ces modules sont principalement le module 'Activité' et les modules de synchronisation, décision et délimitation des processus. Nous décrivons ci-dessous les différents modules liés au processus.

Le module 'Activité' : Ce module permet de décrire une activité de production suivant le principe défini dans le chapitre 3 section 1.2. Pour dire si l'activité nécessite ou non de l'énergie, nous avons mis une option 'Type' qui peut être 'Courbe' ou 'Durée' (Figure 45). Si l'option 'Courbe' est cochée, un profil énergétique doit lui être associé. Sinon, le modélisateur doit juste renseigner la durée opératoire de l'activité. En outre, nous avons défini d'autres options pour la considération ou non des ressources matérielles et humaines. Concernant les ressources matérielles, nous avons précisé précédemment dans les concepts de base qu'une activité peut consommer de la matière en entrée et peut aussi en générer en sortie. Cela a été implanté par l'insertion de deux « Repeat Group » pour définir la liste de matière (que nous avons noté 'Composant' pour faire référence à tout type de matière première, semi-finie ou finie) en entrée ou en sortie de l'activité. Pour chaque composant, il faut indiquer le nom du composant et sa quantité.

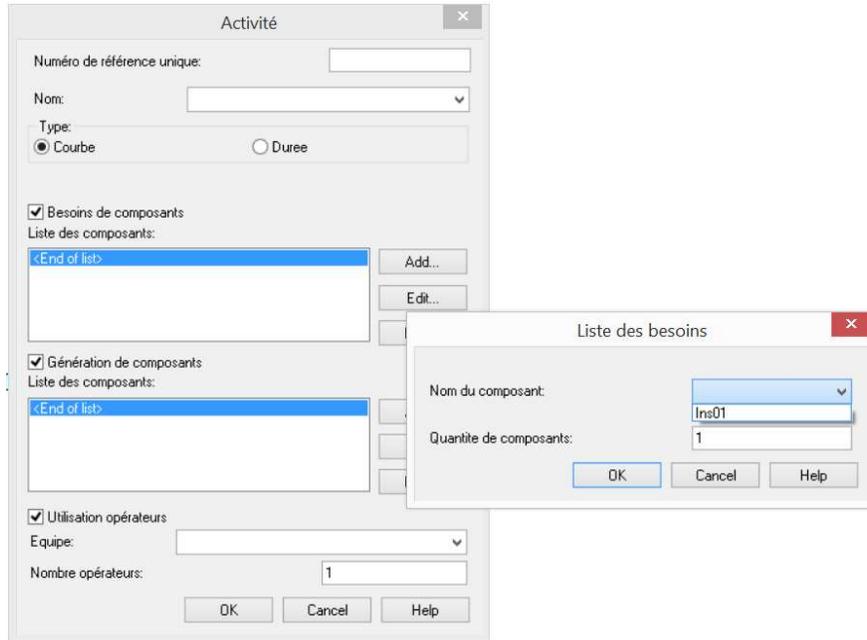


Figure 45. Interface du module 'Activité'

Le module 'Début processus' : Ce module permet de lancer les ordres de fabrication (OFs) définis dans le module 'OF' selon le processus correspondant. Nous rappelons que selon notre logique de modélisation, un processus correspond à un OF. Nous indiquons donc dans ce module le nom de processus qui doit être le même que renseigné dans les détails de l'OF.

Le module 'Fin processus' : Ce module permet simplement d'indiquer la fin du processus suite à la dernière activité. A ce moment, nous pouvons récupérer les données liées à l'OF, notamment sa date de fin, sa consommation énergétique, etc.

Le module 'Divergence' : Ce module permet de lancer deux séquences se déroulant en parallèle.

Le module 'Convergence' : Ce module permet de synchroniser deux séquences se déroulant en parallèle. Le processus ne pourra se poursuivre que si les deux séquences sont terminées.

Le module 'Décision' : Ce module a été ajouté dans la version V1 pour faire intervenir des décisions pour plus de généralisation des processus. Il permet de permettre d'orienter le processus vers deux séquences différentes.

4.1.4. LES MODULES DE CONSOMMATION D'ENERGIE

Le module 'Courbe' : Ce module a été conçu pour la gestion de la consommation d'énergie. Il est donc central dans notre bibliothèque. Il a été développé dans l'optique de représenter la consommation énergétique d'un système de production aussi bien que l'évolution de sa puissance dans le temps.

Il permet d'introduire la liste des 'Energy Blocks' avec les puissances et les durées correspondantes (Figure 46). Celles-ci peuvent être des valeurs déterministes, stochastiques ou encore des valeurs variables selon des paramètres comme défini précédemment dans le module 'OF'.

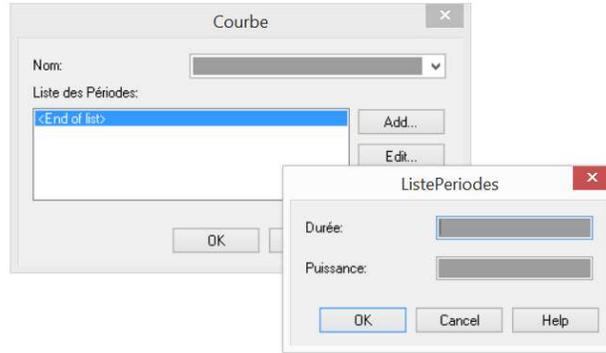


Figure 46. Interface de l'objet 'Courbe'

Tous les calculs des puissances et des énergies consommées par les modules ressources sont traités dans cet objet. Les résultats concernant la puissance totale et par conséquent l'énergie consommée sont mis à jour à chaque fin de bloc. Toute la complexité réside dans le fait que ce module doit être capable de traiter tous les types possibles des courbes de puissance (les courbes événementielles, les courbes répétitives, etc.) ainsi que la gestion de leurs lancements et arrêts. De plus, nous avons intégré dans ce module le calcul de l'énergie consommée ainsi que de l'énergie consommée en sur-limite (dépassement) afin de pouvoir calculer un coût total de consommation énergétique tel qu'il est défini dans l'équation (1).

$$C_{Total} = C_{Consommation} + C_{dépassement} \quad (1)$$

$$C_{Consommation} = \sum E_i * C_i$$

$$C_{dépassement} = \sum P_d * D_d * C_d$$

Avec :

C_{Total} le coût total de consommation

$C_{Consommation}$ le coût de consommation en dessous de seuil de puissance

$C_{dépassement}$ le coût de consommation en dessus de seuil de puissance

E_i l'énergie consommée dans une période horaire i

C_i le coût associé à la période i

P_d la puissance de dépassement

D_d la durée de dépassement

C_d le coût de dépassement

Le coût énergétique ne dépend pas seulement de la quantité d'énergie consommée mais aussi de la période de la journée et de la puissance absorbée en dessus d'un seuil défini dans le contrat fourni par fournisseur d'énergie. Le coût total est donc la somme du coût de consommation normale (en dessous du seuil) et le coût des dépassements. Le coût de la consommation normale peut être calculé en multipliant l'énergie consommée dans chaque période horaire par le coût qui lui correspond. En revanche, le coût de dépassement n'est que la somme du produit de la puissance dépassée par la période de dépassement par le coût de dépassement.

Ce calcul de coût permet d'évaluer la perte économique engendrée par les pics de puissance et de quantifier le gain en cas de meilleure organisation en testant des plannings de production différents dans le but de trouver celui qui permet à la fois de respecter le seuil de puissance et les délais de production.

Le module 'Affichage' : Ce module permet de tracer et de visualiser l'évolution de la puissance totale appelée par l'ensemble des ressources composant le système au cours de la période simulée (Figure 47). Ceci permet de mieux comprendre le comportement énergétique du système au cours du temps et de faire le lien entre les activités et la consommation d'énergie qui en résulte. La visualisation de l'évolution de la consommation permet aussi d'identifier les pertes énergétiques, notamment dans les périodes d'inactivité.

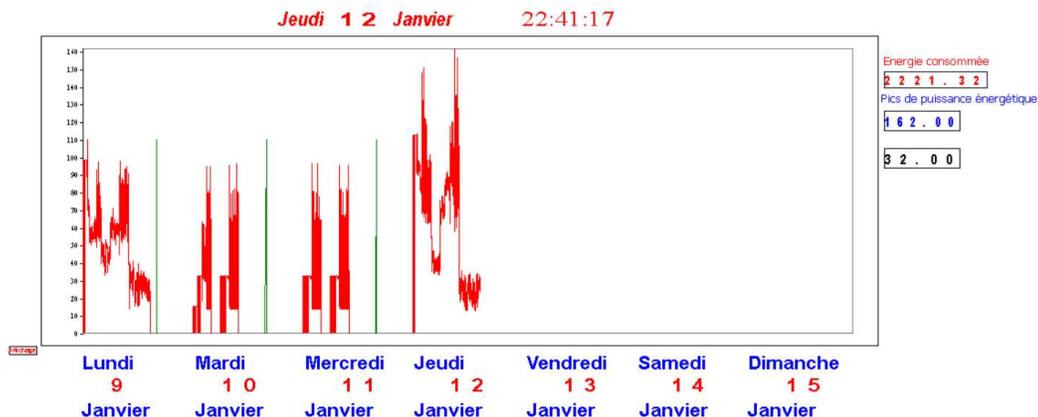


Figure 47. Le module « Affichage »

4.2. EXEMPLE DE COMMUNICATION ENTRE OBJETS

Nous souhaitons dans cette section donner quelques exemples de communication entre les objets de la bibliothèque en réponse à un ordre de production. Nous présentons donc quelques diagrammes de séquences, qui sont les diagrammes UML les plus utilisés pour spécifier les interactions entre les différentes parties d'un système. Ces diagrammes permettent de montrer l'ordre des échanges des messages entre les objets dans un ordre chronologique. Comme ces diagrammes deviennent vite complexes et imposants en taille, nous avons essayé de les présenter d'une manière simplifiée en montrant les interactions les plus importantes dans le cas

Nous présentons dans la Figure 49 la suite de la collaboration des objets pour la production des N pièces tout en mettant en avant l'aspect énergie. Dans cette partie de diagramme, nous observons que l'objet 'Activité' qui est instancié à une 'Activité de production' envoie un ordre de production de N pièces à la 'Presse à injecter'. Cet ordre est exécuté par la machine si et seulement si toutes les conditions pour l'autorisation de production sont atteintes, c'est-à-dire la machine est prête à produire (moule et unité d'injection préchauffés) et on est bien dans une plage d'ouverture dans le calendrier. Dans le cas d'arrivée d'un ordre d'arrêt du calendrier, la machine doit envoyer à son tour un ordre d'arrêt à la courbe pour arrêter la courbe d'injection et les courbe de maintien de l'unité d'injection et du moule.

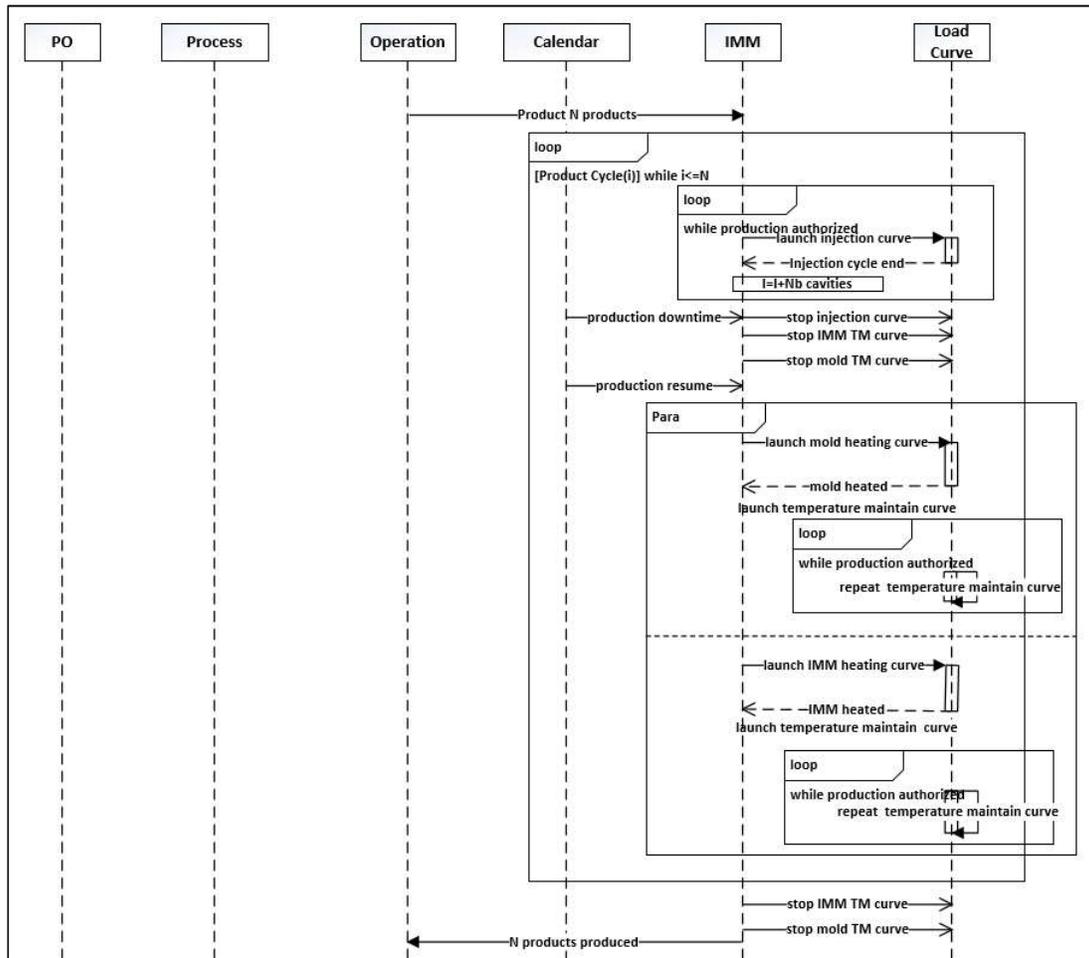


Figure 49. Exemple de collaboration : Séquence de production avec arrêt systématique du maintien

Une fois un message de reprise reçu du calendrier, la machine doit reprendre le préchauffage et relancer les maintiens pour pouvoir autoriser de nouveau la production et retourner à la boucle de production de pièces jusqu'à atteindre la quantité souhaitée.

Nous montrons dans la Figure 50 la différence de la réponse du système lorsque la règle de gestion de l'énergie est plutôt 'Marche systématique'. Dans ce cas, suite à l'arrivée d'un ordre d'arrêt du 'Calendrier', la seule courbe à arrêter est la courbe de production, le moule et l'unité d'injection restant en maintien. Dans ce cas, aucune activité de préchauffage n'est demandée pour pouvoir reprendre l'activité de production. Celle-ci est reprise dès l'arrivée d'un ordre de marche du 'Calendrier'.

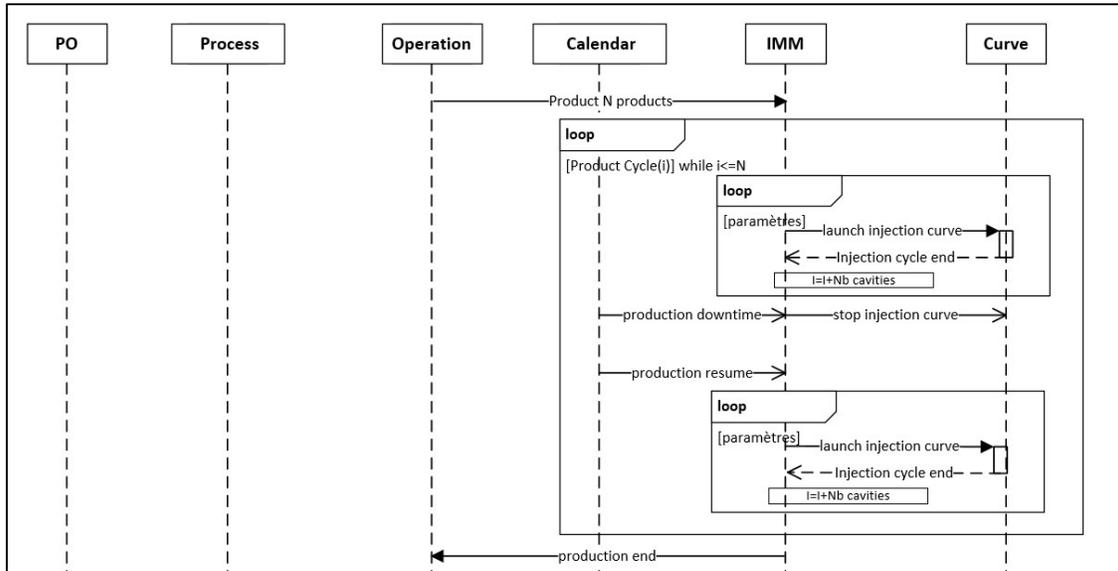


Figure 50. Exemple de collaboration : Séquence de production avec marche systématique du maintien

A la fin de l'activité de la production, le moule est démonté et un message de fin est retourné pour indiquer la fin de tout le processus comme indiqué dans la Figure 51. Ce dernier déclenche l'écriture des résultats dans l'objet 'OF'. Ces résultats traitent de la production (date de fin OF, taux d'occupation machines, temps d'attente, etc.) et de la consommation énergétique (consommation totale de l'OF, consommation par machine, etc.)

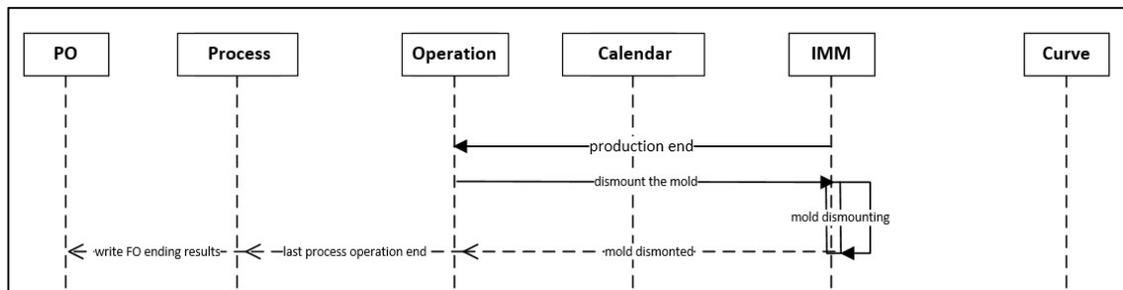


Figure 51. Exemple de collaboration : Séquence de fin de production

5. CREATION DE MODELES A PARTIR DE LA BIBLIOTHEQUE

Nous décrivons à travers cette dernière section comment mener un projet ERDES à partir de la bibliothèque d'objets. Pour ce faire, nous avons défini un exemple d'un système simple qui constitue une partie de l'étude de cas qui est décrite plus en détails dans le chapitre 5 section 2.1.2.

5.1. DEFINITION DE L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION

L'étude concerne un atelier d'injection d'élastomères. Il comporte trois presses à injecter Pi1, Pi2 et Pi3. Ces presses permettent de desservir cinq moules. Le Tableau 4 récapitule les données techniques de la production. On définit notamment, pour chacun des produits, le couple presse/moule utilisé, la présence éventuelle d'inserts, le mélange utilisé et la quantité de mélange utilisée lors d'une injection. A chaque cycle, le nombre de produits fabriqués correspond au nombre de produit par grappe.

Tableau 4. Données de production

Moule	Produit	Nb prod/ grappe	Moulée/grappe	Presse	Inserts/ produit	Mélange
Mo1	Pr01	5	0.2 Kg	Pi1 ou Pi3	2 Ins01	Mel01
Mo2	Pr02	10	0.2 Kg	Pi1		Mel02
Mo3	Pr03	10	0.15 Kg	Pi2 ou Pi3	1 Ins01 et 1 Ins02	Mel03
Mo4	Pr04	8	0.4 Kg	Pi2		Mel03
Mo5	Pr05	2	0.2 Kg	Pi3	2 Ins03	Mel04

Le Tableau 5 indique les durées des différentes activités à modéliser.

Tableau 5. Durées des différentes activités

Couple	Durée préchauffage Presse	Durée préchauffage moule	Durée cycle injection	Durée montage moule	Durée démontage moule
Mo1 + Pr01	2 h	2h	6mn	1h	1h
Mo1 + Pr03	2h 30mn	2h 30mn	5mn	1h	1h
Mo2 + Pr01	2 h	1h 30mn	4mn	2h	1h 30mn
Mo3 + Pr02	1h 30mn	2h	8mn	1h	1h
Mo3 + Pr03	2h 30mn	3h	8mn	1h	1h
Mo4 + Pr02	1h 30mn	2h	5mn	2h	1h 30mn
Mo5 + Pr03	2h 30mn	3h	2mn	1h	1h

Les opérations de montage et démontage moule nécessitent deux opérateurs de maintenance. Les opérations de production nécessitent trois opérateurs de production.

Suivant la démarche ERDES décrite dans le chapitre précédent, la construction d'un modèle commence par bien définir les ressources matérielles et humaines nécessaires pour réaliser les ordres de fabrication à simuler. Nous décrivons ainsi les 3 presses à injecter et les 5 moules associés que nous paramétrons avec les données de production présentées ci-dessus.

Nous décrivons également les 12 produits (5 produits fabriqués, 3 inserts utilisés et 4 mélanges possibles). Nous prévoyons des stocks initiaux de mélanges et d'inserts suffisants pour couvrir toute la production.

Enfin, concernant les ressources humaines nécessaires aux activités de production et de montage/démontage des moules, nous décrivons deux équipes production et maintenance et nous mettons dans chaque équipe le nombre d'opérateurs requis.

5.2. DEFINITION DES PROCESSUS DE FABRICATION

Cette deuxième étape consiste à décrire tous les processus de fabrication qui pourront être lancés par l'objet OF. Nous nous limitons ici à la description du processus de la presse Pi1. La Figure 52 correspond directement au modèle de simulation réalisé avec notre bibliothèque.

L'objet (1) permet d'indiquer le nom du processus qui sera appelé dans l'objet OF. Après avoir réservé la presse (2), nous comparons le moule actuellement monté sur la presse avec celui qui est nécessaire pour l'OF en cours (3). S'ils sont différents, l'activité (4) décrivant le montage du nouveau moule est lancée, puis nous lançons en parallèle (5) les activités de préchauffage du moule (6) et de la presse (7). Ces deux activités étant terminées (8), nous pouvons passer à l'activité de production (9). Nous comparons ensuite le moule actuellement monté sur la presse avec celui du prochain OF prévu sur la machine (10). S'il y a différence, nous précéons au démontage du moule (11) puis nous libérons la presse (12). S'il y a égalité, nous libérons la presse sans démonter le moule. L'objet (13) indique la fin du processus.

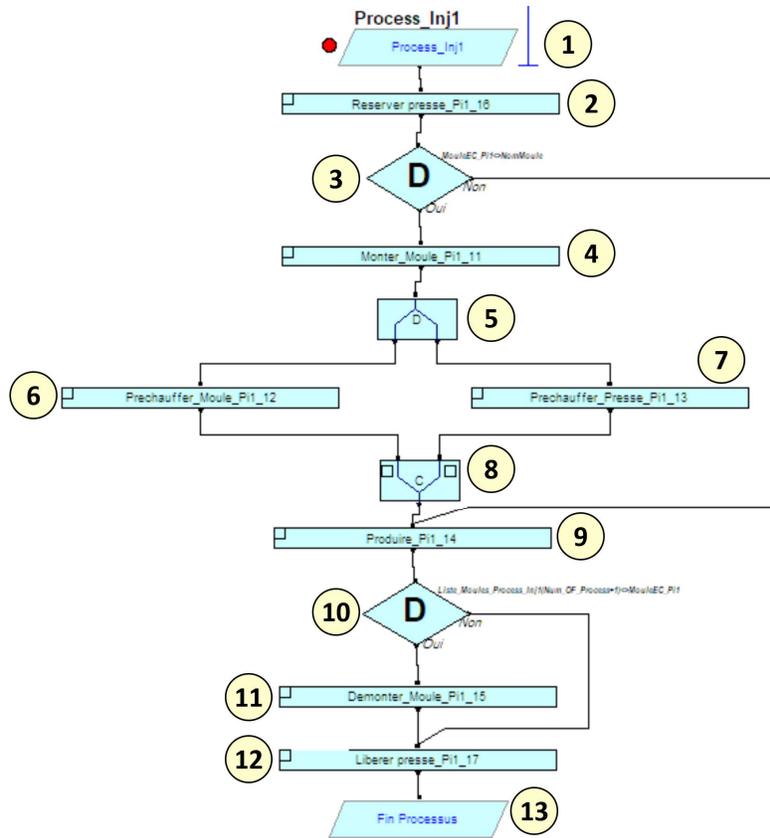


Figure 52. Processus d'injection sur Pi1

5.3. ORGANISATION DE LA PRODUCTION

La production est organisée en 1X8. Pour décrire ce fonctionnement, nous utilisons l'objet calendrier qui permet d'importer un fichier texte permettant de décrire les horaires d'ouverture de l'atelier (Figure 53).

21	0	
28800	0	
14400	1	} Lundi
7200	0	
14400	1	
50400	0	} Mardi
14400	1	
7200	0	
14400	1	} Mercredi
7200	0	
14400	1	
50400	0	} Jeudi
14400	1	
7199	0	
14400	1	} Vendredi
50400	0	
14400	1	
7199	0	
14400	1	
194400	0	} Arrêt du Week-end

Période	Etat
0h -> 8h	Arrêt
8h -> 12h	Marche
12h -> 14h	Arrêt
14h -> 18h	Marche
18h -> 24h	Arrêt

Figure 53. Calendrier de fonctionnement de l’atelier

La stratégie d’arrêt et de mise en veille des machines est indiquée pour chacune des ressources placées dans le modèle. L’utilisateur peut choisir entre les trois stratégies décrites dans la section 4.1.1 (Figure 54).

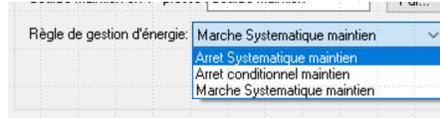


Figure 54. Stratégies de gestion d’énergie dans les périodes d’inactivité

Enfin, pour décrire comment la production sera organisée en termes de lancement des OFs, nous décrivons tous les OFs à simuler dans un fichier Excel (Figure 55) que nous importons dans le modèle à l’aide de l’objet ‘OF’. Dans le présent cas d’étude, 25 OFs seront lancés pour produire 5 produits différents.

No OF	Ref produit	Début	Processus lancé	JeuxP	Quantité	Mélange	Moule	Moulée (Kg)	Fin prévue
1	Pr02	26/6/17 8:00	Process_Inj1		4	400 Mel02	Mo2	0.2	
2	Pr03	26/6/17 8:00	Process_Inj2		5	400 Mel03	Mo3	0.15	
3	Pr01	26/6/17 9:00	Process_Inj3		7	600 Mel01	Mo1	0.2	
4	Pr02	26/6/17 14:40	Process_Inj1		4	400 Mel02	Mo2	0.2	
5	Pr02	26/6/17 14:40	Process_Inj1		4	400 Mel02	Mo2	0.2	
6	Pr04	27/6/17 9:00	Process_Inj2		6	800 Mel03	Mo4	0.4	
7	Pr01	27/6/17 14:40	Process_Inj1		3	600 Mel01	Mo1	0.2	
8	Pr03	27/6/17 14:40	Process_Inj3		8	400 Mel03	Mo3	0.15	
9	Pr04	28/6/17 8:00	Process_Inj2		6	800 Mel03	Mo4	0.4	
10	Pr05	28/6/17 14:00	Process_Inj3		9	400 Mel04	Mo5	0.2	
11	Pr01	29/6/17 8:00	Process_Inj1		3	600 Mel01	Mo1	0.2	
12	Pr03	29/6/17 11:00	Process_Inj2		5	400 Mel03	Mo3	0.15	
13	Pr05	29/6/17 15:00	Process_Inj3		9	400 Mel04	Mo5	0.2	
14	Pr03	30/6/17 8:00	Process_Inj2		5	400 Mel03	Mo3	0.15	
15	Pr05	30/6/17 10:20	Process_Inj3		9	400 Mel04	Mo5	0.2	
16	Pr02	30/6/17 10:40	Process_Inj1		4	400 Mel02	Mo2	0.2	
17	Pr04	30/6/17 15:20	Process_Inj2		6	800 Mel03	Mo4	0.4	
18	Pr02	3/7/17 8:00	Process_Inj1		4	400 Mel02	Mo2	0.2	
19	Pr01	3/7/17 9:40	Process_Inj3		7	600 Mel01	Mo1	0.2	
20	Pr03	4/7/17 8:00	Process_Inj2		8	400 Mel03	Mo3	0.15	
21	Pr01	4/7/17 9:20	Process_Inj3		7	600 Mel01	Mo1	0.2	
22	Pr04	5/7/17 8:00	Process_Inj2		6	800 Mel03	Mo4	0.4	
23	Pr05	5/7/17 11:00	Process_Inj3		9	400 Mel04	Mo5	0.2	
24	Pr04	6/7/17 8:00	Process_Inj2		6	800 Mel03	Mo4	0.4	
25	Pr05	6/7/17 9:20	Process_Inj3		9	400 Mel04	Mo5	0.2	

Figure 55. Liste des OFs à simuler

5.4. MODELISATION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE

C’est à cette étape qu’est indiqué le profil de consommation énergétique de chacune des activités réalisées lors de la simulation. Parmi les moyens de détermination possibles des profils énergétiques, nous nous sommes servi pour cet exemple des résultats de campagne de mesure (plus de détails sur la campagne sont donnés dans le chapitre suivant). Les données ont de plus été validées a posteriori par les industriels partenaires du projet.

L'ensemble des données de notre étude est récapitulé dans le Tableau 6. Nous pouvons remarquer qu'il n'y a que trois profils dans notre exemple. Le profil correspondant à l'activité de préchauffage, qui ne comporte qu'un seul 'Energy Block', le profil correspondant à l'activité de de maintien qui comporte deux 'Energy Blocks' et le profil des opérations d'injection qui comporte cinq 'Energy Blocks'. Nous avons donc défini trois courbes paramétrés. Notons que les durées des courbes de maintien sont aléatoires et modélisées par des lois de répartition uniformes. Cela a conduit à 26 paramètres pour chacun des jeux de paramètres. Les différents couples presse/moule nous ont amené à décrire 7 jeux de paramètres correspondant aux 7 couples presse/moule possibles, ce qui induit un nombre total de paramètres à insérer dans le modèle de 182.

Tableau 6. Données de consommation énergétique

	Bloc 1		Bloc 2		Bloc3		Bloc 4		Bloc 5	
	P1	D1	P2	D2	P3	D3	P4	D4	P5	D5
Injection										
Pr1										
Courbe de préchauffage presse	1.6	7200								
Courbe maintien en T° presse	1.6	unif(15,40)	0	unif(30,65)						
Courbe de préchauffage moule M01	14	7200								
Courbe de maintien en T° moule M01	14	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M01	Unif(28,34)		3	16	32	14	20	17	120	14
Courbe de préchauffage moule M02	12	5400								
Courbe de maintien en T° moule M02	12	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M02	Unif(25,30)		2	15	17	14	20	18	81	14
Pr2										
Courbe de préchauffage presse	1.2	5400								
Courbe maintien en T° presse	1.2	unif(15,40)	0	unif(30,65)						
Courbe de préchauffage moule M03	16	7200								
Courbe de maintien en T° moule M03	16	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M03	Unif(30,35)		3	18	40	16	35	19	150	0
Courbe de préchauffage moule M04	14	7200								
Courbe de maintien en T° moule M04	14	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M04	Unif(25,30)		2	16	18	14	25	16	120	0
Pr3										
Courbe de préchauffage presse	1.5	9000								
Courbe maintien en T° presse	1.5	unif(15,40)	0	unif(30,65)						
Courbe de préchauffage moule M01	20	9000								
Courbe de maintien en T° moule M01	20	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M01	Unif(15,20)		2	15	18	13	25	15	120	13
Courbe de préchauffage moule M03	18	10800								
Courbe de maintien en T° moule M03	18	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M03	Unif(18,23)		3	16	40	14	35	17	150	14
Courbe de préchauffage moule M05	14	10800								
Courbe de maintien en T° moule M05	14	unif(25,30)	0	unif(35,45)						
Courbe d'injection M05	Unif(20,25)		2	16	10	12	10	17	30	12

5.5. SIMULATION ET ANALYSE DES RESULTATS

Après avoir construit le modèle complet (Figure 56) suivant les étapes décrites ci-dessus, nous pouvons lancer la simulation, analyser les résultats et évaluer les indicateurs de performance afin de prendre des décisions et définir les potentiels d'amélioration de la performance du système.

Classiquement, les indicateurs de performance (IdP) d'un système sont basés sur la productivité de celui-ci (taux d'occupation machines, délais de fabrication, etc.). Cependant, pour évaluer la

performance globale du système y compris sa performance énergétique, ces IdPs sont insuffisants. Il est nécessaire de créer des IdPs clés liés à l'énergie. En outre, les IdPs couramment utilisés sont calculés à partir de mesures globales de la consommation d'énergie (par exemple consommation/mois ou consommation par produit). Cette approche ne tient pas compte des relations de cause à effet entre les activités de production, la disponibilité des ressources et la consommation d'énergie. Par conséquent, une analyse détaillée des consommations est nécessaire. Dans cet objectif, nous proposons dans l'outil un ensemble de statistiques permettant de calculer des IdPs liés à l'énergie qui permettent l'interprétation des relations cause-effet entre la consommation énergétique et les activités de production ainsi que leur organisation et donc soutenir les entreprises dans le processus décisionnel.

Nous décrivons dans le Tableau 7 ces résultats et l'objectif de leurs utilisations.

Un exemple d'expérimentation et d'analyse de résultats sera détaillé dans le chapitre 5 montrant quelques utilisations de ces IdPs.

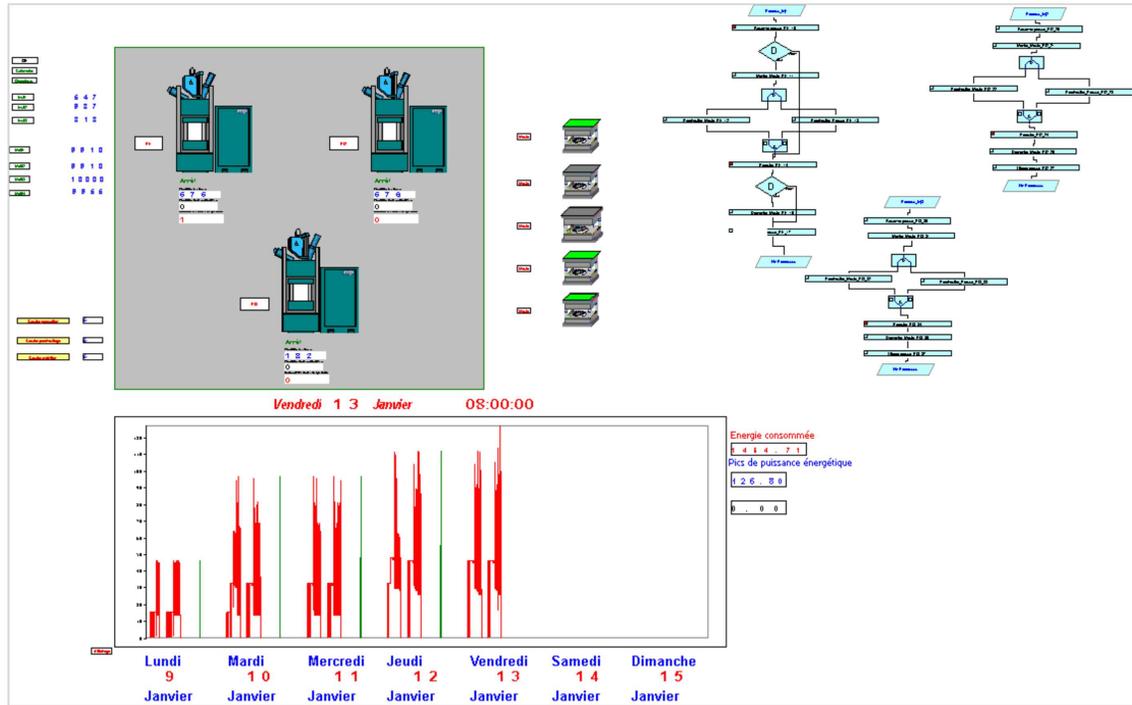


Figure 56. Modèle complet de l'atelier d'injection

Tableau 7. Statistiques énergétiques et de production

Résultats liés à la consommation énergétique	
Statistique	Objectif
Consommation totale (kWh)	Evaluer l'efficacité énergétique globale du système de production
Consommation par OF (kWh)	Estimer l'énergie consommée par une unité de produit en divisant ce résultat par le nombre de produit par OF, ceci permet de contribuer à des approches ACV et à définir des écolabels pour les produits. Estimer le coût énergétique par produit
Consommation par machine (kWh)	Identification des plus grands consommateurs Comparer les consommations des différentes machines afin d'analyser l'influence de la technologie par exemple.
Consommation par activité ou état de la machine (kWh)	Evaluer la répartition de la consommation énergétique selon les différentes activités. Estimer l'énergie consommée dans des activités à NVA et par conséquent identifier les pertes d'énergie et proposer des mesures pour les atténuer notamment en agissant sur l'organisation de la production.
Suivi de puissance totale (kW)	Détecter les pics de puissance afin de pouvoir réagir sur les plannings de production et les minimiser.
Energie totale en sur-limite (kWh)	Calculer l'énergie consommée au-dessus du seuil de puissance afin de pouvoir comparer différents ordonnancements et définir la meilleure solution qui minimise cette valeur.
Résultats liés à la production	
Date de fin des OFs	Evaluer les solutions de planification de la production sous des contraintes énergétiques en termes de productivité et de respect des dates de livraison
Les temps d'attentes (opérateur, stocks, etc.)	Analyser la relation entre la consommation énergétique à NVA et les attentes provoquées par des ruptures de stocks, absence opérateur, etc.
Taux d'occupation des ressources	Evaluer les taux d'occupation des ressources afin de mieux les dimensionner et éviter les attentes ressource.
Suivi des stocks	Evaluer les règles de gestion des stocks

CONCLUSION

Nous avons pu décrire à travers ce chapitre les modules qui ont été développés pour créer l'outil ERDES en se basant sur les concepts de base définis précédemment. A partir de cet outil, un utilisateur peut construire facilement et rapidement un modèle de simulation permettant de

reproduire l'activité d'un système de production tout en tenant compte de sa consommation énergétique aussi bien dans le domaine de transformation des polymères que dans d'autres domaines de production grâce à la généralisation de la bibliothèque. Le modèle développé sera en capacité de fournir des résultats à la fois liés à la production et la consommation énergétique pour pouvoir trouver des compromis entre ces deux dernières. Plusieurs cas d'étude seront présentés dans le chapitre suivant afin de valider la capacité de notre outil à reproduire le comportement énergétique d'un système de production, évaluer sa précision et montrer les intérêts de son utilisation sur des applications industrielles.

CHAPITRE 5 :
VALIDATION ET EXPERIMENTATION
SUR DES CAS D'APPLICATION DANS
L'INDUSTRIE DES POLYMERES

INTRODUCTION

Nous proposons à travers ce dernier chapitre de valider notre outil de SED intégrant l'énergie en évaluant sa capacité à prédire la consommation énergétique d'un système de production et montrer par la suite des exemples d'utilisation de l'outil pour résoudre des problématiques énergétiques. L'étape de validation s'appuie sur la comparaison des résultats de consommation énergétique fournis par un modèle de simulation construit à l'aide de l'outil ERDES et des résultats fournis par des mesures réelles. La finalité de cette première partie de chapitre est d'évaluer le pourcentage d'erreur entre les deux résultats et par conséquent valider à la fois l'outil développé et l'approche d'intégration des données de consommation complexes par l'identification de lois de distribution stochastiques. L'étape d'expérimentation s'appuie sur un premier modèle relativement simple d'un atelier d'injection et un deuxième plus complet intégrant plusieurs ateliers dans une usine de transformation de polymères pour montrer quelques utilisations de l'outil ERDES et montrer son intérêt pour améliorer la performance énergétique d'un système de production en agissant sur son organisation.

1. VALIDATION DE LA PREDICTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE SUR UN CAS REEL

Nous souhaitons à travers cette première partie du chapitre valider la capacité de notre outil ERDES à prédire la consommation énergétique d'un système de production. Pour ce faire, nous allons comparer les résultats fournis par un modèle de simulation intégrant l'énergie construit à l'aide de la bibliothèque ERDES aux résultats réels issus d'un cas industriel. Cette étude de cas a été élaborée dans la perspective de confirmer ou nuancer l'approche proposée en évaluant le pourcentage d'erreur entre la consommation réelle et la consommation simulée.

On considérera dans ce cas que l'unité de production est constituée d'une seule machine de manière à simplifier la liaison activités-consommations ainsi que la comparaison des deux résultats. La machine étudiée est une presse à injecter hydraulique en cours de production chez le transformateur.

Cette validation a fait l'objet d'une publication dans le Journal of Cleaner Production (Kouki et al., 2017).

1.1. CONTEXTE DU CAS INDUSTRIEL

Dans le cadre du projet ECOTHER, nous avons sollicité l'entreprise SACRED, un partenaire fortement impliqué, pour faire des mesures de consommation énergétique sur des machines installées sur son site de production de Saint-Lubin-en-Joncherets.

La société SACRED, et en particulier le site de Saint-Lubin-en-Joncherets, développe ses compétences et son expertise dans le domaine des élastomères. Transformateur et équipementier automobile, SACRED est présent dans les fonctions étanchéité carrosserie, étanchéité mécanique, amortissement acoustique et transfert de fluide. Consciente des enjeux économiques et environnementaux de la consommation énergétique, la société SACRED s'est engagé dans le projet ECOTHER afin de pouvoir améliorer sa performance énergétique.

L'entreprise dispose d'un atelier de moulage par injection qui est le procédé principal utilisé sur ce site pour la fabrication des pièces en élastomère destinées au secteur automobile.

Le procédé de moulage concerné par cette étude a été déjà décrit dans le chapitre 4 section 4.1.1 et un ensemble d'objets a été développé pour le modéliser, notamment la presse à injecter et le moule.

1.2. LA DEMARCHE EXPERIMENTALE

L'expérimentation menée dans le but de la validation de l'approche proposée consistait à faire une série de mesures de la consommation électrique d'une presse à injecter élastomère en cours de production chez l'industriel et la comparer aux résultats de simulation.

Des mesures préliminaires de la consommation globale ont été relevées avec un intervalle d'échantillonnage d'une seconde afin de visualiser d'une manière fine le comportement énergétique de la machine. Le résultat est présenté Figure 57.

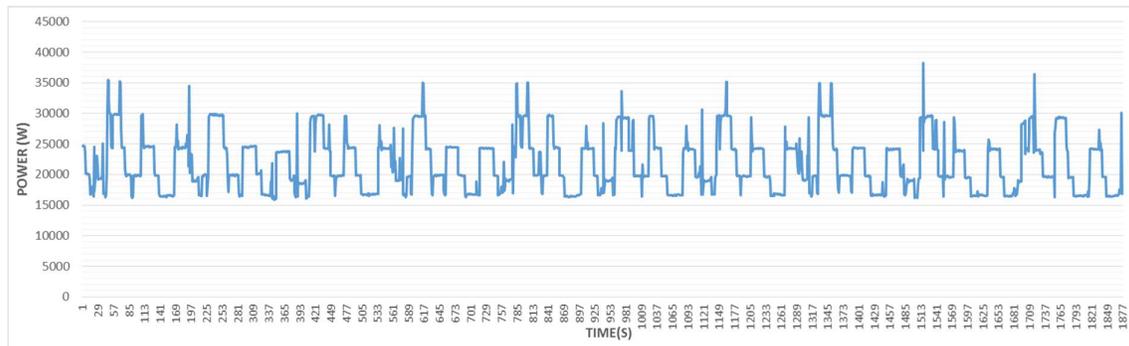


Figure 57. Evolution de la puissance électrique appelée par la machine

Comme évoqué dans le chapitre 3 section 2.2.1, il est nécessaire dans ce cas d'extraire des profils répétables qui seront instanciés à chaque fois que les activités associées se répètent au cours d'une simulation. Une solution a été donc de décomposer la machine en plusieurs équipements consommateurs.

Pour arriver à comparer les résultats de la consommation énergétique réelle et celle simulée, nous avons suivi la démarche expérimentale décrite dans la Figure 58.

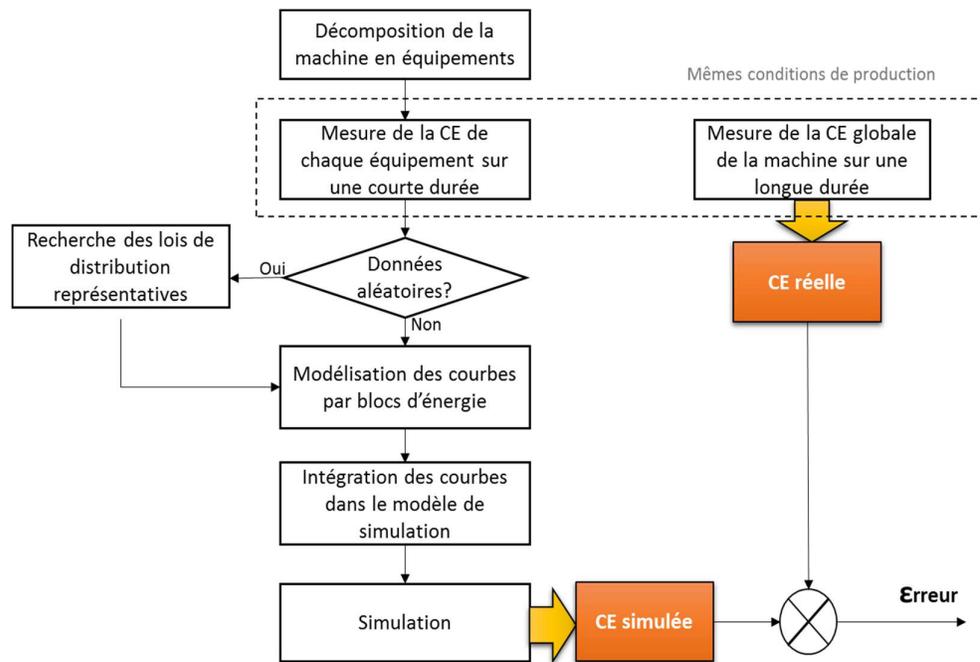


Figure 58. Démarche expérimentale pour la comparaison des consommations énergétiques réelle et simulée

1.3. PLAN DE MESURES

En étudiant de près le fonctionnement de la machine, nous avons pu la décomposer en 3 catégories d'équipements consommateurs selon le type d'énergie fournie (Tableau 8). Afin de mesurer la puissance électrique appelée par chaque équipement, nous avons identifié 8 zones sur l'armoire électrique de la machine. Pour chaque zone, nous avons mesuré le courant appelé par une seule phase à l'aide d'une pince ampèremétrique raccordée à un enregistreur autonome de type HOBO.

Nous avons au préalable vérifié que l'équilibrage des phases était correct. Nous avons ensuite calculé la puissance correspondante en utilisant la formule de calcul de la puissance électrique en triphasé définie dans l'équation 1.

$$P = \sqrt{3} * U * I * \text{Cos}\varphi \quad (1)$$

Dans tous les calculs suivants, nous supposons pour simplifier que $\text{Cos}\varphi = 1$

Tableau 8. Points de mesures

Zones	Description	Type d'énergie
1	Moteur groupe hydraulique	Energie fournie pour les mouvements
2	Chauffe plateau Fixe	Energie fournie pour le chauffage
3	Chauffe plateau mobile	
4	Moteur régulateur unité injection	
5	Chauffe pot injection	
6	Chauffe boudineuse	Energie de base
7	Automate, IHM, électrovannes (alim 24V)	
8	Eclairage, climatiseur, ventilateur (alim 230V)	

Le Tableau 9 décrit les points de mesures ainsi que les équipements de mesure qui ont été utilisés.

1.4. MESURES ET EXPLOITATION

1.4.1. LE MOTEUR GROUPE HYDRAULIQUE

Le premier équipement consommateur sur la machine est le moteur groupe hydraulique. Cet engin est le responsable de tous les mouvements de la machine (Fermeture/ouverture moule, injection, dosage,) et consomme environ 40% de sa consommation totale. Nous avons donc mesuré la puissance électrique appelée par le groupe hydraulique seul pour en tirer un profil énergétique. La Figure 59 montre l'évolution de la puissance sur 3 cycles d'injection. Nous pouvons ainsi voir une allure de puissance ou un profil énergétique répétable par cycle.

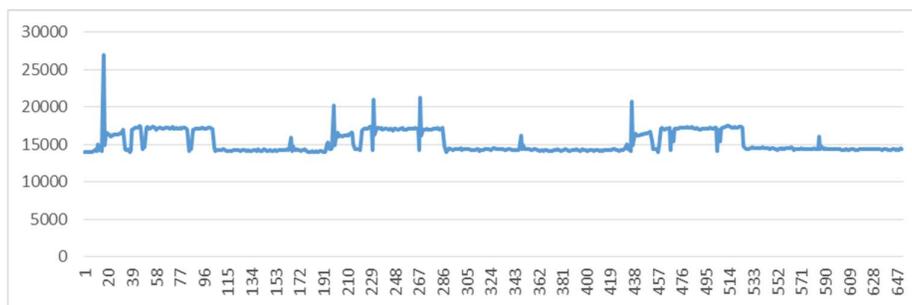
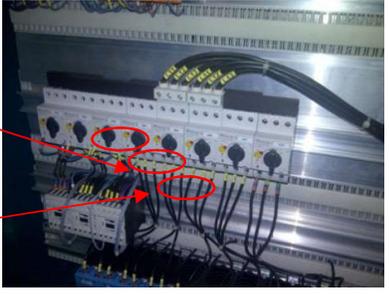


Figure 59. Evolution de la consommation électrique sur plusieurs cycles d'injection

Tableau 9. Points de mesures

N° HOBO	Pincés ampèremétriques	N° Zone	Description	Photos
1	0-50 A	1	Phase 1 Chauffe plat. Fixe ou B.C.R.	
	0-50 A	2	Phase 1 Chauffe plateau mobile	
2	0-50 A	4	Phase 1 Moteur régulateur unité injection	
	0-50 A	5	Phase 1 Chauffe pot injection	
	0-50 A	6	Phase 1 Chauffe boudineuse	
3	0-50 A	7	Phase 1 Moteur pompe à vide	
	0-50 A	8	Phase 1 Moteur circulateur B.C.R.	
4	0-200 A	9	Phase 1 Moteur groupe hydraulique	
	0-200 A	10	Phase 1 Automate, IHM, électrovannes (24V)	
	0-200 A	11	Phase 1 Eclairage, climatiseur, ventilateur (230V)	

Nous avons cherché dans un deuxième temps à décomposer le profil énergétique sur un seul cycle en blocs d'énergie défini chacun par une puissance et une durée constante ou variable (Figure 60). Les valeurs constantes correspondent généralement à des paramètres préconfigurés sur la machine et qui sont calculés au préalable afin de répondre à l'ensemble des spécifications du processus.

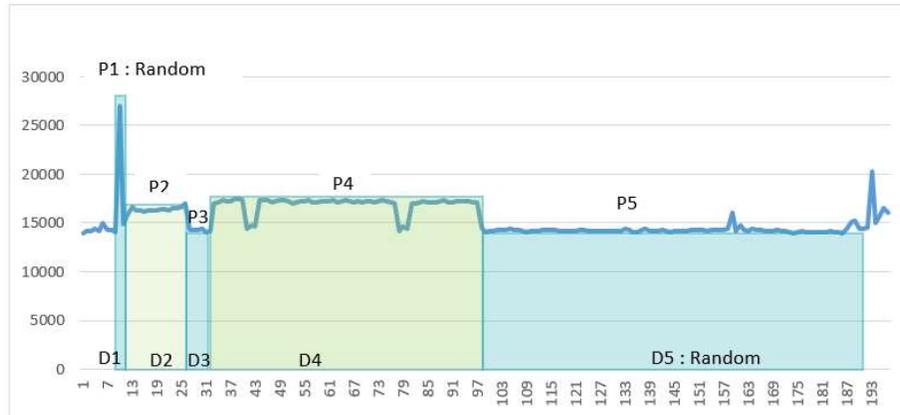


Figure 60. Décomposition en blocs d'énergie

Nous remarquons que certains blocs sont modélisés par une valeur aléatoire. La variabilité de certains paramètres d'un cycle à l'autre est à l'origine de l'emploi du stochastique dans notre modélisation.

Dans ces cas, nous avons proposé de modéliser les valeurs variables de puissance ou de durée des blocs d'énergie par des lois de distribution qui conviennent au mieux aux données issues de la courbe réelle. Pour se faire, nous avons eu recours à l'« Input Analyzer » d'Arena®. Cet analyseur, fourni comme un composant standard de l'environnement Arena®, est un outil puissant et polyvalent qui permet de générer et d'évaluer des lois de distribution à partir de données d'entrée. Les fichiers de données d'entrée traitées par l'analyseur représentent les valeurs de puissance ou les intervalles de temps associés à un processus aléatoire. L'outil analyse donc ces données d'entrée et propose toutes les lois représentatives parmi l'ensemble des distributions disponibles dans Arena®. Ces distributions sont proposées avec une évaluation de l'erreur moyenne quadratique. Pour parvenir à ces résultats, un premier traitement est nécessaire afin de filtrer les données mesurées et en tirer les données qui concernent chaque puissance ou durée aléatoire séparément. Les fichiers récupérés en sortie subissent ensuite un deuxième traitement par l'« Input Analyzer » d'Arena® afin de trouver les lois de distributions qui conviennent au mieux (Figure 61).

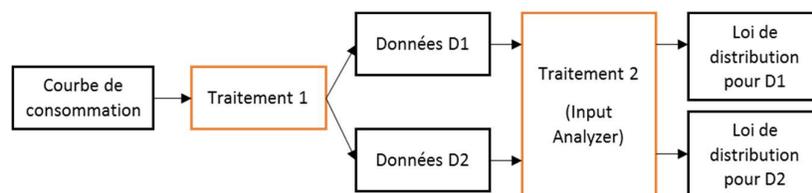


Figure 61. Processus de traitement de données pour la génération des lois de distribution

La durée D5 par exemple inclue la durée que prend l'opérateur pour éjecter les pièces du moule. Cette durée n'est pas fixe d'un cycle à l'autre puisqu'elle est impactée par l'intervention du facteur humain, d'où sa représentation par une valeur aléatoire (Tableau 10). Pendant cette durée, la puissance appelée par le moteur groupe hydraulique est aux alentours de 15 KW alors que celui-ci n'est pas sollicité.

Ce gaspillage d'énergie fait que les presses hydrauliques ne sont pas les plus économiques en consommation. En effet, il existe sur le marché 3 types basiques de machines avec des technologies différentes : la presse hydraulique, la presse hybride et la presse tout-électrique, chacune présentant des intérêts pour des utilisations spécifiques. La distinction entre ces 3 types de machine est basée sur la nature de l'alimentation des mouvements de la machine (la fermeture/ouverture moule, l'injection, la rotation de la vis, etc.). Selon la technologie de la machine, ces mouvements peuvent être entièrement gérés par une pompe hydraulique centralisée ou plusieurs, par des servomoteurs électriques ou une combinaison des deux dans le cas des machines hybrides. Pour les machines à entraînement hydraulique, qui restent les plus répandues dans les ateliers, deux inefficacités évidentes se présentent. La première réside dans le fait que la pompe hydraulique reste en marche même dans les phases où celle-ci n'est pas sollicitée et la deuxième se traduit par les pertes d'énergie dans le transfert du travail (électrique-hydraulique-mécanique). En comparant l'énergie spécifique consommée (ESC), il est prouvé que la presse tout-électrique est la plus économe avec une consommation de 1.46 MJ/Kg contre une consommation de 1.67 MJ/Kg et 3.39 MJ/Kg pour la presse hybride et hydraulique respectivement (Thiriez and Gutowski, 2006). La solution que les constructeurs ont trouvée pour éliminer ce gaspillage est d'équiper le moteur avec un variateur de vitesse. Ce dernier permet de réaliser des économies d'énergie sur la machine en adaptant les besoins réels en puissance.

Nous supposons que les petites variations de puissance ont une consommation mineure d'où le fait qu'elles soient négligées. Nous pouvons toutefois les modéliser si nous souhaitons avoir plus de précision. En effet, l'approche de modélisation choisie fournit une forte modularité et flexibilité au modèle de manière à ce que l'utilisateur puisse aller jusqu'au niveau de détail qu'il souhaite.

Le Tableau 10 résume les puissances et les durées trouvées pour chaque bloc d'énergie.

Tableau 10. Modélisation en blocs d'énergie de la consommation du groupe hydraulique

Bloc	1	2	3	4	5
Puissance	1.48e+4 + 1.33e+4 * BETA(0.406, 0.58)	16314	14324	17108	14324
Durée	1	16	6	65	90 + 109 * BETA(0.673, 2.7)

1.4.2. LES EQUIPEMENTS CHAUFFANTS

Pour les équipements chauffants thermo-régulés, la consommation électrique dépend de l'écart entre la température du système et la consigne de commande. La puissance injectée est ainsi régulée afin de maintenir cette température de commande ou température consigne. La complexité de la modélisation d'un tel système réside dans le fait que l'écart de température dépend de l'importance des déperditions thermiques et donc de la température extérieure.

Plusieurs types de régulation existent dont la plus simple et la plus économique est la régulation par action « Tout Ou Rien » qui est le type utilisé sur la machine étudiée. Cette régulation est adaptée aux systèmes ayant une grande inertie et n'ayant pas besoin d'une très grande précision comme les systèmes de chauffe. Le concept de « Tout Ou Rien » se ramène au fait que l'équipement ne peut prendre que deux états : marche ou arrêt (Figure 62). Ainsi, la courbe de consommation peut être modélisée par deux blocs d'énergie : un premier bloc présentant une puissance non nulle adaptée à la puissance appelée par les pots de chauffes lorsqu'ils sont activés, et un deuxième bloc présentant une puissance nulle lorsque ces derniers sont désactivés. Le problème reste que la durée de chaque état n'est pas constante au cours des cycles et du temps (Figure 63). L'activation et la désactivation des pots de chauffes est difficilement prévisible et dépend, comme nous l'avons mentionné précédemment, des déperditions thermiques.

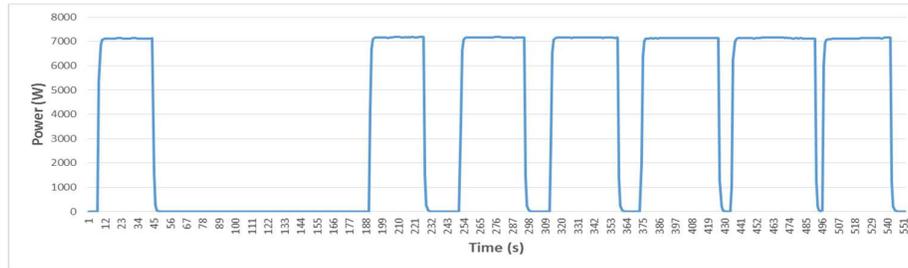


Figure 62. Mesure réelle de l'évolution de la puissance appelée par le chauffe plateau fixe

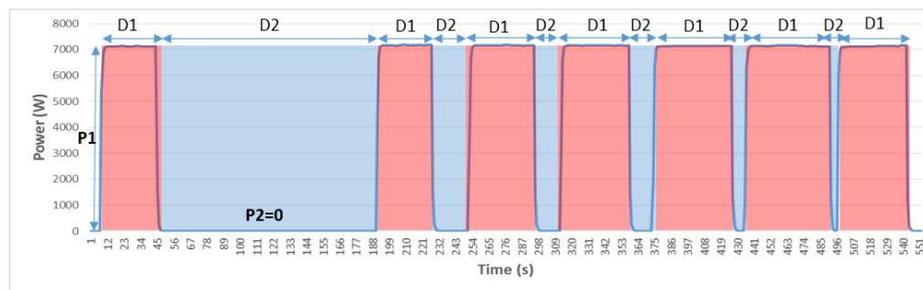


Figure 63. Modélisation par blocs d'énergie de la puissance appelée par le chauffe plateau fixe

Le Tableau 11 résume les valeurs fixes (fournies par les mesures directement) et variables (fournies par l'analyseur) représentatives de chaque bloc d'énergie pour tous les équipements chauffants, notamment le chauffe plateau fixe, le chauffe plateau mobile et le chauffe pot injection.

Nous avons noté une consommation nulle sur la boudineuse. En effet, l'énergie apportée par cisaillement était suffisante pour le réchauffement de la matière dans la zone de plastification.

Tableau 11. Modélisation en blocs d'énergie de la consommation des équipements chauffants

	Chauffe plateau fixe		Chauffe plateau mobile		Chauffe pot injection	
Bloc	1	2	1	2	1	2
Puissance	7162	0	7162	0	7162	0
Durée	POIS(43.5)	15 + WEIB(22.5, 0.457)	6 + 406 * BETA(0.55, 4.84)	3 + WEIB(26.2, 0.841)	1.5 + LOGN(1.88, 1.04)	9 + 451 * BETA(0.51, 1.03)

1.4.3. L'ENERGIE DE BASE

L'énergie de base est l'énergie consommée pendant tout le temps où la machine est allumée mais où rien ne se passe. Elle est aussi appelée talon de consommation. La puissance correspondante a une fluctuation mineure (catégorie 5 des profils énergétiques présentés dans chapitre 3 section 2.2.2). Elle est donc considérée comme constante au fil du temps (Figure 64). Cette consommation est modélisée par un seul bloc d'énergie avec une puissance correspondant à la valeur moyenne des mesures enregistrées et une durée fixée par le constructeur du modèle. Ce bloc sera associé à une activité répétitive tant que la machine est sous tension.

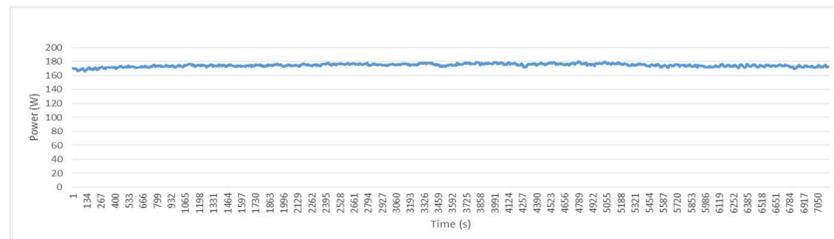


Figure 64. Profil mesuré de la consommation d'énergie de base

1.5. CREATION DE MODELE ET VALIDATION

Suivant la méthodologie proposée dans le chapitre 3 section 3, nous avons développé un modèle de simulation en utilisant notre outils ERDES. La consommation du système étant fortement

dépendante de l'activité de production, le but a été de reproduire l'activité du système sur la même période et dans les mêmes conditions de production que celles dans lesquelles les mesures réelles ont été relevées. Pour ce faire, nous avons strictement enregistré l'ensemble des événements et activités se déroulant tout au long de la campagne de mesures, ce qui nous a permis de modéliser les bonnes activités en respectant la chronologie de leur exécution à l'aide de l'objet 'Calendrier'. Ces activités permettent de décrire le processus d'un macrocycle de production composé essentiellement des phases de préchauffage, production, maintien en température et d'arrêt production (Figure 65).

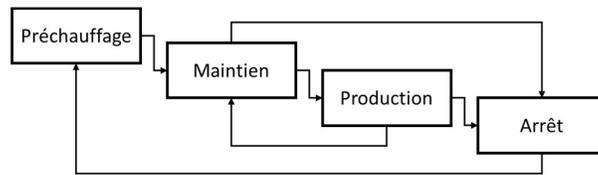


Figure 65. Les différentes phases d'un macrocycle de production

L'alternance entre ces activités dépend de l'organisation de l'entreprise. Dans la présente étude, l'atelier de production est organisé en « 3*8 » avec un arrêt les weekends et les jours fériés. La réouverture de l'atelier se fait le dimanche soir afin de relancer le préchauffage des machines pour des raisons de gain de temps et par conséquent une amélioration de la productivité. Les machines restent en maintien de température jusqu'à la reprise de la production avec la première équipe de matin. Des pauses de 30 minutes sont planifiées au milieu de chaque équipe. Ces différentes activités ont des consommations énergétiques différentes et peuvent être facilement repérées sur la courbe de consommation mesurées sur quelques jours (

Figure 66). Les courbes de consommation associées à chaque activité sont représentées par des blocs d'énergie renseignés avec les valeurs présentées précédemment.

Nous avons lancé la simulation sur un horizon de 3 jours, c'est-à-dire la même durée pendant laquelle les mesures réelles ont été réalisées. La Figure 67. Courbe de consommation énergétique simulée présente le profil de consommation énergétique obtenu en simulation. Nous pouvons voir qu'il y a une véritable ressemblance entre la courbe de mesures réelles et celle simulée. L'allure générale de la courbe ne permet qu'une validation partielle de l'approche de simulation. En effet, nous pouvons repérer sur cette courbe les événements que l'on a déjà repérés sur la courbe de consommation réelle avec les mêmes dates de déclenchement et les mêmes durées. Nous retrouvons également les mêmes niveaux de puissances appelées pendant les différentes phases.

Une deuxième information sur la consommation totale simulée est néanmoins indispensable pour la validation de l'approche proposée. Nous pouvons récupérer cette information directement en fin de simulation directement depuis les résultats de la simulation. Le

Tableau 12 présente la comparaison entre la consommation totale issue des mesures réelles et celle calculée par le simulateur. L'écart entre ces deux consommations est de l'ordre de 24.6 KWh sur une durée de simulation de 3 jours, soit 2.2%.

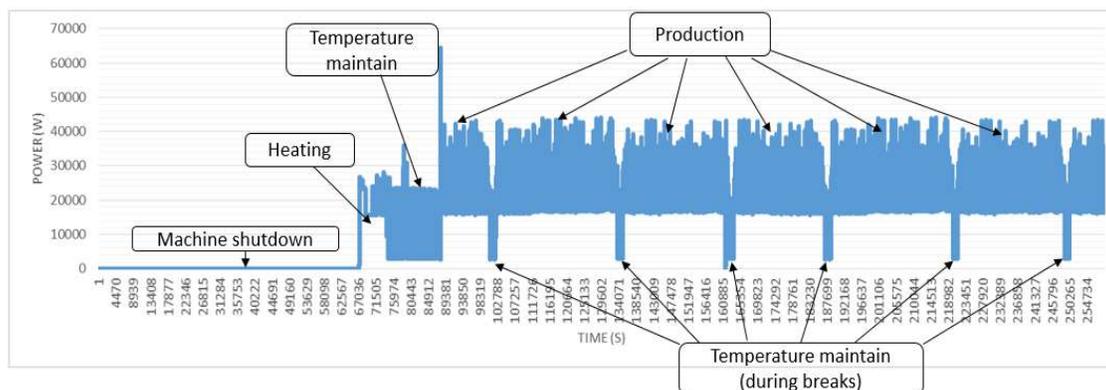


Figure 66. Repérage des différentes phases sur la courbe de consommation réelle

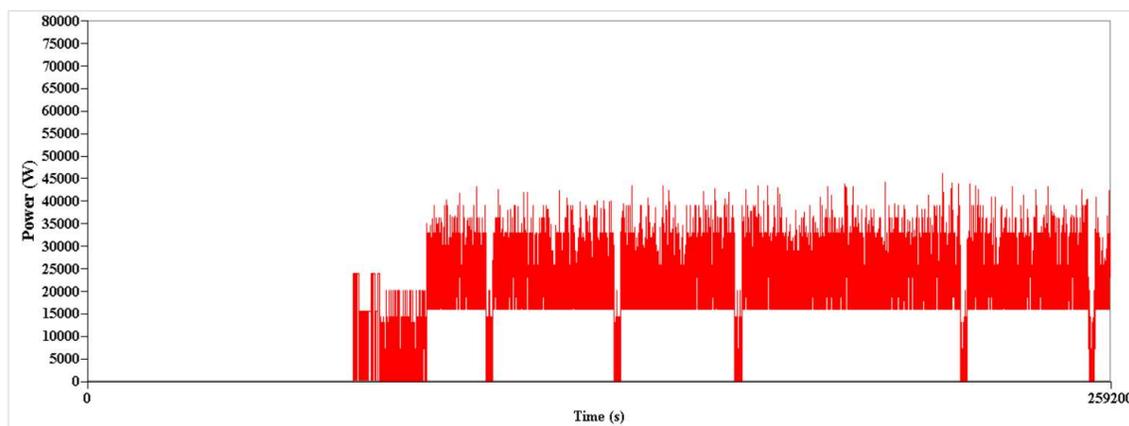


Figure 67. Courbe de consommation énergétique simulée

Tableau 12. Comparaison entre la consommation totale réelle et la consommation totale simulée

Nombre de réplifications	Résultats de simulation				Résultats réels	Erreur	
	Valeur moyenne de la CE (kWh)	DIC ⁶ (kWh)	Min (kWh)	Max (kWh)	CE (kWh)	(kWh)	(%)
500	1112.6	0.68741	1087.7	1140.2	1088	24.6	2.2

⁶ Demi Intervalle de Confiance

2. EXEMPLES D'UTILISATION DE L'OUTIL ERDES

Nous souhaitons dans cette deuxième partie du chapitre montrer quelques utilisations de notre outils ERDES en l'illustrant avec deux études de cas appliquées dans l'industrie de transformation des polymères. La première étude a pour but de montrer l'utilité de l'outil dans l'identification des pertes d'énergie dans les durées de non productivité. La deuxième a été réalisée dans le but de montrer l'utilité de l'outil pour valider un programme d'ordonnancement sous contraintes énergétiques.

2.1. PREMIERE ETUDE DE CAS : GESTION DE L'ENERGIE DANS LES PERIODES D'INACTIVITE

2.1.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Une décision ayant une influence sur la consommation énergétique concerne le choix de la stratégie d'arrêt et de mise en veille des machines durant les périodes d'inactivité.

Lors des pauses ou des arrêts de production dans l'atelier (définies par le calendrier de fonctionnement), on peut décider d'arrêter complètement la machine. Cela permet de faire des économies d'énergie mais entraîne la nécessité de préchauffer de nouveau la machine lors de la reprise. Par conséquent, on réduit la consommation mais on perd en productivité. A l'inverse on peut décider de laisser les machines en maintien de température (ceci correspond à un état de veille de manière plus générale). Cela évite la phase de préchauffage lors de la reprise mais entraîne une consommation supplémentaire d'énergie durant l'arrêt de production, cette consommation étant, comme définie précédemment, à non-valeur ajoutée. La décision d'arrêter ou pas la machine peut aussi dépendre de la durée de l'arrêt. Par exemple, on n'arrête pas la machine lors de la pose de midi, mais on l'arrête le soir ou durant les week-ends.

Le but de notre simulation est de comparer ces stratégies d'arrêt et de mise en veille des machines. Nos échanges avec les industriels du projet ECOTHER nous ont montré que ce problème n'est que rarement abordé et qu'il y a un réel intérêt « pédagogique » dans notre démarche de prévision de consommation énergétique en permettant aux acteurs de la production d'évaluer de façon précise et sûre l'incidence des choix de la stratégie.

2.1.2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Le système considéré dans cette étude de cas est celui décrit dans le chapitre 4 section 5.1. Nous rappelons qu'il est constitué principalement de 3 presses à injecter fabricant 5 produits différents. Les données de production ainsi que les données énergétiques ont été présentées précédemment.

2.1.3. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons mené des essais comparatifs des trois stratégies en faisant 20 répliques pour chacune des stratégies.

Le Tableau 13 montre les résultats de la consommation énergétique totale et détaillée (par machine, par activité, etc). Ces résultats sont fournis directement par le modèle car ils correspondent aux indicateurs de performance prévus au préalable dans les objets de la bibliothèque pour optimiser l'utilisation de l'outil et faciliter l'analyse des résultats.

A partir de ces résultats, nous observons tout d'abord une forte influence de la stratégie sur la durée de réalisation des ordres de fabrication. Cela est dû au calendrier qui est très haché par les arrêts de production. L'atelier est organisé en une seule équipe de travail de 8 heures alors que les périodes de préchauffage sont de 2h à 3h. Cela implique que, pour la stratégie « Arrêt systématique », les périodes de production effectives sont relativement courtes, conduisant à une durée de réalisation très longue (3 fois celle correspondant à la stratégie « Marche systématique »). Avec cette stratégie, il y a peu de préchauffage puisque les presses restent systématiquement en maintien de température. Les périodes d'ouverture sont donc quasiment totalement utilisées pour la production. Nous observons une consommation énergétique sensiblement identique entre ces deux stratégies mais répartie différemment (*Figure 68*). La consommation énergétique lors de l'activité de préchauffage représente 62 % de la consommation totale en « Arrêt systématique » contre 10 % en « Marche systématique ». L'énergie consommée par le maintien représente 14 % en « Arrêt systématique » contre 62 % en « Marche systématique ». Cela montre que l'économie obtenue en arrêtant les presses pendant les périodes creuses est pratiquement perdue à cause des nombreux préchauffages induits par cette stratégie.

La troisième stratégie consiste à arrêter les moyens de production si la durée d'arrêt est supérieure à 2h30. Cela conduit à arrêter les presses le soir et durant les week-ends mais à les laisser en marche durant les arrêts de midi. Elle permet de consommer moins d'énergie à NVA et par conséquent améliorer l'efficacité énergétique du système. Il est intéressant de voir que cette stratégie permet une économie d'énergie de 30% par rapport aux autres stratégies.

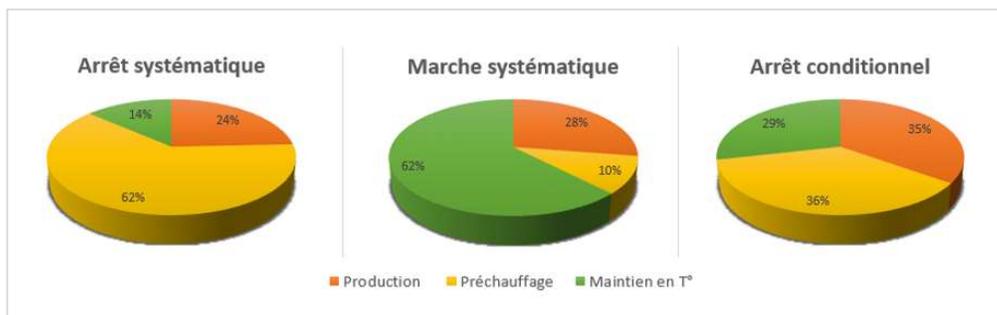


Figure 68. Répartition de la consommation énergétique dans les différentes stratégies

Tableau 13. Résultats de la consommation énergétique dans différentes stratégies d'arrêt machines

		Arrêt systématique		Marche systématique		Arrêt conditionnel	
		Moyenne	DIC à 95%	Moyenne	DIC ⁷ à 95%	Moyenne	DIC à 95%
Energie totale Consommée (kWh)		9078	50	8044	54	6324.2	45
Energie Consommée par Pi1 (kWh)	Production	574.83	--	574.83	--	574.83	--
	Préchauffage	565.2	--	73.6	--	240.8	--
	Maintien	243.03		692.76		324.78	
	Total	1383.06		1341.19		1140.41	
Energie Consommée par Pi2 (kWh)	Production	640.25	--	640.25	--	640.25	--
	Préchauffage	1554.8	--	308.15	--	823.05	--
	Maintien	450.64		2182		616.23	
	Total	2645.69		3130.4		2079.53	
Energie Consommée par Pi3 (kWh)	Production	991.77	--	991.77	--	991.77	--
	Préchauffage	3529	--	447.75	--	1243.7	--
	Maintien	530.17		2132.5		865.46	
	Total	5050.94		3572.02		3100.93	
Energie à VA (kWh)		2206.85		2206.85		2206.85	
Energie à NVA (kWh)		6872.84		5836.76		4114.02	
Energie hors limite (kWh)		136,8	2	183	3	228	4
Puissance maxi (kW)		132,5	2	127	2	128	2
Durée de réalisation (heures)		1186	10	393	5	727	8

La Figure 69 montre que notre outil permet de construire un front de Pareto entre la durée de réalisation et la consommation énergétique. Cela pourra permettre aux décideurs de trouver un compromis entre la durée de réalisation (par conséquent un gain en productivité) et la consommation énergétique.

⁷ DIC : Demi Intervalle de Confiance

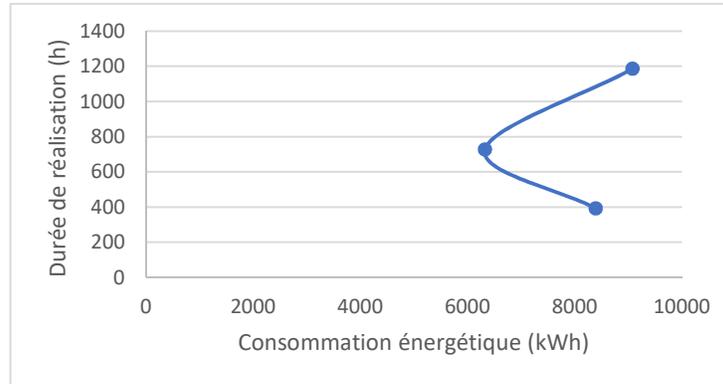


Figure 69. Relation entre la durée de réalisation et la consommation énergétique

2.2. DEUXIEME ETUDE DE CAS : COUPLAGE AVEC L'ORDONNANCEMENT

Cette étude a été élaborée en collaboration avec le laboratoire LIMOS dans le cadre du travail en commun du Lot 3 du projet ECOTHER. Nous décrivons dans cette partie l'objectif de cette étude de simulation et nous discutons les résultats obtenus.

2.2.1. OBJECTIF DE L'ETUDE

Comme évoqué dans les chapitres précédents, l'un des objectifs de la simulation intégrant l'énergie est la validation des plannings d'ordonnancement sous des contraintes énergétiques. Nous rappelons qu'une telle démarche peut être économiquement bénéfique pour les industries étant donné qu'elle permet d'éviter des surcoûts énergétiques liés au dépassement des seuils de puissance négociés avec le fournisseur d'énergie.

Le principe de ce couplage est que la solution obtenue à partir de l'outil d'ordonnancement soit ensuite évalué à l'aide de notre outil ERDES. L'algorithme d'ordonnancement repose sur une métaheuristique de type GRASPxELS. Cette métaheuristique a été initialement proposée par (Prins, 2009) en associant deux métaheuristicques : le GRASP (Feo and Resende, 1995) et l'ELS (Evolutionary Local Search) (Wolf and Merz, 2007). Le GRASP est une métaheuristique à démarrages multiples qui est divisée en deux parties. La première consiste en une construction randomisée d'une solution initiale. Comme les heuristiques de constructions ne produisent généralement pas de solutions optimales, une recherche locale est ensuite appliquée (2ème partie). Cette recherche locale vise à appliquer des perturbations sur l'ordonnancement afin d'explorer localement l'espace des solutions pour converger vers une solution de meilleure qualité. La recherche locale va converger vers un minimum local. Afin de s'extraire de ces minima locaux et explorer plus en profondeur l'espace de recherche, l'ELS est ensuite appliquée. Cette procédure consiste à générer des voisins d'une solution courante en appliquant des perturbations, chaque voisin ainsi obtenu est ensuite améliorée par la recherche locale. La meilleure solution trouvée lors de la génération des voisins est conservée et utilisée en tant que

solution courante pour la prochaine itération de l'ELS. Lorsque l'ELS est terminé, une nouvelle solution est construite par le GRASP, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Dans le cadre de ce travail de couplage entre les deux outils, des hypothèses sont faites au sein du module d'ordonnancement afin d'en améliorer les performances, principalement au niveau des temps de calculs. Le fait d'avoir deux outils, l'un orienté vers la définition d'ordonnancement respectant un seuil de puissance tout en considérant des profils de puissances représentés plus simplement, l'autre intégrant plus finement les profils de puissance ainsi que les détails de la production (par exemple prise en compte du calendrier) permet de converger vers une solution plus fiable qui bénéficie des forces et faiblesses de chacun des outils.

2.2.2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Le système de production considéré dans cette étude de cas est un système composé de 4 ateliers de production dans une usine de transformation des polymères : un atelier de fabrication de mélange, un atelier de fabrication des inserts, un atelier de moulage par injection et un atelier d'extrusion. Les ateliers sont décrits ci-dessous.

▪ L'atelier de fabrication de mélange

Cet atelier comporte trois mélangeurs : Deux mélangeurs internes Mi1 (d'une capacité de 300 kg) et Mi2 (d'une capacité de 250 kg) et un mélangeur externe Me1 (Capacité 300 kg). L'atelier de fabrication de mélanges permet de réaliser cinq mélanges avec des processus différents selon les machines sur lesquelles le mélange doit passer (*Tableau 14*). Une phase de préparation de mélange et de nettoyage sont nécessaires au début et la fin de chaque processus de mélangeage respectivement. L'atelier fonctionne en 1*8.

Tableau 14. Données de production atelier de fabrication des mélanges

Mélanges	Processus	Durée opératoire Mix	Durée opératoire Me1
Mel01	Mi1 → Me1	2h	2h
Mel02	Mi2 → Me1	1h15	1h
Mel03	Mi2	1h	--
Mel04	Mi2 → Me1	2h	2h
Mel05	Mi1 → Me1	3h	2h

▪ L'atelier de fabrication d'inserts

Cet atelier comporte trois postes de fabrication d'insert Fi1 et Fi2 et Fi3. Les postes Fi2 et Fi3 sont identiques. L'atelier permet de fabriquer trois types inserts Ins01, Ins02 et Ins03. Deux opérateurs permettent de desservir les trois machines. Cet atelier fonctionne en 1*8.

Les données de production concernant cet atelier sont décrites dans le *Tableau 15*.

Tableau 15. Données de production atelier de fabrication d'inserts

Insert	Processus	Durée opératoire Fi1	Durée opératoire Fi2 ou Fi3
Ins01	Fi1 → Fi2	12 s	10 s
Ins02	Fi1 → Fi2 ou Fi3	25 s	30 s
Ins03	Fi2 → Fi3	--	30 s

▪ **L'atelier de moulage par injection**

L'atelier de moulage par injection modélisé dans cette étude de cas est le même que celui défini dans le chapitre 4 section 5.1 et utilisé dans la section 2.1.1 de ce chapitre.

▪ **L'atelier d'extrusion**

L'atelier d'extrusion décrit dans cette étude de cas est constitué d'une seule ligne d'extrusion composée d'une extrudeuse en début de ligne, plusieurs fours permettant la vulcanisation de la matière et plusieurs autres machines. L'extrudeuse comporte 3 têtes d'extrusion pour permettre une extrusion multi-matières. La ligne permet de fabriquer deux produits Ext01 et Ext02. Un vidage de ligne est prévu à chaque changement de série et à chaque interruption de la production. Le Tableau 16 indique les machines composant la ligne d'extrusion ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau 16. Composition et caractéristiques de la ligne d'extrusion

Type	Désignation	Longueur en m
Four	IR Choc	60
Four	Four UHF	510
Four	Four TAC1	1000
Autre	Chenillette01	100
Virage	Virage01	200
Four	PLASMA2	60
Autre	Cabine Colle	310
Autre	Cabine Floc	440
Four	TAC3	1380
Autre	Chenillette02	100
Virage	Virage01	200
Autre	Marquage	110
Autre	Chenillette03	120
Autre	PostFormeur	160
Autre	Treuil	350
Découpe	Decoupe01	200

2.2.3. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons modélisé l'ensemble de cette étude de cas (Figure 70). En termes de données, nous avons dû générer :

- Pour l'extrusion : 2 jeux de 25 paramètres
- Pour l'injection : 7 jeux de 26 paramètres
- Pour le mélangeage : 5 jeux de 12 paramètres

Cela montre que les données du modèle, pour un cas d'étude relativement simple par rapport à une installation industrielle réelle, représentent près de 300 paramètres, ce qui est relativement important. C'est un problème général de la simulation. Nous avons, grâce à l'outil développé dans cette thèse, simplifié la construction du modèle décrivant l'atelier mais la saisie de l'ensemble des données caractérisant ce modèle reste relativement longue et complexe.

A partir du modèle complet des 3 ateliers (Figure 70), nous avons lancé une simulation sur le système en intégrant la liste des OFs fournie par l'outil de l'ordonnancement afin de valider celui-ci ou le rejeter en vérifiant si l'ordre du lancement des OFs proposé permet de minimiser les pics de puissance et par conséquent minimiser la consommation d'énergie sur limite (l'énergie consommée au-dessus de seuil de puissance). Nous avons lancé d'autres simulations avec des listes d'OFs que nous avons générées dans un ordre aléatoire afin de comparer les solutions fournies par l'outil d'ordonnancement avec ces plannings aléatoires. Les simulations ont été relancées pour les différentes stratégies d'arrêt machines étant donné que l'outil d'ordonnancement ne prend pas en considération cette donnée.

Les résultats mis en avant dans cette étude sont :

- L'énergie totale consommée ;
- L'énergie totale en sur limite ;
- La puissance maximale.

Le Tableau 17 montre les résultats obtenus pour les différents plannings de production pour chaque stratégie de gestion des arrêts. Le planning P1 correspond à celui donné par l'outil d'ordonnancement. Les plannings P2, P3, P4, et P5, correspondent aux mêmes OF mais lancés dans un ordre aléatoire.

Nous pouvons remarquer à partir de ces résultats que le planning de production P1 qui est fourni par l'outil d'ordonnancement est celui qui minimise la consommation énergétique en sur limite et par conséquent minimise les coûts supplémentaires qui en résultent.

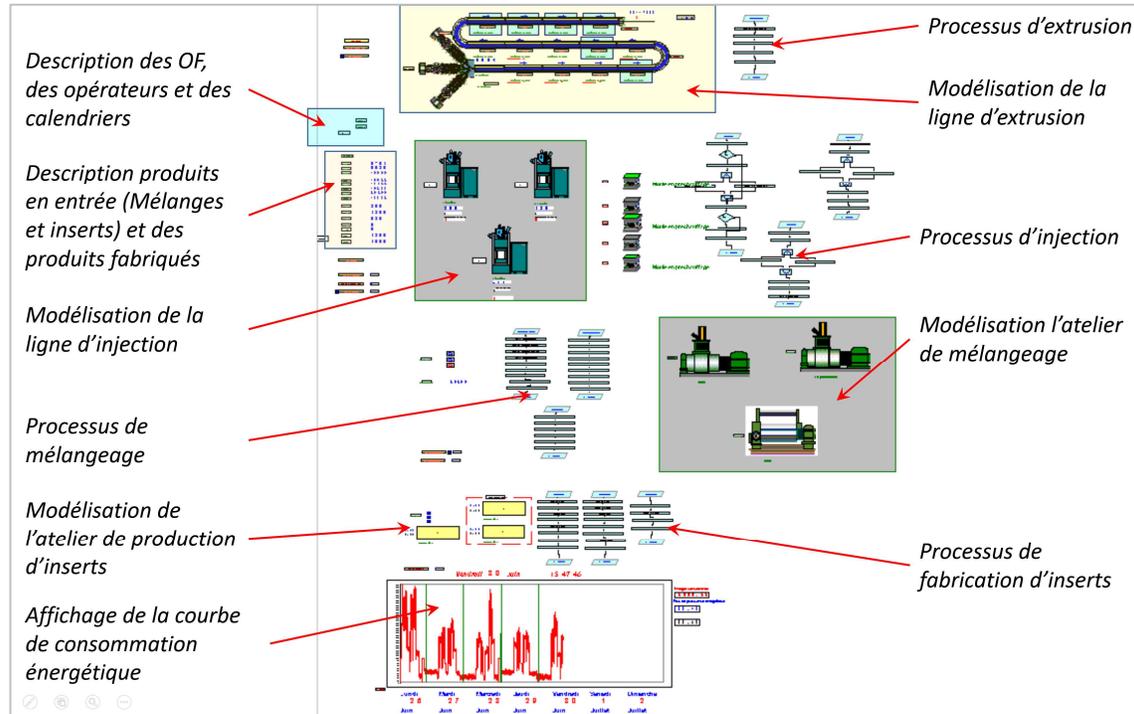


Figure 70. Modèle complet

Ainsi, les plannings de production générés par l'outil d'ordonnancement peuvent permettre d'atteindre des solutions de meilleure qualité que d'autres solutions non ordonnancées. De manière générale, une réduction jusqu'à 50% des consommations en sur limite est observée lorsque l'ordonnancement retourné par le module d'optimisation est utilisé. Ces résultats valident donc l'approche et montrent que l'utilisation d'un module d'optimisation, même en relâchant certaines contraintes, permet d'obtenir des résultats meilleurs que des solutions non ordonnancées.

CONCLUSION

Nous avons pu à travers ce chapitre valider dans un premier lieu la capacité de notre outil ERDES à prédire la consommation énergétique d'une unité de production d'une manière précise, même si celle-ci présente des profils énergétiques complexes. L'intégration des lois de distribution stochastique était une solution que nous avons proposée pour palier à des problèmes de gestion de données d'entrée dans le cas où les données des blocs d'énergie représentant les profils énergétiques des activités sont variables entre les cycles. Les résultats obtenus ont montré un écart de 2.2 % entre la consommation simulée et la consommation réelle.

Tableau 17. Résultats de simulation

		Arrêt systématique	Marche systématique	Arrêt conditionnel
P1	Energie totale	38356	37569	40747
	Energie surlimite	895.5	1365	1248.8
	Puissance maxi	386.1	391	409.6
	Durée	4271283	2074204	2705403
P2	Energie totale	38777	38563	43672
	Energie surlimite	1305.8	1252	1492.4
	Puissance maxi	427	430	436.2
	Durée	4357363	2016605	2619523
P3	Energie totale	37880	36870	34956
	Energie surlimite	1764.4	1604.3	1530
	Puissance maxi	398.6	393.1	395.7
	Durée	4336083	2016605	2705403
P4	Energie totale	38425	37801	36309
	Energie surlimite	2482	2368.2	1908.5
	Puissance maxi	409.1	424.5	410.8
	Durée	4249503	2016605	2713803
P5	Energie totale	38331	38123	
	Energie surlimite	2913.8	2519	
	Puissance maxi	443	436	
	Durée	4247103	2016605	

Nous avons pu aussi montrer dans la deuxième partie de ce chapitre deux cas d'utilisation de l'outil ERDES. Le premier permettait de comparer des différentes stratégies d'arrêt et de mise en veille des machines appliquées dans un atelier de moulage par injection constitué de plusieurs presses à injecter qui peuvent rester ou non en maintien en température pendant les périodes d'inactivité. A partir du modèle réalisé dans le cadre de ce cas d'étude, nous avons pu fournir des résultats sur la consommation énergétique à NVA ainsi que la durée de réalisation des OFs pour chaque stratégie de gestion d'arrêt afin de trouver la meilleure qui minimise cette consommation tout en respectant des objectifs de productivité du système. Le deuxième cas d'étude permettait de valider l'utilité de l'outil d'ordonnancement développé dans le cadre du projet ECOTHER dans la réduction des pics de puissance. Les résultats obtenus ont montré que le planning de production généré par l'outil d'ordonnancement a permis de fournir une solution de meilleure qualité que d'autres solutions non ordonnancées, pouvant atteindre une réduction jusqu'à 50% des consommations au-dessus de seuil de puissance.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Nous avons cherché au travers de nos travaux de recherche à apporter une solution à un domaine encore en construction : l'intégration de la modélisation de consommation énergétique des systèmes de production dans la SED. Ce domaine consiste à modéliser les flux de production et les flux énergétiques dans une plateforme unique dans le but de les analyser et les optimiser dans le respect des objectifs d'amélioration de la performance énergétique des systèmes et des objectifs de productivité. Malgré l'existence de plusieurs travaux de recherche qui ont abordé cette problématique, ce domaine reste peu exploité et présentait jusqu'ici plusieurs limites. En analysant ces travaux, nous avons pu identifier deux verrous majeurs :

- Un manque de généralité et d'extensibilité des solutions proposées. Par conséquent, la question du développement d'une méthodologie outillée permettant de systématiser et faciliter la prise en compte de l'énergie consommée dans la SED a été abordée et une proposition a été faite dans ce sens.
- Un manque de méthodologie d'intégration des données de consommation énergétiques suffisamment efficace pour couvrir les cas des unités de production complexes. Par conséquent, un deuxième axe de travail a été développé en se basant sur les moyens industriels des membres du consortium du projet ECOTHER, support de cette thèse.

En réponse au premier verrou, une approche générique permettant de modéliser les flux de production et les flux énergétiques simultanément a été proposée. Cette approche est basée sur l'identification des processus de production et consiste à attribuer à chaque activité composant ces processus un profil de consommation énergétique modélisé à l'aide d'une succession de blocs d'énergie. Cette approche a été ensuite implantée au cœur de l'outil ERDES, permettant ainsi de systématiser la création de modèles de simulation intégrant l'énergie, et donc faciliter leur utilisation en contexte industriel, notamment par des non-spécialistes de la simulation. Cette méthodologie a notamment été publiée dans (Kouki et al., 2015a, 2015b).

En réponse au deuxième verrou, nous avons proposé l'utilisation originale de données stochastiques pour modéliser les profils énergétiques les plus complexes présentant une variabilité difficilement modélisable. C'est le cas par exemple des machines intégrant une régulation thermique qui sont sensibles à de très nombreux facteurs intrinsèques et extérieurs. Les résultats de cette modélisation ont été valorisés par une publication dans le Journal of Cleaner Production (Kouki et al., 2017).

L'outil que nous avons développé en réponse à ces verrous ayant des objectifs d'utilisation industrielle, les concepts et les méthodes choisies ont été adaptées au mieux afin que l'outil soit effectif et utilisable dans le terme le plus court possible. De plus, afin de valider et d'illustrer notre approche et notre outil, nous avons proposé plusieurs cas d'étude dans le secteur de transformation des polymères, support cadre du projet ECOTHER. Les objectifs étaient de valider dans un premier temps la capacité de notre outil à prédire la consommation énergétique

d'une manière précise en utilisant la méthode des blocs d'énergie avec l'emploi des données stochastiques dans le cas des profils complexes, puis de montrer dans un deuxième temps l'utilité de l'outil ERDES à contribuer à l'amélioration de la performance énergétique des systèmes de production en adoptant une stratégie efficace d'arrêt et de mise en veille des machines dans les périodes d'inactivité et en réduisant les pics de consommation tout en respectant les objectifs de production.

A très court terme, nous voulons poursuivre la validation de notre outil en appliquant la démarche utilisée pour une machine (chapitre 5 section 1) à un atelier complet. Pour cela, une campagne de mesures a déjà été menée sur l'atelier de l'IFOCA (Institut national de formation & d'enseignement professionnel du caoutchouc), site de Carquefou (44), et les résultats sont en cours d'exploitation. Cet atelier est composé d'une ligne d'extrusion, de deux mélangeurs, d'une presse à injecter et d'un ensemble d'équipements supports (compresseur, extracteur d'air, etc.), représentant à échelle légèrement réduite tous les équipements classiques d'un transformateur industriel d'élastomères.

Une deuxième perspective de cette thèse est de pouvoir associer l'outils ERDES à un outil annexe qui permet la gestion des paramètres d'entrée et des résultats pour pouvoir intégrer un grand nombre de données et trouver une corrélation entre les données d'entrée (les scénarios) et les données de sorties (les résultats). Cet outil est développé par l'entreprise Techteam (69) et nécessite d'être adapté à la bibliothèque. Un effort de développement doit être fait pour aboutir à ce couplage.

Une troisième perspective à court terme, est de continuer le travail sur la généralisation de la bibliothèque. Des fonctionnalités supplémentaires nécessitent d'être ajoutées aux modules, notamment le module 'Ressource standard', pour ajouter plus de flexibilité et couvrir les cas les plus particuliers des systèmes de production.

Nous avons dans le chapitre 5 de cette thèse utilisé notre outil pour valider une approche d'ordonnancement de la production sous contraintes énergétiques. Cet outil développé dans le cadre d'une autre thèse du projet ECOTHER a bien sûr nécessité de relaxer certaines contraintes comme la gestion du calendrier. Une quatrième perspective sera de coupler ces deux outils dans le but, dans un premier temps de valider l'ordonnancement proposé, et dans un deuxième temps de proposer des pistes pour améliorer cette solution d'ordonnancement.

Nous avons pu remarquer à travers ces études de cas que, malgré les solutions que l'on a proposées pour bien gérer les données d'entrée et malgré les résultats assez précis que notre approche a démontrés, la phase de collecte de données reste complexe, surtout à l'échelle d'un système de production complet où de nombreuses machines et équipements consommateurs doivent être modélisés. Le nombre de paramètres à identifier explose rapidement et la collecte de données devient assez coûteuse en temps et en argent. La collecte de données dans de tels projets reste problématique.

Une première façon d'améliorer cette collecte de données, constituant une cinquième perspective, serait d'automatiser la création des blocs d'énergie à partir de la mesure physique réalisée. Il faudrait développer un système d'enregistrement conjoint de l'énergie et de

l'activité. Ensuite, une phase de traitement du signal couplée à un outil informatique permettrait d'identifier l'ensemble de blocs d'énergie correspondant à une activité donnée.

Une autre piste pour résoudre cette problématique serait de se baser sur les développements actuels et annoncés des systèmes de production connectés dans le cadre des projets structurants type Usine du futur. La capacité de cette industrie hyper-connectée à collecter un grand nombre d'informations depuis le terrain (y compris la consommation énergétique) et les analyser avec des solutions de type « Big Data », « Machine Learning » ou « Deep Learning » devrait aider à pallier au problème de gestion des données. Ceci ouvre une sixième perspective consistant à passer à une utilisation « on-line » de notre outil ERDES, qui sera alors en capacité de résoudre des questions à l'échelle opérationnelle. Les données de consommation énergétiques réelles étant collectées et introduites en temps réel, l'idée serait d'utiliser ces données pour alimenter des modèles empiriques de prévision de consommation énergétique (algorithme de régression additive, réseau de neurones, ...). Notre outil sera alors sollicité pour prendre des décisions immédiates, par exemple décider quelle opération lancée pour ne pas dépasser le seuil de consommation après avoir simulé l'influence de cette décision sur les objectifs de production. Ainsi, la fastidieuse collecte des courbes de consommation énergétique pourrait être remplacée par une approche d'apprentissage alimentée par les données mesurées en temps réel.

Références

- Abdelaziz, E.A., Saidur, R., Mekhilef, S., 2011. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 150–168.
- Abele, E., Anderl, R., Birkhofer, H., 2005. *Environmentally-friendly product development*. Springer.
- Abele, E., Braun, S., Schraml, P., 2015. Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools. *Procedia CIRP*, The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering 29, 251–256. doi:10.1016/j.procir.2015.02.059
- Andersson, J., Skoogh, A., Johansson, B., 2012. Evaluation of Methods Used for Life-cycle Assessments in Discrete Event Simulation, in: *Proceedings of the Winter Simulation Conference, WSC '12*. Winter Simulation Conference, Berlin, Germany, p. 156:1–156:12.
- Apostolos, F., Alexios, P., Georgios, P., Panagiotis, S., George, C., 2013. Energy Efficiency of Manufacturing Processes: A Critical Review. *Procedia CIRP*, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, 628–633. doi:10.1016/j.procir.2013.06.044
- Artigues, C., Lopez, P., Haït, A., 2013. The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques. *Int. J. Prod. Econ.* 143, 13–23. doi:10.1016/j.ijpe.2010.09.030
- Balci, O., 1990. Guidelines for successful simulation studies, in: *1990 Winter Simulation Conference Proceedings*. Presented at the 1990 Winter Simulation Conference Proceedings, pp. 25–32. doi:10.1109/WSC.1990.129482
- Banks, J., Carson, J.S., Nelson, B.L., Nicol, D., 2010. *Discrete-Event System Simulation*. Prentice Hall.
- Blackstone, J.H., 2008. *APICS dictionary : the official dictionary of production and inventory management terminology and phrases*, twelfth edition.
- Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brühlhart, M., Ernst, F.O., 2011. Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. *J. Clean. Prod.* 19, 667–679. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.011
- Cagno, E., Trianni, A., 2014. Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: an exploratory study in small and medium-sized enterprises. *J. Clean. Prod.* 82, 70–83.
- Castro, R.D., Cellier, F.E., Fischlin, A., 2015. Sustainability analysis of complex dynamic systems using embodied energy flows: The eco-bond graphs modeling and simulation framework. *J. Comput. Sci.* 10, 108–125. doi:10.1016/j.jocs.2014.10.001

- Cataldo, A., Taisch, M., Stahl, B., 2013. Modelling, simulation and evaluation of energy consumptions for a manufacturing production line, in: Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. IEEE, pp. 7537–7542.
- Davis, W.J., 1998. On-Line Simulation: Need and Evolving Research Requirements, in: Banks, J. (Ed.), Handbook of Simulation. John Wiley & Sons, Inc., pp. 465–516.
- de Almeida, A., Bertoldi, P., Leonhard, W. (Eds.), 1997. Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Devoldere, T., Dewulf, W., Deprez, W., Willems, B., Duflou, J.R., 2007. Improvement Potential for Energy Consumption in Discrete Part Production Machines, in: Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses. Springer, London, pp. 311–316.
- Dietmair, A., Verl, A., 2009. A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing. *Int. J. Sustain. Eng.* 2, 123–133. doi:10.1080/19397030902947041
- DIRECTIVE/87/CE, 2003. DIRECTIVE 2003/87/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 13 octobre 2003 établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil.
- DJEMAA Ahcène, 2009. Modélisation Bottom-Up, un outil d'aide à la décision long terme pour les mesures politiques en matière d'énergie et d'environnement - Le modèle TIMES appliqué aux industries grandes consommatrices d'énergie (IGCE).
- DOC, 2010. Department Of Commerce.
- Duflou, J.R., Sutherland, J.W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., Kellens, K., 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 61, 587–609. doi:10.1016/j.cirp.2012.05.002
- Elkington, J., 2002. The triple bottom line.
- Feng, S.C., Joung, C.-B., Li, G., 2010. Development overview of sustainable manufacturing metrics, in: Proceedings of the 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.
- Feo, T.A., Resende, M.G.C., 1995. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *J. Glob. Optim.* 6, 109–133. doi:10.1007/BF01096763
- Frigerio, N., Matta, A., 2014. Energy Efficient Control Strategy for Machine Tools with Stochastic Arrivals and Time Dependent Warm-up. *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering 15, 56–61. doi:10.1016/j.procir.2014.06.040
- Fysikopoulos, A., Anagnostakis, D., Salonitis, K., Chryssolouris, G., 2012. An Empirical Study of the Energy Consumption in Automotive Assembly. *Procedia CIRP*, 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012 3, 477–482. doi:10.1016/j.procir.2012.07.082
- GIEC, 2014. CHANGEMENTS CLIMATIQUES 2014 Rapport de synthèse.

- Gomes, V.E. de O., Gomes, J. de O., Grote, K.-H., 2013. Discrete Event Simulation Inserted into Kaizen Event to Assess Energy Efficiency, in: *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, Singapore, pp. 499–503.
- Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., 2006. Electrical energy requirements for manufacturing processes, in: *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. pp. 623–638.
- Hasanbeigi, A., Menke, C., Pont, P. du, 2010. Barriers to energy efficiency improvement and decision-making behavior in Thai industry. *Energy Effic.* 3, 33–52. doi:10.1007/s12053-009-9056-8
- Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 54, 1–21. doi:10.1016/S0007-8506(07)60017-1
- Heilala, J., Vatanen, S., Tonteri, H., Montonen, J., Lind, S., Johansson, B., Stahre, J., 2008. Simulation-based sustainable manufacturing system design, in: *Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter*. Presented at the Simulation Conference, 2008. WSC 2008. Winter, pp. 1922–1930. doi:10.1109/WSC.2008.4736284
- Herrmann, C., Schmidt, C., Kurle, D., Blume, S., Thiede, S., 2014. Sustainability in manufacturing and factories of the future. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* 1, 283–292. doi:10.1007/s40684-014-0034-z
- Herrmann, C., Thiede, S., 2009a. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 1, 221–229.
- Herrmann, C., Thiede, S., 2009b. Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol., Life Cycle Engineering* 1, 221–229. doi:10.1016/j.cirpj.2009.06.005
- IEA, 2007. *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions*, The International Energy Agency (IEA).
- IEO, 2016. *International Energy Outlook*. International Energy Agency.
- Iraldo, F., Testa, F., Frey, M., 2009. Is an environmental management system able to influence environmental and competitive performance? The case of the eco-management and audit scheme (EMAS) in the European union. *J. Clean. Prod.* 17, 1444–1452. doi:10.1016/j.jclepro.2009.05.013
- ISO 9000, 2005. *Systèmes de management de la qualité -- Principes essentiels et vocabulaire*.
- ISO 14040, 2006. *Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre*.
- ISO 14044, 2006. *Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices*.
- ISO 50001, 2011. *Systèmes de management de l'énergie -- Exigences et recommandations de mise en oeuvre*.
- Jacobs, N.B., 2009. *Energy policy: economic effects, security aspects and environmental issues*. Nova Science Publishers.

- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K., Young, T., 2010. Simulation in manufacturing and business: A review. *Eur. J. Oper. Res.* 203, 1–13. doi:10.1016/j.ejor.2009.06.004
- Joung, C.B., Carrell, J., Sarkar, P., Feng, S.C., 2013. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecol. Indic.* 24, 148–157. doi:10.1016/j.ecolind.2012.05.030
- Kanungo, A., Swan, E., 2008. All electric injection molding machines: how much energy can you save?
- Karnouskos, S., Colombo, A.W., Lastra, J.L.M., Popescu, C., 2009. Towards the energy efficient future factory, in: *Industrial Informatics, 2009. INDIN 2009. 7th IEEE International Conference on. IEEE*, pp. 367–371.
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2011a. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 69–78. doi:10.1007/s11367-011-0340-4
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M.Z., Duflou, J.R., 2011b. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 242–251. doi:10.1007/s11367-011-0352-0
- Kemmoe, S., Lamy, D., Tchernev, N., 2017. Job-shop like manufacturing system with variable power threshold and operations with power requirements. *Int. J. Prod. Res.* 0, 1–22. doi:10.1080/00207543.2017.1321801
- Kibira, D., Jain, S., Mclean, C., 2009. A system dynamics modeling framework for sustainable manufacturing, in: *Proceedings of the 27th Annual System Dynamics Society Conference*.
- Kohl, J., Spreng, S., Franke, J., 2014. Discrete event simulation of individual energy consumption for product-varieties. *Procedia CIRP* 17, 517–522.
- Kouki, M., Cardin, O., Castagna, P., Cornardeau, C., 2017. Input data management for energy related discrete event simulation modelling. *J. Clean. Prod.* 141, 194–207. doi:10.1016/j.jclepro.2016.09.061
- Kouki, M., Castagna, P., Cardin, O., Cornardeau, C., 2015a. An energy-related discrete event simulation approach. Presented at the CIGI 2015.
- Kouki, M., Castagna, P., Cardin, O., Cornardeau, C., 2015b. Couplage de la modélisation énergétique à la simulation dynamique des flux de production, in: *Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées*. Presented at the CPI 2015.
- Kruse, A., Butzer, S., Drews, T., Steinhilper, R., 2015a. A Simulation-based Framework for Improving the Ecological and Economic Transparency in Multi-variant Production. *Procedia CIRP, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials* 26, 179–184. doi:10.1016/j.procir.2014.07.101
- Kruse, A., Uhlemann, T.H.-J., Steinhilper, R., 2015b. Simulation-based assessment and optimization of the energy consumption in multi variant production, in: *Decoupling*

- Growth from Resource Use. Proceedings 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing. p. 6.
- Langer, T., Schlegel, A., Stoldt, J., Putz, M., 2014. A Model-based Approach to Energy-saving Manufacturing Control Strategies. *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering 15, 123–128. doi:10.1016/j.procir.2014.06.019
- Law, A.M., 2007. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- Law, A.M., Kelton, W.D., 2000. *Simulation Modelling and Analysis*, troisième édition.
- Lee, J.Y., Kang, H.S., Noh, S.D., 2014. MAS2: an integrated modeling and simulation-based life cycle evaluation approach for sustainable manufacturing. *J. Clean. Prod.* 66, 146–163. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.029
- Li, W., Kara, S., 2011. An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 225, 1636–1646. doi:10.1177/2041297511398541
- Li, W., Kara, S., Kornfeld, B., 2013. Developing Unit Process Models for Predicting Energy Consumption in Industry: A Case of Extrusion Line, in: *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer, Singapore, pp. 147–152.
- Li, W., Zein, A., Kara, S., Herrmann, C., 2011. An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools, in: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 268–273.
- Liu, F., Xie, J., Liu, S., 2014. A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process. *J. Clean. Prod.* 105, 171–177.
- Liu, N., Zhang, Y.F., Lu, W.F., 2015. A Hybrid Approach to Energy Consumption Modelling based on Cutting Power: A Milling Case. *J. Clean. Prod.* 104, 264–272.
- Lorenz, S., Hesse, M., Fischer, A., 2012. Simulation and optimization of robot driven production systems for peak-load reduction, in: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. Presented at the Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), pp. 1–12. doi:10.1109/WSC.2012.6465002
- Madan, J., Mani, M., Lee, J.H., Lyons, K.W., 2015. Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study. *J. Clean. Prod.* 105, 157–170.
- Martin, N., Worrell, E., Ruth, M., Price, L., Elliott, R.N., Shipley, A.M., Thorne, J., 2000. *Emerging energy-efficient industrial technologies*. Lawrence Berkeley Natl. Lab.
- Mecrow, B.C., Jack, A.G., 2008. Efficiency trends in electric machines and drives. *Energy Policy, Foresight Sustainable Energy Management and the Built Environment Project* 36, 4336–4341. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.042
- Meike Fink, Vincent Legrand, 2014. *La transition énergétique du secteur de l'industrie : Un plan d'action : comment financer l'exploitation des gisements d'efficacité énergétique du secteur ?*
- Montgomery, N.F.D.C., Runger, G.G., Hubele, N.F., 2007. *Engineering statistics*, 4ème édition.

- Morrow, D., Rondinelli, D., 2002. Adopting Corporate Environmental Management Systems: Eur. Manag. J. 20, 159–171. doi:10.1016/S0263-2373(02)00026-9
- Morthorst, P.E., 2001. Interactions of a tradable green certificate market with a tradable permits market. Energy Policy 29, 345–353. doi:10.1016/S0301-4215(00)00133-6
- Mukherjee, K., 2008. Energy use efficiency in U.S. manufacturing: A nonparametric analysis. Energy Econ. 30, 76–96. doi:10.1016/j.eneco.2006.11.004
- Müller, E., Schillig, R., Stock, T., Schmeiler, M., 2014. Improvement of Injection Moulding Processes by Using Dual Energy Signatures. Procedia CIRP, Variety Management in Manufacturing 17, 704–709. doi:10.1016/j.procir.2014.01.110
- Nawrocka, D., Parker, T., 2009. Finding the connection: environmental management systems and environmental performance. J. Clean. Prod. 17, 601–607. doi:10.1016/j.jclepro.2008.10.003
- Negahban, A., Smith, J.S., 2014. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. J. Manuf. Syst. 33, 241–261. doi:10.1016/j.jmsy.2013.12.007
- Nordgren, W.B., 1995. Steps for Proper Simulation Project Management, in: Proceedings of the 27th Conference on Winter Simulation, WSC '95. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, pp. 68–73. doi:10.1145/224401.224425
- O'Callaghan, P.W., Probert, S.D., 1977. Energy management. Appl. Energy 3, 127–138. doi:10.1016/0306-2619(77)90024-1
- Page, B., Wohlgemuth, V., 2010. Advances in environmental informatics: integration of discrete event simulation methodology with ecological material flow analysis for modelling eco-efficient systems. Procedia Environ. Sci. 2, 696–705.
- Pegden, C.D., Sadowski, R.P., Shannon, R.E., 1995. Introduction to Simulation Using SIMAN, 2nd ed. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA.
- Peng, T., Xu, X., Wang, L., 2014. A novel energy demand modelling approach for CNC machining based on function blocks. J. Manuf. Syst. 33, 196–208. doi:10.1016/j.jmsy.2013.12.004
- Pons, M., Bikfalvi, A., Llach, J., Palcic, I., 2013. Exploring the impact of energy efficiency technologies on manufacturing firm performance. J. Clean. Prod. 52, 134–144. doi:10.1016/j.jclepro.2013.03.011
- Price, L., Worrell, E., 2000. International industrial sector energy efficiency policies. Lawrence Berkeley Natl. Lab.
- Prins, C., 2009. A GRASP × Evolutionary Local Search Hybrid for the Vehicle Routing Problem, in: Bio-Inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem, Studies in Computational Intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 35–53.
- Putz, M., Götze, U., Stoldt, J., Franz, E., 2016. Target Systems and Decision-making to Increase Production Sustainability. Procedia CIRP, The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering 48, 34–39. doi:10.1016/j.procir.2016.03.034
- Qureshi, F., Li, W., Kara, S., Herrmann, C., 2012. Unit process energy consumption models for material addition processes: a case of the injection molding process, in: Leveraging Technology for a Sustainable World. Springer, pp. 269–274.

- Rabier François, 2007. Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire.
- Rahimifard, S., Seow, Y., Childs, T., 2010. Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 59, 25–28. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.048
- Ribeiro, I., Peças, P., Henriques, E., 2012. Assessment of energy consumption in injection moulding process, in: *Leveraging Technology for a Sustainable World*. Springer, pp. 263–268.
- Rohdin, P., Thollander, P., 2006. Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy* 31, 1836–1844. doi:10.1016/j.energy.2005.10.010
- Rohdin, P., Thollander, P., Solding, P., 2007. Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. *Energy Policy* 35, 672–677. doi:10.1016/j.enpol.2006.01.010
- Saidur, R., Rahim, N.A., Masjuki, H.H., Mekhilef, S., Ping, H.W., Jamaluddin, M.F., 2009. End-use energy analysis in the Malaysian industrial sector. *Energy* 34, 153–158. doi:10.1016/j.energy.2008.11.004
- Sarkar, P., Joung, C.B., Carrell, J., Feng, S.C., 2011. Sustainable Manufacturing Indicator Repository 943–950. doi:10.1115/DETC2011-47491
- Schmidt, C., Li, W., Thiede, S., Kara, S., Herrmann, C., 2015. A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries. *Int J Precis Eng Manuf-Green Tech* 2, 163–172.
- Seow, Y., Rahimifard, S., 2011. A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol., Production Networks Sustainability* 4, 258–264. doi:10.1016/j.cirpj.2011.03.007
- Singh, R.K., Murty, H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K., 2009. An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecol. Indic.* 9, 189–212. doi:10.1016/j.ecolind.2008.05.011
- Skoogh, A., Johansson, B., 2009. Mapping of time-consumption during input data management activities. *Simul. News Eur.* 19, 39–46.
- Skoogh, A., Johansson, B., Hansson, L., 2011. Data requirements and representation for simulation of energy consumption in production systems, in: *Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. pp. 1–3.
- Smith, J.S., 2003. Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *J. Manuf. Syst.* 22, 157–171.
- Solding, P., Petku, D., 2005. Applying Energy Aspects on Simulation of Energy-intensive Production Systems, in: *Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation, WSC '05*. Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, pp. 1428–1432.
- Solding, P., Thollander, P., 2006. Increased energy efficiency in a Swedish iron foundry through use of discrete event simulation, in: *Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter*. IEEE, pp. 1971–1976.

- Spiering, T., Kohlitz, S., Sundmaeker, H., Herrmann, C., 2015. Energy efficiency benchmarking for injection moulding processes. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 36, 45–59.
- Steven Fawkes, Kit Oung, David Thorpe, 2016. *Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement – An Introduction for Policy Makers.*
- TGRR, 2016. *The Global Risks Report 2016 11th Edition.*
- Thiede, S., Bogdanski, G., Herrmann, C., 2012. A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies. *Procedia CIRP* 2, 28–33.
- Thiede, S., Herrmann, C., Kara, S., 2011. State of Research and an innovative Approach for simulating Energy Flows of Manufacturing Systems, in: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing.* Springer, pp. 335–340.
- Thiede, S., Seow, Y., Andersson, J., Johansson, B., 2013. Environmental aspects in manufacturing system modelling and simulation—State of the art and research perspectives. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 6, 78–87. doi:10.1016/j.cirpj.2012.10.004
- Thiriez, A., Gutowski, T., 2006. An Environmental Analysis of Injection Molding, in: *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006.* Presented at the *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006,* pp. 195–200. doi:10.1109/ISEE.2006.1650060
- Thoma, J.U., 2016. *Introduction to Bond Graphs and their Applications.* Elsevier.
- Tolvanen, J., 2008. Saving energy with variable speed drives. *World Pumps* 2008, 32–33. doi:10.1016/S0262-1762(08)70164-0
- Tonelli, F., Bruzzone, A.A.G., Paolucci, M., Carpanzano, E., Nicolò, G., Giret, A., Salido, M.A., Trentesaux, D., 2016. Assessment of mathematical programming and agent-based modelling for off-line scheduling: Application to energy aware manufacturing. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65, 405–408. doi:10.1016/j.cirp.2016.04.119
- Trybula, W.J., 1994. Building simulation models without data, in: , 1994 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. *Humans, Information and Technology.* Presented at the , 1994 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994. *Humans, Information and Technology,* pp. 209–214 vol.1. doi:10.1109/ICSMC.1994.399838
- Unger, T., Ahlgren, E.O., 2005. Impacts of a common green certificate market on electricity and CO2-emission markets in the Nordic countries. *Energy Policy* 33, 2152–2163. doi:10.1016/j.enpol.2004.04.013
- Vijayaraghavan, A., Dornfeld, D., 2010. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 59, 21–24. doi:10.1016/j.cirp.2010.03.042
- Vikhorev, K., Greenough, R., Brown, N., 2013. An advanced energy management framework to promote energy awareness. *J. Clean. Prod.* 43, 103–112.
- WCED, 1987. *World Commission on Environment and Development report.*
- Weinert, N., Chiotellis, S., Seliger, G., 2011. Methodology for planning and operating energy-efficient production systems. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 60, 41–44. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.015

- Weinert, N., Mose, C., 2014. Investigation of Advanced Energy Saving Stand by Strategies for Production Systems. *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering 15, 90–95. doi:10.1016/j.procir.2014.06.009
- Wolf, S., Merz, P., 2007. Evolutionary Local Search for the Super-Peer Selection Problem and the p-Hub Median Problem, in: *Hybrid Metaheuristics, Lecture Notes in Computer Science*. Presented at the International Workshop on Hybrid Metaheuristics, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–15. doi:10.1007/978-3-540-75514-2_1
- Ye, X., 2013. *Modélisation et simulation des systèmes de production : une approche orientée objets*.
- Zampou, E., Plitsos, S., Karagiannaki, A., Mourtos, I., 2014. Towards a framework for energy-aware information systems in manufacturing. *Comput. Ind., ICT for Sustainability in Industry* 65, 419–433. doi:10.1016/j.compind.2014.01.007
- Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., Xu, X., 2016. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *J. Clean. Prod.* 112, Part 5, 3721–3734. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.093
- Zhou, X., Liu, F., Cai, W., 2015. An energy-consumption model for establishing energy-consumption allowance of a workpiece in a machining system. *J. Clean. Prod.* 135, 1580–1590.

Thèse de Doctorat

Meriem KOUKI

Maîtrise énergétique des systèmes de production : Proposition d'un outil d'aide à la conception de modèles de Simulation à Evènements Discrets intégrant l'énergie

Résumé

Les industries sont aujourd'hui contraintes d'innover et d'améliorer leur durabilité sous une pression économique, politique et sociale accrue dans un marché très concurrentiel, avec une société de plus en plus sensible aux enjeux environnementaux. Dans ce contexte, de nombreuses initiatives ont été menées aussi bien au niveau académique qu'industriel pour améliorer la gestion de l'énergie dans la phase de production. En parallèle des avancées technologiques, les économies d'énergie liées à l'organisation de la production ne sont pas toujours exploitées du fait d'un manque de données liées au comportement énergétique des systèmes. Pour répondre à cette problématique, la simulation à événements discrets est une solution fiable, mais plusieurs verrous empêchent encore son utilisation industrielle : les approches de la littérature manquent de genericité et de procédures fiables pour intégrer les données réelles de consommation énergétique dans les cas les plus complexes.

L'objectif de notre travail est de proposer un outil de simulation permettant de prédire la consommation énergétique des systèmes de production et servir d'outil d'aide à la décision couplant des objectifs énergétiques et productivistes généralement peu conciliables. Cet outil est basé sur une approche générique et flexible permettant de modéliser et simuler les flux de production et les flux énergétiques dans une plateforme unique. De plus, une méthodologie d'intégration des données de consommation complexes, basée sur une approche stochastique, est proposée.

La validation de notre approche et de l'outil a été réalisée sur des unités industrielles du domaine de la transformation des polymères et élastomères.

Mots clés

Simulation à Evènements Discrets, modélisation, prédiction, consommation énergétique, efficacité énergétique, durabilité, systèmes de production.

Abstract

Today, industries are compelled to innovate and improve their sustainability under economic, political and social pressure in a highly competitive market and within an increasing societal conscience towards environmental issues. In this context, several initiatives have been carried out at both academic and industrial levels to improve energy performance in the production phase. In parallel with technological advances, energy savings by production organization are not always exploited because of a lack of comprehension on the energy behavior of manufacturing systems. To solve this problem, Discrete Event Simulation is a reliable solution, but several barriers still prevent its industrial use: literature approaches lack genericity and reliable procedures for integrating energy consumption data in complex cases. The objective of our work is to propose a simulation tool allowing to predict the energy consumption of manufacturing systems, it serves as a tool to help decision-making to enhance energy performance and productivity usually considered as conflicting goals. This tool is designed following a generic and flexible approach to model and simulate workflows and energy flows in a single platform. In addition, a methodology for integrating complex energy consumption data, based on a stochastic approach, is proposed. Validation of our approach and our tool is carried out in the field of polymer processing.

Keywords

Discrete Event Simulation, modeling, prediction, energy consumption, energy performance, sustainability, manufacturing systems.