



HAL
open science

Contribution à la modélisation, simulation et pilotage des systèmes complexes

M'hammed Sahnoun

► **To cite this version:**

M'hammed Sahnoun. Contribution à la modélisation, simulation et pilotage des systèmes complexes. Modélisation et simulation. Normandie Université, 2019. tel-04104462

HAL Id: tel-04104462

<https://hal.science/tel-04104462>

Submitted on 24 May 2023

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.



Normandie Université

Habilitation à Diriger des Recherches

Ecole doctorale MIIS – ED 590

Spécialité : Automatique, Signal, Productique, Robotique

Contribution à la modélisation, simulation et pilotage des systèmes complexes

Présentée et soutenue par
M'hammed SAHNOUN

HDR soutenue publiquement le 08 Avril 2019
devant le jury composé de

ABSI Nabil	Professeur / Gardanne	Rapporteur
ZERHOUNI Nouredine	Professeur des universités / Besançon	Rapporteur
OUELHADJ Djamilia	Professor / Université de Portsmouth	Rapporteur
TRENTESAUX Damien	Professeur des universités / Valenciennes	Examineur
TOLLENAERE Michel	Professeur des universités / Grenoble	Examineur
THIRIET Jean Marc	Professeur des universités / Grenoble	Examineur
MAZARI Bélahcène	Directeur de recherche de CESI / Paris	Examineur
BENSRHAIR Abdelaziz	Professeur des universités / Rouen	Examineur

Laboratoire d'Innovation Numérique pour les Entreprises et les Apprentissages au service de la Compétitivité des Territoires



UNIVERSITÉ NORMANDIE

Résumé

Département recherche et innovation
Groupe CESI

Habilité à Diriger des Recherches

Contribution à la modélisation, simulation et pilotage des systèmes complexes

Par M'hammed SAHNOUN

un système complexe est formé de nombreux composants dont le comportement est émergent « le tout est plus que la somme de ses parties », c'est-à-dire que le comportement du système ne peut être simplement déduit du comportement de ses composants. La complexité est un mot qui revient très fréquemment dans les travaux de recherche que j'ai menés jusqu'à maintenant et que je compte poursuivre. Depuis la thèse de doctorat, j'ai orienté mes travaux de recherche vers le pilotage et l'amélioration des systèmes de production qui deviennent de plus en plus complexes, notamment avec l'introduction du concept de l'industrie 4.0. J'ai classé mes travaux en quatre parties qui tournent autour de l'optimisation du fonctionnement des ateliers de productions flexibles et l'amélioration des systèmes de production d'énergies renouvelables. La première partie présente mes travaux sur le développement de plans d'inspections dynamiques basés sur le risque. Cette contribution a été appliquée aux ateliers de production de semi-conducteurs qui représentent l'un des systèmes de production les plus complexes. La deuxième partie concerne mes travaux sur le développement des systèmes de production d'énergies renouvelables, notamment la maintenance des éoliennes offshores et les systèmes de traitement des bio-déchets conditionnés. La troisième partie de mes travaux concerne l'optimisation de la tâche de transport dans les ateliers de production flexibles. La quatrième partie de mes travaux est concentrée sur la collecte et l'exploitation des données industrielles. Ceci est concrétisé avec l'optimisation du placement de capteurs, la distribution du traitement de données et l'exploitation de données telles que la localisation pour l'ordonnancement dynamique de la production. J'expose aussi mes perspectives de recherche à court, moyen et long termes dans le domaine de l'optimisation des systèmes de production de biens ou d'énergies renouvelables en prenant en compte l'aspect environnemental et en s'intéressant aux aspects décisionnels dans ses différents niveaux (stratégique, tactique et opérationnel).

UNIVERSITÉ NORMANDIE

Abstract

Département recherche et innovation
Groupe CESI

Habilité à Diriger des Recherches

Contribution à la modélisation, simulation et pilotage des systèmes complexes

by M'hammed SAHNOUN

A complex system is made up of many components whose behaviour is emerging "the whole system is more than the sum of its parts", i.e. the behaviour of the system cannot simply be deduced from the behaviour of its components. Complexity is a word that is used frequently in my previous current and future research works. Since the doctoral thesis, I have focused my research work on the improvement of production systems, which are becoming increasingly complex, particularly with the introduction of the concept of industry 4.0. I have divided my work into four parts that focus on optimizing the operation of flexible production workshops and improving renewable energy production systems. The first part presents my work on the development of dynamic risk-based inspection plans. This contribution was implemented in semiconductor production workshops, which represent one of the most complex production systems. The second part concerns my work on the development of renewable energy production systems, in particular the maintenance of offshore wind turbines and systems for the treatment of packaged bio-waste. The third part of my work concerns the optimization of the transport task in flexible production workshops. The fourth part focuses on the collection and use of industrial data. This is achieved by optimizing sensor placement, distributing data processing and using data such as location for dynamic production scheduling. I also present my short-, medium- and long-term research perspectives in the field of optimizing systems for the production of goods or renewable energy by taking into account the environmental aspect and focusing on decision-making aspects at its different levels (strategic, tactical and operational).

Table des matières

Résumé	iii
Résumé	v
1 Introduction générale	1
I Travaux de recherche	5
2 Mise en place de plan d'inspection dynamique	7
2.1 Introduction	7
2.2 Processus de fabrication dans le domaine du semi-conducteur	8
2.2.1 Étapes de fabrication d'un circuit intégré	9
2.3 La maîtrise des procédés	10
2.4 Mes contributions la maitrise de processus de fabrication semi-conducteur	11
2.4.1 Définition d'une stratégie de "skipping" des inspections hors-	
ligne	11
Positionnement du problème	12
Modélisation du relâchement dynamique des contrôles	14
Exemple de calcul de relâchement d'inspection basé sur le risque :	18
Application industrielle	19
Application et discussion	21
2.4.2 échantillonnage optimal	23
Problématique	23
Formalisation du problème	25
Algorithme génétique multi-objectif pour l'échantillonnage	26
Mise en œuvre, expérimentation et discussion	31
Résultats et discussions	34
2.4.3 Conclusion	38
3 Gestion des systèmes de production d'énergie renouvelable	39
3.1 Amélioration de rendement et propreté des parcs éoliens offshore	40
3.1.1 introduction	40
3.1.2 Stratégie de maintenance des éoliennes offshore	42
Modélisation multi-agent d'un parc éolien	42
L'agent "Weather"	48
L'agent "Resource"	48
L'agent "Maintenance"	49
L'agent "Monitoring"	50
Modèle des coûts	50
Interactions entre les agents	52
Simulateur numérique et discussions	53
Simulations	54

	Conclusion et travaux futurs	58
3.1.3	Utilisation des techniques de "remanufacturing" pour l'approvisionnement de la maintenance	58
	L'approche proposée	59
	Simulation	64
	Conclusion	68
3.2	Valorisation des biodéchets par méthanisation	69
3.2.1	Introduction	69
3.2.2	Description de la chaîne de valeur	70
3.2.3	Modélisation et simulation	72
3.2.4	Les interactions entre les agents	73
	Déroulement de la simulation	74
3.2.5	Optimisation du processus	75
	Optimisation de la tournée des camions pour la collecte	75
	Optimisation de la distribution de la soupe	76
	Optimisation des contrats	76
3.3	Conclusion	79
4	Logistique interne dans les ateliers de production flexibles	81
4.1	Introduction	81
4.2	Ordonnancement dynamique de tâches de transport dans l'atelier flexible	82
4.2.1	Objectifs et étapes méthodologiques	83
	Présentation de la table de décision	85
	Classification des critères et prise de décision	85
	Expérimentation numérique	88
4.2.2	Algorithme génétique pour l'optimisation de la tâche de transport	90
	Modèle de simulation	90
	Algorithme génétique	92
	Expérimentation numériques	93
4.3	Robotisation de la tâche de transport	96
4.3.1	Robot mobile modulaire et collaboratif	96
4.3.2	Architecture de supervision	98
4.3.3	L'approche utilisée	99
	Le codage du chromosome	99
	Processus d'enchères	100
	Application sur un cas réel	100
	Résultats et analyses	101
	Plan d'allocation dynamique	102
	Implémentation du plan dynamique	103
4.3.4	Interopérabilité des Robots	104
	Composants de MTconnect	104
	Architecture du système	105
	Implémentation sur le système réel	106
4.4	Conclusion	107
5	Collecte, traitement et exploitation des données industrielles	109
5.1	Optimisation de placement de capteurs dans le bâtiment ou l'atelier	110
5.1.1	Introduction	110
5.1.2	Modèle proposé	111
	Connectivité du réseau	112

Couverture des phénomènes	113
Durée de vie	114
Coût	115
5.1.3 Architecture proposée	115
Codage du chromosome	116
Croisement	116
Mutation	116
5.1.4 Résultat et discussions	117
Métriques de comparaison	118
5.2 Traitement de données distribué et proche des utilisateurs	120
5.2.1 Évolution de la complexité :	121
5.2.2 Le fog computing	122
Caractéristiques :	122
architecture	123
5.2.3 Implémentation du Fog dans l'industrie	123
5.3 Exploitation des données de localisation pour la planification dynamique	124
5.4 Formalisation du problème	125
5.5 Conclusion	127
II Projet de Recherche	129
6 Perspectives de recherche	131
6.1 Introduction	131
6.2 Le pilotage des systèmes de production flexibles	132
6.2.1 Travaux en cours et perspectives court terme	132
6.2.2 Projets de recherche	133
6.3 La gestion et l'amélioration des énergies renouvelables et les systèmes sobres en carbone	134
6.3.1 Travaux en cours et perspectives à court terme	134
6.3.2 Projets de recherche	135
6.4 Le développement de méthodes et d'outils pour l'optimisation des systèmes complexes dynamiques	135
6.4.1 Travaux en cours et perspectives à court terme	136
6.5 Plan d'action	136
6.5.1 Montage de projets	136
6.5.2 Participation dans des groupes recherche	137
7 Conclusion Générale	139
Bibliographie	141

1

Introduction générale

Un système complexe est un système formé de nombreux composants dont le comportement est émergent, c'est-à-dire que le comportement du système ne peut être simplement déduit du comportement de ses composants (BAR-YAM, 1997). La complexité est un mot qui revient très fréquemment dans les travaux de recherche que j'ai mené jusqu'à maintenant et que je compte mener plus tard. La compréhension de ces systèmes, afin d'interpréter leurs comportements pour les piloter n'est pas toujours garantie, au moins à première vue. En réalité le nombre d'états possibles de ce type de système est très grand, ce qui rend impossible de tous les évaluer et de contrôler le passage d'un état à un autre. La complexité se voit réduite quand on réduit la taille du système ou son horizon. Des techniques comme la simulation et l'optimisation sont souvent utilisées pour représenter ces systèmes et améliorer leurs comportements. Chacune de ces techniques doit passer par une étape de modélisation qui déterminera la qualité de la représentation du système et la qualité des solutions proposées. Dans la plus grande partie de mes travaux de recherche, j'ai suivi la démarche que je peux résumer dans le schéma suivant :

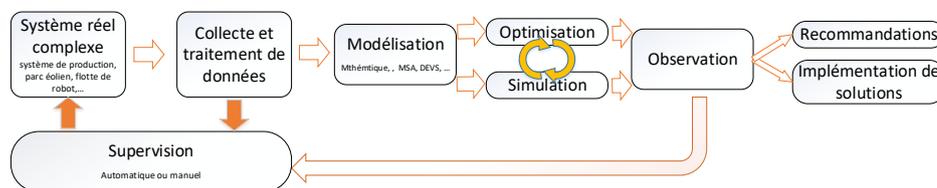


FIGURE 1.1 – Démarche générale de mes travaux de recherche

L'optimisation de fonctionnement de tout système complexe commence par son observation à travers la collecte de données et de connaissances. Cela va aider à la construction de modèles validés représentant fidèlement le système concerné sans pour autant représenter des phénomènes inutiles pour le processus de décision. Dans mes travaux de recherche, j'ai utilisé la modélisation mathématique couplée aux systèmes multi-agents pour la réalisation de cette étape. Les systèmes multi-agents facilitent la modélisation des systèmes complexes en isolant la modélisation de chaque organe afin de réduire sa complexité. En effet, chaque agent (un ou plusieurs composants du système) est modélisé indépendamment, mais prend en compte la variation de son environnement (composé d'autres agents) dans son comportement. Trois manières différentes ont été expérimentées pour proposer des solutions ou recommandations au pilotage de ces systèmes. L'utilisation des techniques de simulation avec le test de plusieurs scénarios potentiels, l'optimisation d'un ou plusieurs objectifs, ou le mix de la simulation et l'optimisation d'un ou plusieurs phénomènes qui peuvent avoir lieu durant la vie du système. Les résultats de

cette étape sont utilisés comme une aide à la décision pour le superviseur du système ou en les introduisant directement dans un système de décision automatique. Les systèmes complexes à l'origine de mes recherches sont les ateliers de production flexibles et les systèmes de production des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, j'expose à travers ce mémoire mon parcours de chercheur dans le domaine du Génie Industriel et de recherche opérationnelle, qui représente un parcours atypique vu la mobilité thématique que j'ai effectué après la thèse. En effet, obtenir l'habilitation à diriger des recherches dans ce domaine, représente pour moi l'aboutissement d'efforts de plusieurs années dans le développement de nouvelles approches, de montage de projets et d'encadrements. Ce mémoire retrace les différentes étapes d'évolution de ma façon de faire de la recherche, où chaque problème a une histoire bien particulière et à la fois très influencé par les étapes précédentes.

Après un diplôme d'ingénieur en automatique de l'école polytechnique d'Alger et un diplôme d'études approfondies à Paris 6 où j'ai travaillé sur des systèmes robotiques intelligents, j'ai effectué un Master automatisation et organisation industrielle durant lequel j'ai découvert des disciplines liées au génie industriel tels que la maintenance ou l'ordonnancement. J'ai poursuivi ensuite avec une thèse en automatique, sur le développement d'interface haptique pour le contrôle de fauteuils roulants intelligents.

J'ai basculé de nouveau vers le génie industriel en intégrant le laboratoire G-SCOP à Grenoble où j'ai travaillé avec le Pr. Michel Tollenaere et le Dr. Samuel Bassetto, sur le développement de plan d'inspection dynamique basé sur le risque, pour les industries du semi conducteur. Par la suite, j'ai intégré le CESI dans le cadre du projet Interreg MerInnovate, qui s'intéresse à l'optimisation de la maintenance des parcs éoliens offshore. J'ai travaillé avec le Dr. David Baudry, le Dr. Anne Louis et le Dr. Belhcène Mazari sur le développement de la simulation de maintenance des parcs éoliens offshore. J'ai beaucoup apprécié ce domaine, d'une part en raison des nombreux bienfaits sur la planète et d'autre part grâce aux champs de recherche qu'il ouvre. J'ai intégré par la suite les équipes d'encadrement des thèses des Drs Mohamed Amin Benatia et José Eloundou qui ont travaillé respectivement sur l'optimisation de placement des capteurs, et l'ordonnancement des tâches de transport dans les ateliers flexibles.

Entre temps, j'ai expérimenté le montage de projets, avec certains concrétisés, tel que le projet CoRoT, visant à développer des robots mobiles pour le transport interne et d'autres auxquels malheureusement, il n'y a pas eu de suite, tel que le projet WindRisk, qui vise à la mise en place d'une politique de maintenance basée sur le risque pour les éoliens offshore. L'acceptation et le lancement du projet CoRoT m'a permis de découvrir une autre façade du travail de chercheur, notamment le montage du projet lui-même, sa gestion, la recherche et la manière de convaincre les éventuels financeurs.

Avec l'équipe du laboratoire LINEACT qui a commencé à grandir petit à petit, j'ai participé dans plusieurs projets tels que les projets Xterm et le projet PcBioD. Ceux-ci s'intéressent respectivement à la simulation et l'optimisation des systèmes complexes, dont les systèmes de production et l'optimisation des systèmes de traitement des biodéchets. J'ai prouvé que l'approche par simulation temporelle et optimisation, y donne tout son intérêt. J'ai aussi participé au montage des projets Locadyn, UV-robot et SosBio, où l'on tente d'améliorer nos approches pour optimiser le fonctionnement de systèmes complexes. Je participe actuellement à l'encadrement de trois thèses financées par ces projets et par la chaire industrielle et de formation

LINEACT CISCO.

Ce document vise à détailler mon parcours, qui, je l'espère, a contribué au développement de la réflexion sur le comportement et le pilotage des systèmes complexes. Il permet au lecteur d'apprécier mon implication et ma motivation à participer à l'amélioration de notre manière de concevoir nos produits et notre énergie. Soit, rendre le travail à l'usine efficace et moins pénible, gagner de l'argent à partir de nos déchets, et obtenir une énergie renouvelable respectueuse de notre environnement, et à moindre coût.

Le présent document expose mon parcours de chercheur en trois parties. La première partie présente mon CV exhaustif, détaillant mon parcours éducatif et mes différentes activités de chercheur : tout d'abord, je donne une synthèse générale de mon profil, et je développe ensuite la partie sur le rayonnement scientifique, mes encadrements de thèses et de stages de recherche. Par la suite, j'aborde les différentes responsabilités exercées, puis je détaille mes activités d'enseignement et de recherche. Je termine cette partie par une exposition de mes publications. La deuxième partie décrit mes plus importantes contributions scientifiques, divisées en quatre chapitres : le premier chapitre concerne mes travaux sur les plans d'inspection dynamique. Le chapitre suivant traite de mes contributions dans l'amélioration du fonctionnement des parcs éoliens offshore ainsi que les systèmes de traitement de déchets conditionnés. Le troisième chapitre de cette partie est consacré à mes travaux sur l'ordonnancement de la tâche de transport dans les ateliers de production. Je termine cette partie par mes travaux sur la collecte, le traitement et l'exploitation des données industrielles. La dernière partie du document contient une présentation de mes perspectives de recherche et une conclusion générale.

Première partie

Travaux de recherche

Cette deuxième partie du document présente le détail de mes travaux de recherche après la thèse de doctorat, leur positionnement et les résultats obtenus. Cette partie est organisée en quatre axes de recherche (chapitres) : le premier dédié à l'optimisation du processus d'inspection dans les ateliers de production flexible, le deuxième traite de la gestion des systèmes de production d'énergie renouvelable, le troisième se concentre sur la logistique interne dans les ateliers de production flexibles et le dernier est consacré à la collecte, traitement et exploitation des données dans l'industrie 4.0.

2

Mise en place de plan d'inspection dynamique

2.1 Introduction

Les produits issus de l'industrie du semi-conducteur sont très présents dans notre quotidien. Des téléphones portables aux voitures, en passant par les ordinateurs et les téléviseurs. Les avancées technologiques ont le point commun d'être associées à l'évolution de l'un des composants élémentaires de l'industrie du semi-conducteur : le circuit intégré.

De plus, les produits développés par l'industrie du semi-conducteur sont des matières premières nécessaires au développement des technologies qui aident à faire face à d'importants défis économiques et sociétaux tels que la pauvreté dans le monde, le changement climatique, les pénuries d'énergie, les questions sécuritaires et la santé. Les évolutions qu'a connu cette industrie ont toujours été des événements dépendants, et souvent précurseurs des avancées technologiques dans différents domaines en forte relation avec la recherche fondamentale et appliquée. En particulier, le « génie industriel » a joué et joue encore un rôle fondamental pendant le cycle de vie d'un produit micro-électronique depuis l'analyse du besoin jusqu'à la mise en rebut et/ou le recyclage. Les produits micro-électroniques de nos jours sont de plus en plus intelligents, de plus en plus puissants,... et de moins en moins chers. L'augmentation exponentielle de la complexité des composants à base de semi-conducteurs a permis d'avoir de tels produits, mais a amené en même temps les industriels à faire face à de nouveaux défis liés à la conception et à l'industrialisation. Un autre défi auquel l'industrie des semi-conducteurs fait face concerne la durée, relativement courte, de la production d'une technologie de produits micro-électroniques qui est de l'ordre de 3 ans au maximum. La mise sur le marché d'un nouveau produit doit être rapide, en garantissant la meilleure qualité et les meilleurs prix, pour faire face à une concurrence de plus en plus rude. La compétitivité d'une entreprise dans ce secteur, comme dans tout autre secteur, passe donc par une maîtrise parfaite de son système de production dans ses dimensions technologiques, fonctionnelles, organisationnelles et humaines, essence du génie industriel.

Le contexte très concurrentiel entre les géants de l'industrie du semi-conducteur pousse chacun à trouver des solutions pour diminuer continuellement le coût de chaque activité intervenant dans la conception ou la fabrication des produits micro-électroniques. La loi ou la prophétie de Moor, qui stipule que le nombre de transistors dans une puce est doublé tous les 18 mois, a fait que le cycle de vie des produits semi-conducteurs est court, ce qui oblige chaque entreprise à fournir des efforts considérables pour innover continuellement afin de maintenir leurs systèmes

de production capables de s'adapter rapidement, et avec le moindre coût, aux nouvelles générations de produits. La complexité des systèmes de production de semi-conducteurs, notamment les ateliers avec un grand nombre de produits et faibles volumes, génère souvent une variabilité importante dans le système de production. La variabilité étant considérée comme l'inverse de la qualité, sa maîtrise est donc synonyme de maîtrise de la qualité des produits et des processus PILLET, 1995.

D'une manière générale, la maîtrise des processus dans l'industrie ou leur variabilité est basée sur la mesure d'indicateurs de performances, qui utilise des moyens selon un plan prédéfini appelé plan de surveillance. Des actions peuvent être entreprises pour éliminer ou réduire cette variabilité détectée.

En effet, le processus de contrôle est composé de trois étapes :

- La mesure ou d'inspection des paramètres du produit, d'outil de production ou de processus de fabrication,
- L'analyse des données obtenues par les mesures,
- Le diagnostic (si détection d'anomalie) pour trouver les causes et décider des actions à exécuter sur le processus de fabrication pour le remettre dans les conditions normales de fonctionnement ou l'améliorer.

Le contrôle des processus dans l'industrie semi-conducteur est une activité très sensible vu la durée et la complexité des inspections, ainsi que le coût des moyens d'inspection.

L'échantillonnage des inspections devient obligatoire dans une telle situation, surtout si l'on se base sur ces inspections, non seulement pour qualifier la qualité des produits, mais aussi celle des outils de production. Ce chapitre résume mes travaux dans le cadre du projet Improve durant mon poste d'ingénieur de recherche au laboratoire G-SCOP. Le reste du chapitre est organisé comme suit : une vue générale sur le processus de fabrication dans le monde du semi-conducteur et le positionnement de mes travaux dans ce contexte.

2.2 Processus de fabrication dans le domaine du semi-conducteur

Les produits basés sur la micro-électronique sont très présents dans notre quotidien. Téléphones portables, voitures, ordinateurs, téléviseurs... Les avancées technologiques ont le point commun d'être associées à l'évolution de l'un des composants élémentaires de l'industrie du semi-conducteur, le circuit intégré, qui peut être un processeur, une mémoire, un capteur, ... La fabrication de ces puces est une tâche complexe composée en moyenne de plus de 700 opérations de fabrication et d'inspection et se déroule sur plusieurs semaines (2 mois environ pour un processeur) à l'intérieur de l'atelier de production.

Face à un contexte économique complexe, une concurrence internationale et une demande de plus en plus exigeante et variable, l'industrie du semi-conducteur est contrainte d'améliorer continuellement sa performance, en augmentant son rendement, et en réduisant ses coûts et ses délais. L'une des caractéristiques du milieu semi-conducteur est le coût très élevé des moyens de production. Ceci met encore plus de pression sur ses entreprises pour qu'elles rentabilisent leur investissements. L'innovation et la recherche sont les meilleurs moyens que ces entreprises ont trouvé pour atteindre leurs objectifs. En effet, une étude de la commission Européenne a conclu que ce secteur est classé premier en terme d'investissement dans la recherche et développement en Europe. Les principales caractéristiques de ce secteur peuvent être résumées en :

- Un grande complexité de la production : ceci est dû principalement au grand nombre d'opérations et d'inspections, le nombre important de types de produits dans le même atelier, la délicatesse des opérations où les spécifications en terme de qualités sont très élevées et l'interaction dynamique entre les différentes étapes de processus. Ceci qui augmente le risque de contamination et le taux de propagation d'erreurs.
- Un environnement incertain : le flux des produits dans une telle complexité génère plusieurs phénomènes aléatoires qui augmentent l'incertitude sur les délais, la qualité, et les quantités des produits. Ajouté à cela, les multiples interventions humaines, qui ne font qu'augmenter la variabilité des indicateurs de performance de l'atelier de production.
- Une grande valeur ajoutée : le nombre d'opérations de ce processus fait que les dernières étapes de production sont critiques, puisque la valeur d'un wafer (au moins de 10 € au début du processus) peut dépasser les centaines de milliers d'€ à la fin du processus.
- Concurrence interne : dans ce secteur, chaque service essaie de défendre ses propres intérêts. Par exemple, le service design de produit essaie d'utiliser les meilleurs outils de production pour fabriquer ses produits, même s'ils doivent faire appel à d'autres entreprises. De son côté, le service de production essaie de récupérer de plus en plus de commandes pour rentabiliser ses outils de production, même s'il fait appel à d'autres entreprises qui cherchent elles aussi où produire. Par exemple, dans la fab de STMicroelectronics, on retrouve des produits d'IBM ou de Samsung, et inversement, des produits de ST en fabrication chez IBM.

Dans la suite de cette section, nous allons donner un bref aperçu des différentes étapes de la fabrication semi-conducteur afin de positionner les travaux que j'ai mené.

2.2.1 Étapes de fabrication d'un circuit intégré

Pour fabriquer une puce "*Circuit Intégré (CI)*", un wafer subit plusieurs opérations sur différents équipements. Un atelier de production semi-conducteur est divisé en différents sous-ateliers d'une zone appelée salle blanche (Fab), où l'environnement est strictement contrôlé et surveillé et doit atteindre des degrés élevés de propreté, en maîtrisant le nombre de particules par mètre cube (ISO 14644-1, 2015).

La toute première étape consiste à extraire, à partir du sable, des plaques de silicium monocristallin ultra pure. Il est découpé par la suite en minces plaques appelées wafers de 200, 300 ou 450 millimètres de diamètre avec une épaisseur de l'ordre de 0.7 mm. Les wafers entrent dans la salle blanche divisée en deux grandes parties : l'usine de Front-end et l'usine de back-end comme le montre la Figure 2.1. Dans l'usine de Front-end, le wafer subit des opérations élémentaires dans les différents ateliers de la fab BETTAYEB, 2012. Nous y retrouvons principalement des opérations de photolithographie, de dépôt de films minces (CVD), de gravure physico-chimique (ETCH), de nettoyage humide (WET), de polissage mécanochimique (CMP) et d'implantation ionique (IMP), d'isolation et d'interconnexion. Cette partie de l'usine utilise des liquides et des gazs ultra purs pour les opérations de dépôts, et des masques pour les opérations de gravures. Plusieurs opérations de tests sont effectuées pour valider le bon déroulement du processus. Cette étape génère des wafers avec des puces terminées sur wafer. Le wafer continue son processus

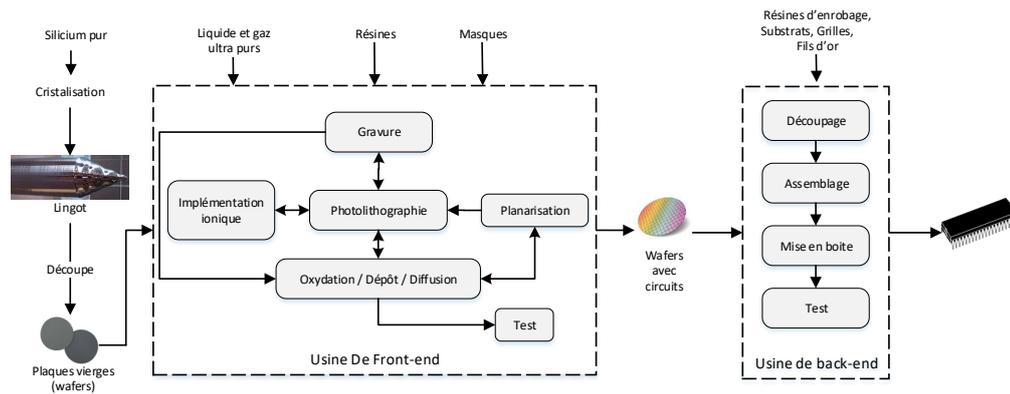


FIGURE 2.1 – Processus de fabrication des circuits intégrés

dans l'usine de back-end où il subit une dernière série d'opérations pour la préparation des puces : le découpage, l'assemblage, la mise en boîte et le test des puces électroniques. Plusieurs types de résines, des grilles et des fils d'or sont utilisés pour réaliser ces opérations.

2.3 La maîtrise des procédés

Le processus de fabrication dans les ateliers semi-conducteur est en constante amélioration à cause de l'évolution des produits qui demande des équipements de plus en plus pointus dans un système de production de plus en plus complexe. La qualité des produits passe aussi par un état de fonctionnement parfait des outils de production et un processus de fabrication optimal en terme d'exécution des opérations et de respect des délais (de processus et de clients). Deux activités sont responsables de la maîtrise de cette activité qui sont la "maintenance industrielle" et le "contrôle des procédés".

Les actions de maintenance sont souvent vus comme un mal nécessaire (SHERWIN, 2000), que si l'on peut éviter, on gagnera en disponibilité des outils de production. Plusieurs recherches travaillent sur l'optimisation des plans de maintenance afin de réduire leur coût et augmenter la disponibilité des outils de production. D'un autre côté, l'entreprise doit satisfaire d'autres engagements en terme de délais et de qualité, qui demandent un suivi minutieux de déroulement des opérations. Ce suivi est assuré grâce à des inspections effectués toute au long du déroulement du processus. Les étapes de contrôle sont souvent multiples, et on surveille l'évolution de déroulement des opérations et les états des machines, grâce à des capteurs installés sur les machines, sur les produits et dans l'atelier.

La complexité des processus de production dans l'industrie semi conducteur fait que les méthodes traditionnelles pour l'établissement de plan de maintenance et d'inspections ne sont pas efficaces. En effet, pour améliorer cette situation, il faut ajuster les contrôles dynamiquement, et développer des méthodes pour avoir une estimation exacte et rapide des états des machines de production et des produits. Mes contributions dans ce domaine ont pour objectif de développer des méthodes et outils pour augmenter le nombre de maintenance prédictive et augmenter l'efficacité des inspections.

2.4 Mes contributions la maitrise de processus de fabrication semi-conducteur

Mes contributions dans ce domaine se sont déroulées au laboratoire G-SCOP dans le cadre d'un projet Européen FP7 IMROVE, dirigé par STMicroelectronics de Crolle. Le projet IMROVE regroupe 37 partenaires : des industriels du monde du semi-conducteur, des académiques et des sociétés de développement logiciel en Europe. Il se compose de 7 volets ou Modules de Travail (Work-Packages en anglais) dont trois (WP2, WP3 et WP4) représentent les axes de recherche majeurs visés par le projet :

- WP2 : Développement de la métrologie virtuelle
- WP3 : Développement de la maintenance prédictive (PdM)
- WP4 : Développement du plan de surveillance dynamique

Les développements que nous avons effectué concernent le WP3 et le WP4 principalement. Quelques travaux ont continué après ce projet pour la généralisation des méthodes développées à d'autres types d'industrie. Je peux résumer mes contributions en trois problématiques : le première problématique concerne l'estimation de l'état des machines de production pour entamer par la suite des actions de maintenance prédictive, et des actions d'inspection en cas de doute sur les performances des machines de production. Le deuxième point concernera le développement d'un indicateur de risque de perte massive de produit, et l'adaptation des inspections en fonction de cet indicateur. Grâce à cela, nous avons proposé un algorithme de skipping des inspections permettant de réduire le nombre d'inspection en réduisant le nombre de produits. Une dernière contribution sur ce sujet concerne l'optimisation multi-objective du plan de contrôle dynamique.

2.4.1 Définition d'une stratégie de "skipping" des inspections hors-ligne

La problématique que nous avons traité trouve ses racines dans les usines Front-End des ateliers de fabrication des semi-conducteurs. En effet, le contrôle des particules est effectué sur les produits après avoir subit des opérations de dépôt de matière ou de gravure. Deux types de contrôle peuvent être effectués : ceux qui sont liés directement à la machine de fabrication et ceux séparés de la machine de fabrication. À cause de ses nombreux avantages le contrôle séparé devient de plus en plus privilégié (ARNOLD et al., 2017). Dans ce cas, les résultats des inspections sont non seulement utilisés pour qualifier la qualité des produits, mais aussi celle du fonctionnement de la machine de production. En effet, utiliser les données pour la surveillance des produits et des processus est une pratique courante dans le contrôle statistique des processus et des contrôles d'acceptation. Ces mesures sont au cœur du processus de contrôle de la défektivité et de contrôle du rendement (KUMAR et al., 2006).

Afin de clarifier le problème, prenons un exemple simplifié : le contrôle de la contamination des wafers par des résidus de poussière qui peuvent être déposés après leurs passage dans un outil (ou machine) T de gravure. Le niveau de contamination D augmente avec le nombre de produits traité par la machine. Si un produit est fabriqué à l'aide de l'outil T , il ajoute des résidus qui peuvent contaminer les autres produits qui passent par la même machine. L'outil T est considéré comme encrassé si le niveau D , mesuré sur le produit, est supérieur à un seuil UL_{Dust} . Dans ce cas, le produit est également étiqueté comme défectueux et peut être lavé ou mis au rebut. En dessous de cette limite, le produit et l'outil sont considérés comme

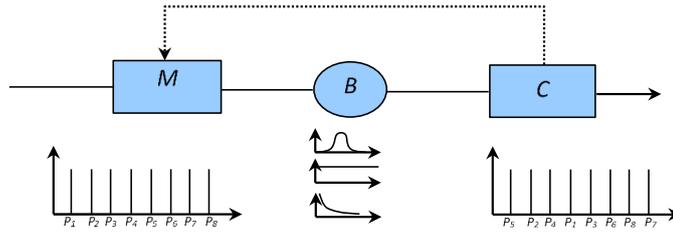


FIGURE 2.2 – Système de production à une machine de production et une machine d'inspection

propres. Supposons une séquence de 10 produits de P_1 à P_{10} , produite avec T et le plan d'échantillonnage d'inspection associé, qui consiste à contrôler seulement P_1 et P_{10} . Lors du contrôle de P_1 , s'il est propre, alors le plan de production se poursuit. Par contre, s'il est mesuré comme défectueux, une opération de nettoyage doit être effectuée sur T et P_1 (si possible). Lors de contrôle du produit P_{10} , si D est inférieur à UL_{Dust} , on peut déduire ou supposer que les produits depuis P_1 (c-à-d $P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_9$) sont propres. Par contre si P_{10} est défectueux, on ne peut rien conclure parce que le seuil D aurait pu être dépassé à n'importe quel moment depuis le passage de P_1 .

Si on suppose que le plan d'inspection prend tous les produits (un plan avec 100% d'inspection), la complexité du système de production fait que le temps passé entre la production et l'inspection suit une lois stochastique comme le montre la Figure 2.2. Le temps passé entre la production et l'inspection est représenté par un stock tampon B où les temps d'attente suivent une loi de probabilité imposée par le temps de traversé. Dans l'exemple illustré dans la Figure 2.2 le produit P_1 est fabriqué en premier mais inspecté en quatrième position à cause du comportement du buffer. Quand les produits ne sont pas inspectés dans leur ordre de production, le résultats d'inspection peuvent être connu d'avance, notamment pour un phénomène tel que la contamination. Le fait d'inspecter, par exemple, le produit P_4 avant le produit P_1 , alors que P_1 a été fabriqué avant P_4 , permet de dire que si l'inspection de P_4 le valide (produit propre) alors le produit P_1 est également propre. Il faut bien-sûr supposer qu'aucune opération de maintenance (nettoyage) n'a été effectuée sur la machine M entre le moment de production de P_1 et le moment de production de P_4 . Cette observation permet de conclure que dans les ateliers des semi-conducteurs, il est possible que des inspections n'apporte aucune connaissance supplémentaire ni sur la qualité du produit ni sur l'état de la machine. Nous avons proposé un indicateur appelé le $W@R$ (Wafers at risk) permettant de quantifier cette valeur ajoutée de l'inspection et de développer un algorithme permettant d'éviter ces inspections inutiles.

Positionnement du problème

Dans l'industrie des semi-conducteurs, plusieurs auteurs se sont focalisés sur l'étude de l'adaptation des contrôles, l'impact des inspections sur le rendement et la variation des risques en fonction des inspections. Sur la base d'un modèle économique qui prend en compte la réutilisation des données issues des outils de contrôle statistique des procédés ou SPC (Statistical Process Control) lors des enquêtes sur

les rendements et les rebuts, BAUD-LAVIGNE, BASSETTO et PENZ, 2010 ont présenté comment les contrôles qualité peuvent être libérés grâce aux courbes d'apprentissage. BOUSETTA et CROSS, 2005, MOULI et SCOTT, 2007 et PURDY, 2007 ont présenté le développement industriel visant la maîtrise adaptative de la inspections, en termes d'évolution des rendements, de capacité d'inspection et de risques. Parmi ces trois articles, le premier présente une stratégie d'échantillonnage en comptant le nombre de plaquettes passées sur les outils de métrologie. La seconde fournit un mécanisme pour mettre à jour le contrôle des excursions du procédé. La troisième présente une architecture générique pour mettre à jour le contrôle des risques rencontrés en cours de production. Cette dernière présente tout un développement, qui semble améliorer les performances du contrôle qualité. Le fruit de ces développements est le concept d'un environnement de lot, appelé Partition, qui est utilisé pour calculer un indicateur de risque. Toutefois, ils ne fournissent pas d'autres explications sur la manière dont ils identifient l'indice de risque ni sur sa représentativité. Le problème présenté dans ces travaux peut être vu comme un problème de re-allocation d'inspection à cause du comportement du buffer et la nature des variables surveillées. En effet, les outils d'inspection peuvent inspecter des produits autres que ceux définis par le plan d'inspection prévisionnel grâce à la mise à jours des données concernant le produit.

Le domaine de l'allocation d'inspection fait l'objet de plusieurs recherche depuis les travaux de (LINDSAY et BISHOP, 1964). En ce qui concerne le domaine des semi-conducteurs, on trouve plusieurs travaux tels que ceux menés par (VILLALOBOS, FOSTER et DISNEY, 1993) qui ont proposé un mécanisme d'inspection flexible basé sur les chaînes de Markov pour les systèmes de productions en série et multi-niveaux. (VERDUZCO, VILLALOBOS et VEGA, 2001) ont optimisé les risques d'erreur de type I et II lors de chaque inspection en rapprochant le problème à un problème de sac à dos. (BEAN, 1997) développe un indicateur utilisé pour l'inspection dynamique des produits. Cet indicateur est nommé Material At Risk (MAR) et il est défini comme étant les produits qui peuvent être impacté entre deux échantillons. Il est évident que plus on avance dans le processus plus l'incertitude sur la qualité des produits augmente ainsi que la nécessité de faire des contrôles (KALLEN et NOORTWIJK, 2005).

L'originalité de ce travail consiste dans le fait qu'il propose de ne pas faire des inspections programmées à cause de la gestion des opérations. Comme je l'ai démontré à travers l'exemple présenté plus haut, l'inspection des produits peut être influencée par la gestion et le déroulement des opérations, notamment le comportement des transporteurs entre les machines et aussi les comportements des machines elles mêmes (production ou contrôle).

Je partage l'avis de (COLLEDANI et TOLIO, 2009) selon laquelle les modèles à la fois qualitative et de quantitative sont rares dans la littérature. HSU et TAPIERO, 1989 ont été les pionniers dans ce domaine en proposant un lien entre la gestion des opérations et les cartes de contrôle SPC. (KIM et GERSHWIN, 2005) et (COLLEDANI, 2008) ont présenté des travaux sur la façon dont la qualité et le contrôle des opérations peuvent être liés. Cependant, aucun de ces travaux ne modélise une éventuelle relâche de mesures, en raison de la gestion des opérations, ni l'impact des modèles sur la gestion des risques.

Toutes les industries des semi-conducteurs doivent fournir des analyses actualisées des effets de mode de défaillance et de criticité (AMDEC) sur leurs outils, procédés et produits afin d'assurer leur capacité de production au client. Ces analyses couvrent la gestion du risque opérationnel, que l'on peut définir comme l'obtention et l'évaluation de l'atténuation et du suivi des "événements redoutables, au regard des enjeux". (TIXIER et al., 2002) font un survol général des méthodes modernes

de maîtrise des risques. Des mesures sont effectuées sur les produits, les processus et les outils afin de détecter les dérives et autres risques opérationnels possibles qui peuvent survenir. Cependant, très peu de travaux établissent un lien réel entre l'analyse et la détection des risques. Par exemple (PILLET et al., 2007) ont été les premiers à établir des liens directs entre les plans de contrôle et le risque en proposant une matrice d'impact. Plus tard, (MILI et al., 2009) ont défini les priorités de maintenance et les actions d'amélioration basées sur le risque. Ce travail peut servir pour des décisions tactiques et ne fournit pas de détails sur la façon de mettre à jour les contrôles au niveau opérationnel. Le projet IMPROVE a beaucoup participé à la considération des actions basées sur le risque ainsi qu'à son évaluation notamment avec les travaux de (BETTAYEB, 2012) et (BOUAZIZ, 2012).

À l'intersection entre la gestion des risques et de la gestion des opérations, la recherche semble très prometteuse, alors qu'elle a reçu moins d'attention de la part des chercheurs, ce qui est surprenant, notamment le fait de relâcher des contrôles.

Modélisation du relâchement dynamique des contrôles

L'objectif de cette partie est de comprendre et modéliser le phénomène présenté dans la problématique afin d'évoluer vers un plan de contrôle qualité dynamique, appliqué à la mesure des particules dans les ateliers Front-end des industries de semi-conducteurs. Afin de cadrer l'étude nous avons émis les suppositions suivantes :

- *Supposition 1* : Le modèle considéré concerne un outil de production, un tampon (composé du tampon de sortie de l'outil de fabrication, du tampon de transport à l'intérieur de l'usine - le tampon d'entrée de l'outil d'inspection) et d'un dispositif d'inspection. Ce modèle très simplifié ne correspond pas à la réalité mais permet le développement d'un modèle généralisable.
- *Supposition 2* : Le problème de savoir pourquoi les produits sont reprogrammés dans le tampon n'est pas pris en compte dans ce travail. Plusieurs facteurs entrent en jeu, notamment le plan de contrôle, la capacité de mesure, le transport et le type d'information relative aux produits. Le temps d'attente du produit entre l'opération de fabrication et l'opération de contrôle n'est modélisé qu'avec une loi de probabilité uniforme.
- *Supposition 3* : L'outil d'inspection ou de contrôle se comporte parfaitement par rapport au phénomène observé sur le produit : les erreurs de type I et de type II sont négligées dans ce premier modèle. Le temps de mesure est considéré comme constant, t_{Ctrl} . Les informations sur la pureté de la plaquette sont supposées être disponibles immédiatement après la fin de l'opération d'inspection.
- *Supposition 4* : L'opération de contrôle s'effectue sur un seul paramètre, qui se comporte de manière monotone. Dans les développements présentés ci-dessous, il est considéré comme un phénomène croissant de dépôt de particules, de graisse ou de peinture. Plus les marchandises produites sont nombreuses, plus la contamination par de nouveaux produits est importante.
- *Supposition 5* : Les données obtenues sur les variables du produit permettent d'inférer des informations sur la fonctionnalité du produit et sur le comportement de l'outil de production. C'est le cas de la contamination (poussière, ionique, graisse, etc.) des produits propres comme les wafers ou les dispositifs médicaux.

- *Supposition 6* : L'opération de contrôle, C , compare la valeur d'un paramètre nommé Def , mesurée sur le i^{me} produit nommé P_i , avec une limite appelée UL_{Def} . Un produit est considéré comme non défectueux si son inspection donne un résultat inférieure à UL_{Def} .
- *Supposition 7* : Le modèle est fonctionnel entre deux actions de qualification ou de maintenance sur l'outil de production. Le temps écoulé entre ces deux actions est appelé cycle de production et désigné par PC .
- *Supposition 8* : Dans un souci de simplification, l'outil de fabrication T produit des produits de manière régulière pour chaque τ seconde, et suit un comportement déterministe. Nous considérons que $\tau \propto PC$. Donc, pendant une période PC , T produit toujours le même nombre de produits $N_p = PC/\tau$.
- *Supposition 9* : Le plan de contrôle initiale est fixé à 100 %. Chaque produit fabriqué doit être mesuré. Ce plan doit changer si on trouve que la mesure n'apporte aucune valeur ajoutée.
- *Supposition 10* : La probabilité qu'un i^{me} produit soit propre dépend du nombre de produits qui sont passés depuis le dernier événement de maintenance ou la qualification de la machine de production (en raison de l'hypothèse 7).

$$p(P_i \text{ est propre}) \propto \left(\frac{1}{\text{nombre de produit depuis le dernier évènement}} \right)^\alpha$$

Où : α est un paramètre propre au processus. À cause de Supposition 7, on peut écrire l'équation précédente comme suit :

$$p(P_i \text{ est propre}) \propto \left(\frac{1}{i} \right)^\alpha$$

Le tampon B suit une loi de probabilité de densité L . La probabilité qu'un produit sort du tampon B avant t_B est donnée par la formule suivante :

$$p = \int_0^{t_B} L(x) dx$$

Notons que $t_C(P_i)$ est le temps où l'information sur P_i est disponible et $t_P(P_i)$ est le temps où P_i est fabriqué, et $t_B(P_i)$ est le temps écoulé par P_i dans le tampon B .

On peut donc écrire :

$\forall (i, j) \in [1; PC/\tau]^2 / j > i$, P_i peut être libéré d'inspection si et seulement si les conditions 1 et 2 sont vérifiées :

- Condition 1 : $t_C(P_j) \leq t_C(P_i)$
- Condition 2 : P_j est propre

Évaluons maintenant la probabilité que ces deux conditions s'appliquent à un produit particulier.

Probabilité de la condition 1 :

$$t_P(P_i) = i \times \tau, \quad t_P(P_j) = j \times \tau$$

le tampon B se comporte comme un générateur de retard.

$$t_C(P_i) = t_B(P_i) + t_P(P_i) = t_B(P_i) + i \times \tau + t_{Ctrl}$$

$$t_C(P_i) = t_B(P_i) + t_P(P_i) = t_B(P_i) + i \times \tau + t_{Ctrl}$$

$$\begin{aligned} \text{La condition 1 est vérifiée} &\Leftrightarrow t_C(P_j) \leq t_C(P_i) \\ &\Leftrightarrow t_{Ctrl} + t_B(P_j) + j \times \tau \leq t_B(P_i) + i \times \tau + t_{Ctrl} \\ &\Leftrightarrow t_B(P_j) \leq t_B(P_i) - \tau \times (j - i) \end{aligned}$$

En terme de probabilité que ces événements se produisent pour le produit P_i

Cas 1 : $\tau \times (j - i) \leq t_B(P_i)$; cela veut dire que le produit j est inspecté après l'inspection du produit i .

Cas 2 :

$$\begin{aligned} \tau \times (j - i) &= t_B(P_i) \\ p(t_C(P_j)) &= t_C(P_j) = p(t_B(P_j) = 0) \\ L(0) &= \int_0^0 l(x) dx \end{aligned}$$

Ce cas n'est pas possible avec une seule machine de production et une machine d'inspection.

Cas 3 : $\tau \times (j - i) < t_B(P_i)$; cela veut dire que la probabilité que le produit j soit inspecté avant le produit i . Dans ce cas l'inspection du produit i peut être relâchée.

Les cas 1 à 3 sont valables pour chaque produit fabriqué au cours du cycle de traitement.

Probabilité de la condition 2 : P_j doit également être propre. Cependant, le dernier événement de qualification de l'outil de production T doit être antérieur à i . Par contre, rien ne peut être déduit concernant la propreté de P_j .

$$p(P_j \text{ est propre}) \propto \left(\frac{1}{j}\right)^\alpha$$

Probabilité qu'un produit P_i saute le contrôle : Notons R , l'ensemble des produits qui peuvent être libérés. Durant la production, R augmente au fur et à mesure que les produits vérifient les conditions 1 et 2. Après un cycle de fabrication,

$$R = \{P_i/i \in [1; PC/\tau]\}$$

et

$$\exists j \in [1; PC/\tau] / j > i$$

et

$$t_B(P_j) < \int_0^{t_B(P_j) - \tau(j-i)} L(x) dx$$

et

$$P_j \text{ est propre}$$

Un produit P_i particulier appartient à R , s'il y a au moins un produit fabriqué après P_i , qui est mesuré avant et qui est propre. Ces produits peuvent être P_{i+1} , P_{i+2} , ..., P_{k^*} .

Où : k^* peut être l'indice du produit satisfaisant les conditions suivantes :

- le dernier produit est fabriqué dans le cycle de production concerné (entre deux qualifications de la machine T) : $k^* \leq \frac{PC}{\tau}$
- le temps passé entre les produits P_i et P_{k^*} est à la limite du temps d'attente P_i dans le tampon B :

- $t_B(P_i) > \tau(k^* - i)$
- $t_B(P_i) \leq \tau(k^* + 1 - i)$

La probabilité que P_i appartienne à \mathbb{R} est :

$$\begin{aligned}
p(P_i \in \mathbb{R}) &= P(\quad [P_{i+1} \text{ arrive à C avant } P_i \wedge P_{i+1} \text{ est propre}] \\
&\quad \vee [P_{i+2} \text{ arrive à C avant } P_i \wedge P_{i+2} \text{ est propre}] \\
&\quad \vee \dots \\
&\quad \vee [P_{i+k^*} \text{ arrive à C avant } P_i \wedge P_{i+k^*} \text{ est propre}]) \\
&= \sum_{m=i+1}^{k^*} P(P_{i+m} \text{ arrive à C avant } P_i \wedge P_{i+m} \text{ est propre}) \\
&\Leftrightarrow \sum_{m=i+1}^{k^*} t_B(P_m) < \int_0^{t_B(P_i) - \tau(m-i)} l(x) dx \times P(P_{i+m} \text{ est propre}) \\
&\Leftrightarrow \sum_{m=i+1}^{k^*} t_B(P_m) < \int_0^{t_B(P_i) - \tau(m-i)} l(x) dx \times \left(\frac{1}{i+m}\right)^\alpha
\end{aligned}$$

Algorithme Cette formulation est générique pour chaque produit fabriqué dans un cycle de production. Afin de déterminer la $\text{Card}\mathbb{R}$, cette probabilité doit être évaluée pour chaque produit fabriqué dans le cycle. Cette somme peut être simulée en sachant 1 et α . Bien sûr, $t_B(P_i)$ sont définis lorsque la simulation atteint la i^{me} étape. L'algorithme est présenté

Algorithm 1 algorithm du skipping

```

//Initialize variables
Initialize  $E(t_E)$ 
Initialize  $PC$ 
Initialize  $\tau$ 
Initialize  $\alpha$ 
 $\text{Card}(\mathbb{R}) \leftarrow 0$ 
for all  $P_i$  fabriqué durant  $PC$  do
  if  $P_i$  est marqué pour contrôle then
     $t_B(P_i) \leftarrow \text{Randomize}(l)$ 
     $t_C(P_i) \leftarrow i + t_B(P_i)$ 
  end if
   $i \leftarrow i + 1$ 
end for
Trier le tampon de sortie de la commande, en ce qui concerne la valeur de  $t_C(P_i)$ 
//Calcul de  $\text{Card}(\mathbb{R})$ 
for all  $P_j$  à l'intérieur de la pile de contrôle do
   $P(P_j \text{ est propre}) \leftarrow \frac{1}{j - (E(t_E) + 1)^\alpha}$ 
  if  $P(P_j \text{ est propre}) > \text{Random}$  then
    Le produit est sale, rien ne peut être déduit du produit précédent (le cas échéant)
     $E(t_E) \leftarrow j$ 
  else
     $P_j$  est propre
     $List \leftarrow$  Tous les produits fabriqué avant  $P_j$  et qui n'ont pas été contrôlé
     $\text{Card } \mathbb{R} \leftarrow$  taille de  $List$ 
  end if
end for

```

Comme le tampon B se comporte de manière stochastique, il n'y a aucune raison que cette probabilité soit systématiquement nulle ce qui fait que $\text{Card}(\mathbb{R}) \geq 0$. Le

TABLE 2.1 – Exemple d'inspection et de production de 10 produits

Produit	$t_B(P_i)$	$t_C(P_i)$	classe- ment dans le tampon	niveau de risque	proba d'être défec- tueux	Cont- rôle	résultats
P_1	57	58	6	1			
P_2	3	5	1	2	0.7	0.1	propre
P_3	84	87	7	1		N/A	
P_4	87	91	8	2		N/A	
P_5	10	20	3	3		N/A	
P_6	73	79	5	4		N/A	
P_7	47	54	4	5		N/A	
P_8	9	17	2	6	0.35	0.3	Propre
P_9	28	37	3	1	0.33	0.6	Défectueux
P_{10}	76	86	6	1		N/A	Défectueux

taux de contrôle initial étant de 1 si l'on considère que $Card(\mathbb{R}) \geq 0$, le nouveau taux d'échantillonnage est $1 - \frac{PC}{Card(\mathbb{R}) \times \tau}$.

Plusieurs problèmes se posent à ce niveau :

- Déterminer la cardinalité de \mathbb{R} de manière exacte.
- L'évaluation de $P(P_i \text{ est propre})$ dépend fortement du comportement du risque surveillé. D'autres fonctions de probabilité auraient pu être choisies.

Exemple de calcul de relâchement d'inspection basé sur le risque :

Du premier produit au premier contrôle, le plan de contrôle est fixé à 100%, $\tau = 0.5$ s et $\tau = 1$ s. Dans cet exemple, $t_C(P_i)$ est connu, conduisant à un classement du produit derrière l'outil de mesure. Le produit P_1 est produit à l'instant 1 s et contrôlé à l'instant 58 s. Le produit P_2 est produit à l'instant 2 et contrôlé à l'instant 5 s, comme on peut le voir sur le tableau 2.1. Il est clair que dans cette liste, le deuxième produit est le premier à être mesuré. Sa probabilité d'être propre suit la loi de l'hypothèse 10, qui mène à 0,7. Comme l'inspection récupère une valeur inférieure à cette limite(0.2), le produit est considéré comme propre. On peut conclure que le premier produit est également déclaré propre et on peut relâcher son contrôle.

- Première inspection : c'est le produit P_2 qui est inspecté. Comme le résultat est propre, donc il valide le produit P_1 qui arrivera à l'inspection bien plus tard
- Deuxième inspection : le deuxième produit qui arrive au contrôle est, selon le tableau 2.1, le produit P_8 . Il validera donc tous les produits depuis la dernière inspection qui est effectuée sur le produit P_2 . Sa probabilité d'être propre est égale à 0,35. Comme la mesure indique une valeur de 0,3, P_8 est également déclaré propre. Cela implique que les contrôles des produits P_3 à P_7 sont aussi validés par cette inspection et donc on peut relâcher le contrôle sur ces produits.
- Troisième mesure : Pour cette inspection le produit P_9 est contrôlé défectueux et une action de nettoyage sur le produit et sur la machine de production T sont menées. La prochaine inspection sera aussi relâchée et le produit P_{10} est considéré comme défectueux puisque nous avons supposé que les auto-réparations des machines ne sont pas possibles. Ce produits sera aussi renvoyé vers le nettoyage ou le rebut.

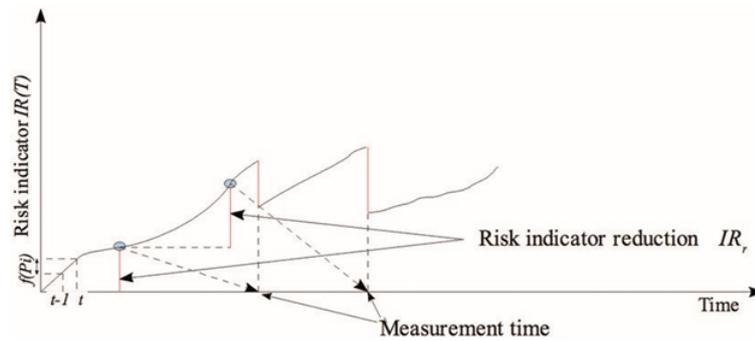


FIGURE 2.3 – Évolution du risque quand le tampon est un FIFO

Application industrielle

Afin d'exploiter les propriétés présentées ci-dessus, un outil d'aide à la décision est introduit. Comme mentionné précédemment, bien qu'un produit n'ait pas été mesuré, il est considéré comme suspect, tout comme l'outil. Un plan d'échantillonnage à 100% est souvent idéal pour les activités de contrôle des procédés si on dispose de la capacité nécessaire. L'échantillonnage implique que certains produits ne sont pas contrôlés et peuvent se révéler défectueux après avoir suivi leur plan de production. Un estimateur du risque est utilisé pour assurer la compréhension opérationnelle de l'impact de l'échantillonnage. Au niveau de l'exploitation, l'accent est mis sur la quantité de produits traités et potentiellement affectés par un défaut. Cet estimateur compte le nombre de produits potentiellement mauvais. Il mesure le risque de perte massive de produits dans les ateliers de fabrication de semi-conducteurs. Il ne s'agit pas d'un estimateur du comportement du phénomène surveillé, en l'occurrence la défectivité. La probabilité qu'un produit ait été contaminé est indépendante de cet indicateur.

La Figure 2.3 illustre cet indicateur. Ce compteur est également connu sous le nom de MAR (BEAN, 1997), et appelé opérationnellement wafers-at-risk ($W@R$). Ce concept comporte trois volets :

- Du point de vue de l'équipement de production T , chaque fois qu'il fabrique un produit, un compteur, appelé $IR(T)$ est augmenté. C'est le nombre de produits potentiellement affectés par la dérive de l'outil. Dans le reste, il sera également appelé "indicateur de risque pour l'outil T ". Cela dépend du nombre de produits fabriqués.
- Du point de vue produit, lorsqu'il est fabriqué, il reçoit la valeur du risque à ce moment là, $IR(P_i) = IR(T_i)$. Chaque fois qu'un produit est contrôlé, grâce à l'hypothèse 5, cet indicateur évolue.
- Notons que $IR_r(P_i)$ est la valeur de la réduction de $IR(T)$, associé à une inspection de P_i . Cette valeur est un pivot pour évaluer l'information détenue par le produit.

Avec de telles définitions, il existe une correspondance directe entre l'information ajoutée par un produit et le risque pris par la production ou le contrôle. Cet indicateur a été et reste le moyen de communication le plus efficace avec les équipes opérationnelles sur l'action de relâcher des inspections puisqu'il est plus facile à manipuler que les probabilités.

À l'instant t_i , si le produit est contrôlé immédiatement après sa fabrication, s'il est déclaré propre et s'il s'agit du premier produit à mesurer depuis la dernière qualification de l'outil T , les produits fabriqués avant lui sont relâchés en inspection, et

le niveau de risque est réduit de : $IR_r(P_i) = IR(T_i)$.

Considérant qu'un produit P_i ajoute à $IR(T_i)$ une valeur $f(P_i)$ (typiquement f est une fonction de valeur fixe égale à 1 si l'outil sort un produit par opération). $IR(T_{i+1}) = IR(T_i) + f(P_i)$ As $IR_r(P_{i+1}) = IR_r(P_i) + f(P_i)$. Jusqu'à ce qu'une inspection soit effectuée, les valeurs de réduction des risques restent inchangées. Par récurrence pour le h^{me} produit (produit implicitement produit à l'instant h) :

$$IR(T_h) = IR_r(P_h) = IR_r(P_i) + \sum_{z=1}^{z=h} f(P_z) = IR(T_i) + \sum_{z=1}^{z=h} f(P_z)$$

Cette équation lie un potentiel de réduction du risque à un instant h , à l'indicateur de risque de l'outil à un instant passé i prédéfini, en fonction de la production entre l'instant t_i et l'instant t_h . Tant que P_i n'ait pas été contrôlé, il entre dans le calcul de réduction du risque pour les produits futurs. Au fur et à mesure que chaque mesure progresse, le système évolue. Introduisons quelques notations complémentaires :

- $t_C(P_i)$ est noté k .
- l'inspection de P_i est valable à l'instant k : $C(P_i, k)$
- $(\dots)_{k-}$ pour les valeurs juste avant l'inspection à l'instant k ;
- $(\dots)_{k+}$ pour les valeurs juste après l'inspection à l'instant k ;

Quand on effectue une inspection on peut distinguer deux cas :

- Cas 1 : Si le produit P_i est inspecté avant le produit P_h , à l'instant k ($k/k > h > i$), et si $C(P_i, k) < UL_{Def}$ est déclaré propre. Ceci modifiera l'équation donnée ci-dessus. $IR_r(P_i)_{k+} = 0$ et $\sum_{z=1}^{z=h} f(P_z)_{k+} = \sum_{z=1}^{z=h} f(P_z)_{k-}$ reste inchangés car ces produits ont été fabriqués après P_i .

$$IR_r(P_h)_{k+} = 0 + \left(\sum_{z=1}^{z=h} f(P_z)\right)_{k+} = \left(\sum_{z=1}^{z=h} f(P_z)\right)_{k-} = IR_r(P_h)_{k-} = IR_r(P_i)_{k-}$$

L'indicateur de risque est diminué de la valeur de $IR_r(P_i)_{k-}$ et $IR_r(P_h)_{k+} > 0$. Ce cas est présenté à la Figure 2.3.

- Cas 2 : Si le produit P_h est mesuré en premier et $C(P_h, k) < UL_{Def}$. Si le produit P_h est déclaré "propre", alors, en raison de la propriété démontrée auparavant, tous les produits fabriqués et non inspectés avant peuvent être rejetés. Dans l'exemple de 10 produits, la sortie de P_8 , valide également $\{P_3, \dots, P_7\}$. Ainsi, $IR(T)$ est diminué de 5, $IR_r(P_8)_{8-} = 5$. Après cette inspection,

$$IR_r(P_3)_{8+} = IR_r(P_4)_{8+} = \dots = IR_r(P_8)_{8+} = 0$$

$IR_r(P_i)_{k+} = 0$ et $IR(T)_{k+} = 0$, si h est le premier produit à mesurer depuis le début de la production. Cette situation est présentée à la Figure 2.4, où le produit P_3 est mesuré avant le produit P_2 . L'action de relâche de contrôle : l'action du cas 2, pour le produit P_i , est appelée "skip". C'est l'annulation d'une action de contrôle, car l'opération ne modifiera pas cet indicateur. Cet indicateur aide à clarifier la manière de rendre opérationnel la propriété précédente. Le cas 1 peut être utilisé pour choisir parmi une liste de produits à mesurer, celui qui induira la réduction du risque la plus élevée. Le cas 2 induit au relâche d'une inspection.

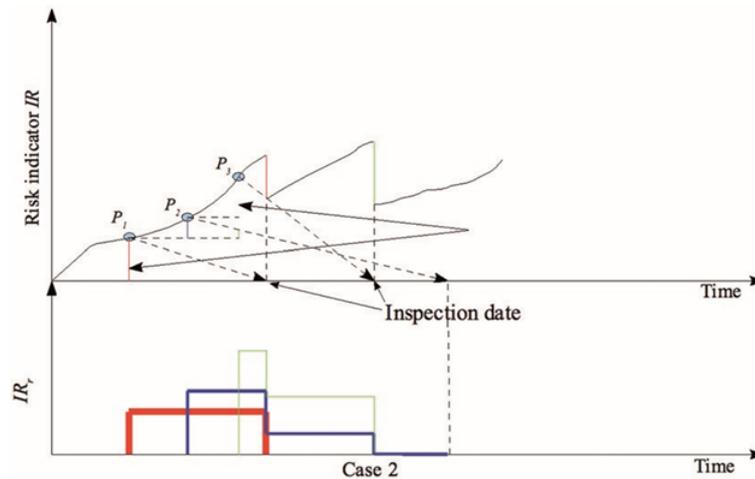


FIGURE 2.4 – Variation du risque dans le cas de dépassement de produits dans le tampon

Application et discussion

Le cas d'étude se déroule dans le cadre d'une recherche sur une usine de production de semi-conducteurs de STMicroelectronics en France. Il s'agit d'une usine Front-End de fabrication de wafers de 300 mm. Le cas considère le contrôle de la défektivité, pour l'outil de gravure. L'inspection s'effectue sur plusieurs appareils de mesure, qui seront assimilés au niveau d'un seul outil. L'indicateur de risque est un compteur de plaquettes fabriquées par l'outil. En raison des opérations de maintenance (automatiques ou manuelles) et des priorités des produits, le temps passé entre la fin de l'opération de fabrication et la mesure est très variable. Il peut arriver que certains lots produits l'après-midi soient mesurés avant les lots produits le matin, et le cas 2, mentionné ci-dessus, semble être fréquent.

Hypothèses des études de cas : Le cas est limité à un dispositif de fabrication, un outil de défektivité. Les produits y sont assimilés à de nombreux produits, souvent composés de 25 wafer. Un lot destiné à la défektivité ne porte qu'une seule information sur l'outil de fabrication qui est la quantité de réduction de $W@R$, IR_r .

Un test calcule l' IR en temps réel et provoque des relâchement d'inspections quand c'est possible (les condition 1 et 2 sont vérifiées pour le produit sélectionné). Il utilise des données réelles provenant de STMicroelectronics (Figure 2.5). Dans cette figure, le lecteur peut voir deux axes de temps. L'axe supérieur est basé sur le temps de production. Il n'est pas linéaire et ne dépend que du moment où les produits sont fabriqués. Le deuxième axe représente l'heure réelle. Dans cet axe, les mesures sont représentées par des cercles. L'interface, présentée dans la Figure 2.5, montre une représentation graphique en temps réel du mouvement des lots en production, de ceux en attente pour l'inspection et de l'évolution de l' IR ($W@R$).

Dans le premier test, un ensemble de données a été préparé afin d'exécuter l'algorithme. Au cours d'une période de 12 jours, nous avons observé un seul cas de relâchement d'inspection. Les lots destinés à être inspectés et leur entrée réelle dans les appareils de mesure sont présentés en vert. Les lots qui ont été sélectionnés pour l'inspection sont signalés par une ligne rouge, comme l'illustre la Figure 2.6. Les lots réellement exemptés de l'inspection sont représentés par un cercle blanc.

Le test a été un succès. Le lot remplissant les conditions 1 et 2 a été identifié comme indiqué à la figure 2.6. L'algorithme a été utilisé pendant plus de 2 mois

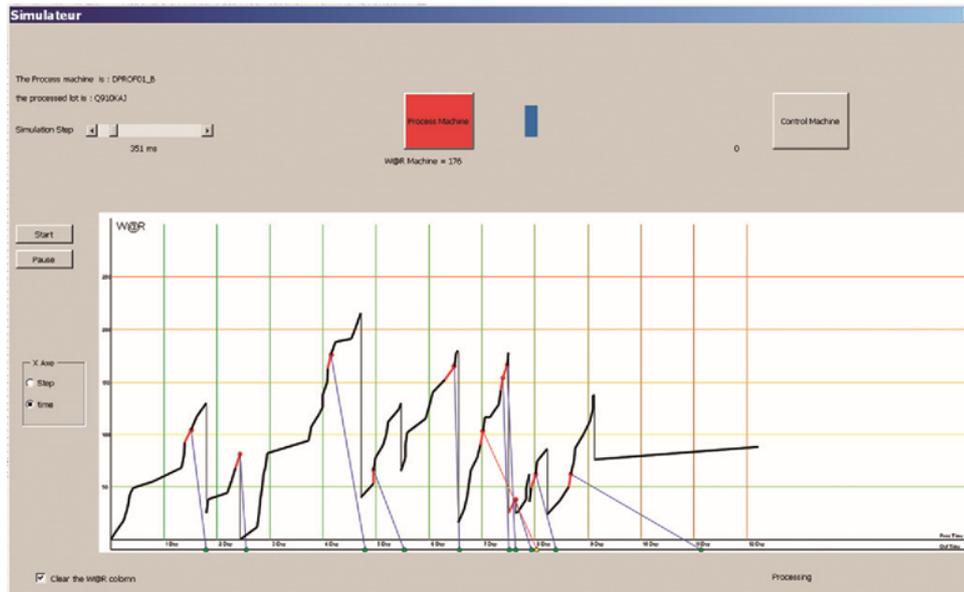


FIGURE 2.5 – Interface graphique de calcul de W@R en temps réel

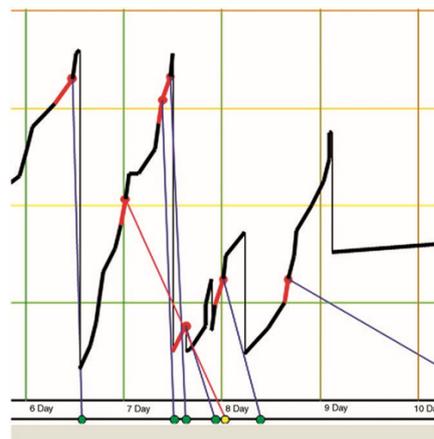


FIGURE 2.6 – Zoom sur un cas de relâchement d'inspection

de production. Au cours de cette période, 14 292 plaquettes ont été signalées pour la mesure de la défektivité. L'application de cet algorithme a montré que 5024 plaquettes auraient pu être mises en production car elles n'ajoutaient aucune nouvelle information. L'algorithme a relâché 35% des lots marqués pour défektivité par rapport au plan d'échantillonnage prévisionnel ($CardR / (PC / \tau)$). Cela signifie que 35% de ces lots ont été contrôlés sans ajout d'informations ni sur la qualité des produits ni sur l'état des machines de productions. L'application industrielle de la propriété démontrée dans cet article concerne davantage l'évaluation du nombre de plaquettes potentiellement infectées. Cependant, les résultats sont prometteurs car la $CardR$ est loin d'être nulle, le cas réel montre une amélioration potentielle et une réduction des coûts réels de la l'inspection de la présence des particules sur les wafers.

Il y a une interaction importante entre l'ordonnancement de la fabrication et le comportement de la mémoire tampon lors des contrôles sans perte d'information. L'impact du comportement stochastique du tampon permet la libération de certains contrôles, qui n'ajoutent aucune information sur les risques. Cependant, en fonction des caractéristiques du tampon (temps moyen, variabilité, loi de comportement, etc.)

et d'un plan de production spécifique, le gain de capacité a pu être calculé. Même si l'industrie des semi-conducteurs générerait l'étude de cas, chaque situation qui correspondrait aux hypothèses présentées pour le modèle pourrait appliquer l'algorithme de skipping.

2.4.2 échantillonnage optimal

La contribution précédente a permis de démontrer que nous pouvons améliorer l'utilisation des moyens d'inspection et améliorer la qualité des produits en même temps. Ceci dit, cette amélioration est efficace car le plan d'inspection initial n'a pas été conçu pour réduire le risque de perte massive de produits. De plus, la multiplication des machines de production et d'inspection rend le problème plus complexe, et la génération d'un plan d'échantillonnage prévisionnel efficace encore plus délicat. Cette partie traite de ce problème de lien entre l'inspection et l'état des machines. Je propose notre contribution par rapport à la génération d'un plan d'inspection optimal prenant en compte la dynamique du système de production et l'état des machines de production.

Problématique

L'étude s'appuie sur une étroite collaboration avec les chercheurs de STMicroelectronics à partir de l'usine de production et de recherche en 300 mm, située à Crolles-France. Dans cette usine, plusieurs gammes de circuits intégrés (CI) sont conçues, prototypées et produites. Les opérations de contrôle de processus se concentrent sur la mise en place des différents outils qui composent le système de production, et ce sont ces opérations qui sont responsables de l'allocation des inspections et de la définition du plan de contrôle. La pratique, dans cette usine, est de s'appuyer sur des experts internes qui signalent les opérations qui peuvent être contrôlées, et définissent leurs taux d'échantillonnage. Afin de justifier une amélioration du plan de contrôle, un comité de gestion du changement dédié doit l'approuver sur la base d'une analyse factuelle, basée sur une évaluation avant/après de certains indicateurs de performance liés à l'utilisation des capacités métrologiques, et à l'atténuation des risques. Les données de fabrication sont extraites manuellement des bases de données de fabrication, triées et pré-traitées. C'est une tâche qui prend souvent plus d'une journée de travail. L'étape suivante consiste à construire une simulation pour chaque plan d'échantillonnage, afin de calculer de nouvelles valeurs d'indicateurs de performance. Cette opération dure au moins une demi-journée. Pour l'ingénieur, le principal défi est de choisir le plan d'échantillonnage qui offre le plus de gains, et qui satisfait certaines contraintes prédéfinies. Ce plan d'échantillonnage constituera une séquence de taux d'échantillonnage non nuls. Chacun correspond à un appariement dans le modèle de déroulement du processus qui peut être échantillonné (technologie, exploitation). L'objectif étant d'éviter la possibilité de laisser une opération ou une technologie sans contrôle pendant le temps de production considéré (SAHNOUN et al., 2012).

En effet, chaque lot est traité à l'aide d'une combinaison d'outils de traitement (opération de fabrication), mais l'étape de l'inspection n'est pas toujours située juste après chaque étape de traitement. Lorsqu'un lot est inspecté, le $W@R$ des équipements de procédés correspondant est réduit de la valeur de réduction $W@R$ associée au lot inspecté. Cependant, l'échantillonnage fait que tous les lots ne sont pas inspectés. Ainsi, on en exclut une partie sans considérer les équipements de production qui

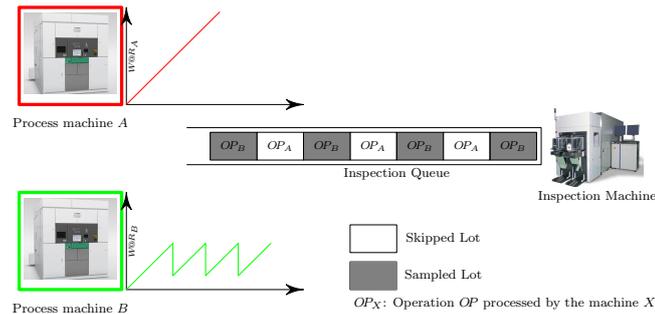


FIGURE 2.7 – Effets indésirable du W@R sur le processus d'inspection

ont généré ces lots. Le $W@R$ peut atteindre des valeurs non désirées sur ces équipements. Prenons un exemple simpliste où nous avons deux équipements de fabrication effectuant la même opération (Figure 2.7) avec une stratégie d'échantillonnage pour l'inspection d' 1/2 des lots arrivants à la file d'attente. Il est probable que les lots traités à l'équipement B soient toujours contrôlés et que les lots de l'équipement A soient toujours sautés, ce qui provoque une augmentation du $W@R$ pour l'équipement A. D'un autre côté, l'échantillonnage sans tenir compte des opérations inspectées, peut omettre certaines couches de contrôle, ce qui fait que certaines opérations ne sont jamais inspectées. Cela augmente le risque de créer des brèches de contrôle sur quelques produits. D'autres problèmes peuvent également survenir lorsque les opérations clés sont ignorées, car elles sont inévitablement échantillonnées à 100% en raison des exigences et/ou des normes du client.

Cette opération est de loin la plus complexe d'un point de vue combinatoire. La fréquence d'échantillonnage par paire (technologie, opération) varie de 1% à 100%. Par exemple, en considérant les opérations de traitement dans les seules zones de lithographie et de gravure, plus de 1200 paires (technologie, opération) ont été identifiées, ce qui génère un grand nombre de combinaisons de plans d'échantillonnage possibles : 1200^{100} .

La méthodologie de l'optimisation méta-heuristique est la plus appropriée pour résoudre le problème formulé, où un système de connaissances et l'optimisation devraient être considérés simultanément TAKAHARA et MIYAMOTO, 1999. Ces problèmes appartiennent à la classe des problèmes d'optimisation multi-objectifs, et les Algorithmes Génétiques (AG) ont prouvé leur efficacité pour les résoudre CHESHMEHGAZ et al., 2012; SIMARIA et VILARINHO, 2004. En raison de la dynamique complexe et du comportement aléatoire des lots dans le fab, il n'est pas facile de définir le $W@R$ avec une fonction mathématique. La simulation est considérée comme la meilleure façon de calculer la valeur exacte de $W@R$, malgré le temps de calcul considérable. Pour toutes ces raisons et parce que l'AG est facilement applicable au modèle du plan de contrôle, nous proposons d'utiliser la simulation multi-objective basée sur des algorithmes génétiques pour définir un plan d'échantillonnage optimisé. Les opérations qui peuvent être échantillonnées sont sélectionnées par un expert, et l'analyse générale est exécutée en utilisant la simulation comme fonction d'analyse. Les populations sont générées jusqu'à ce que le test final du meilleur ensemble de chromosomes de la dernière population ait été réussi, comme le montre la Figure 2.8.

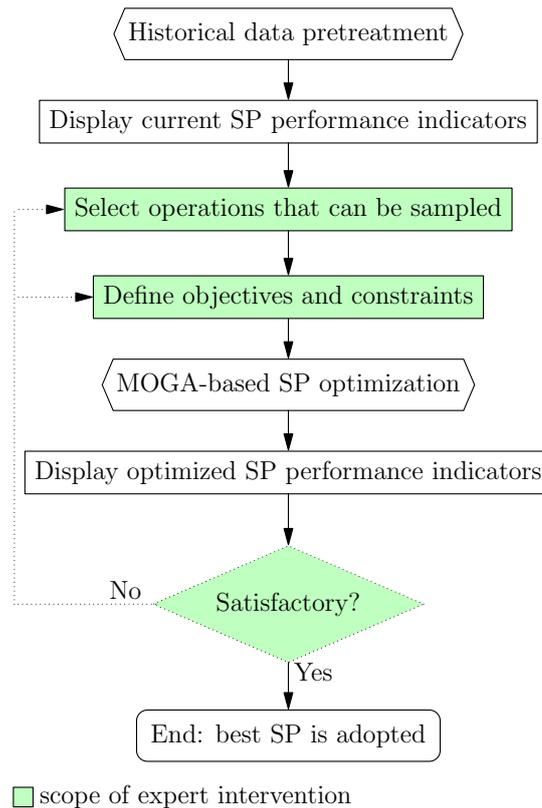


FIGURE 2.8 – l’approche de l’outil d’aide à la décision pour des plans d’inspections optimisé

Formalisation du problème

Dans la fabrication de semi-conducteurs, toute conception ou modification de plan de contrôle de qualité doit être négociée afin d’éviter de générer des effets indésirables sur les systèmes de fabrication. C’est un défi majeur pour tout planificateur de contrôle qualité. Comme la métrologie est toujours considérée comme un mal nécessaire dans les fabs (BUNDAY et al., 2007), il y a une grande pression pour réduire le nombre de plaquettes échantillonnées pour l’inspection. De plus, tout le monde est conscient des effets de l’échantillonnage sur la stabilité du système de production et la capacité d’investigation pour la recherche des dérives. Par conséquent, les contrôles font l’objet d’un compromis quotidien, afin de maintenir un niveau déterminé de données. Pour certains produits, la réduction de l’échantillonnage peut libérer des capacités de métrologie sans conséquences indésirables. Heureusement, comme je l’ai expliqué précédemment, les données sont parfois redondantes, et/ou pourraient être obtenues d’autres manières, telles que Virtual Metrology (VM) (SU, YU et OGUNNAIKE, 2008), (PAN et TAI, 2011). Cependant, pour d’autres, sauter des inspections pourrait augmenter le risque (une augmentation de $W@R$) car certaines opérations ne sont jamais contrôlées ou car les contrôles ne portent que sur certains produits.

Soit x un plan d’échantillonnage donné, composé de la séquence des taux d’échantillonnage des paires (technologie, opération) (Figure 2.9). Chaque plan d’échantillonnage est caractérisé par sa propre valeur de saturation ($SPPS^x$), qui est la proportion de la capacité d’inspection utilisée pour appliquer le plan d’échantillonnage x par rapport à la capacité d’inspection nécessaire pour un plan de 100%. Cette valeur est définie comme suit :

$$SPS^x = \frac{CAPA^x}{CAPA^{100\%}} \quad (2.1)$$

où :

$CAPA^x$ est la capacité d'inspection utilisée lorsque le plan d'échantillonnage x est appliqué;

$CAPA^{100\%}$ est la capacité d'inspection nécessaire pour un plan d'échantillonnage à 100%, qui est censé être égal à la capacité totale disponible.

Notez qu'il est possible de définir plusieurs plans d'échantillonnage pour un SPS donné. Par exemple, considérons un déroulement de processus composé de deux opérations. Si la capacité d'inspection disponible permet l'inspection de la première opération 6 fois, et de la seconde 10 fois, un SPS de 50% peut être associé à la liste suivante de plans d'échantillonnage réalisables :

$$S^1 = (s_1^1 = 1/6, s_2^1 = 7/10); S^2 = (s_1^2 = 2/6, s_2^2 = 6/10);$$

$$S^3 = (s_1^3 = 3/6, s_2^3 = 5/10); S^4 = (s_1^4 = 4/6, s_2^4 = 4/10);$$

$$S^5 = (s_1^5 = 5/6, s_2^5 = 3/10); S^6 = (s_1^6 = 6/6, s_2^6 = 2/10).$$

Algorithme génétique multi-objectif pour l'échantillonnage

Le plan d'inspection de la qualité d'un système de fabrication complexe doit être adapté aux changements opérationnels dynamiques de l'usine. L'utilisation de méthodes automatiques pour rechercher un taux d'échantillonnage optimisé pour chaque couple technologie-opération est essentielle, en raison du très grand nombre de combinaisons qui composent l'espace de solutions. Nous maintenons que l'AG pourrait être facilement appliqué à notre modèle afin de définir des plans d'échantillonnage presque optimaux.

L'approche proposée, présentée à la Figure 2.8, consiste à fournir un outil d'aide à la décision qui permet : i) de définir différents scénarios relatifs à l'utilisation des capacités de métrologie et aux objectifs et contraintes d'exposition aux risques ; et ii) d'optimiser les plans d'échantillonnage en utilisant un MOGA ; la fonction d'évaluation étant basée sur des simulations qui utilisent des processus et des historiques de données d'inspection .

L'approche commence par un pré-traitement de ces données. Elles sont extraites de bases de données de procédés et de métrologie couvrant une période de temps prédéfinie. Au cours de cette étape, le plan d'échantillonnage réel est évalué au moyen d'indicateurs de rendement. Cette étape permet également de reconstituer le modèle de déroulement du processus, les capacités/qualifications des ressources et le mix de production. Sur la base des indicateurs de performance, l'expert analyse ces résultats et peut se poser les questions suivantes : i) Le plan d'échantillonnage actuel est-il optimisé? ii) La capacité de métrologie utilisée pourrait-elle être réduite avec un impact limité sur l'exposition aux risques? et iii) Que se passe-t-il si certaines opérations sont échantillonnées avec des seuils de fréquence d'échantillonnage inférieurs? Ces questions sont intégrées dans l'outil de support sous forme de contraintes et d'objectifs à prendre en compte dans le processus d'optimisation qui va utiliser le MOGA.

Le MOGA est ensuite exécuté pour trouver le plan d'échantillonnage (PS) qui correspond le mieux aux contraintes et objectifs prédéfinis. L'évaluation de chaque solution générée par les opérateurs de l'AG est réalisée par simulation sur la base des données historiques. Les meilleurs PS obtenus par le MOGA sont affichés, et l'expert

décide si le résultat est satisfaisant ou non au regard de ses objectifs. Si ce n'est pas le cas, il peut choisir de modifier ses objectifs et contraintes initiaux, et réessayer.

Les objectifs du processus d'optimisation comportent deux aspects : Allocation des capacités de métrologie et maîtrise de l'exposition aux risques.

- **Allocation de la capacité d'inspection** : La métrologie ou les opérations d'inspection sont souvent perçues comme n'ayant pas de "valeur ajoutée", ce qui augmente les coûts d'exploitation et ralentit le rythme de production. En outre, ils ont généralement besoin de ressources de métrologie coûteuses. C'est la raison pour laquelle la capacité de métrologie doit être soigneusement allouée, afin d'équilibrer les coûts de mesure sous-jacents avec les objectifs de réduction de l'exposition aux risques. Comme les machines de métrologie sont chères, les prix allant de 1 à 3 millions de dollars, toutes les économies réalisées sont les bienvenues. Par conséquent, le premier critère constituant la fonction objectif est $CAPA^x$, qui fait référence à la capacité d'inspection utilisée durant toute la période de production pendant laquelle le plan d'échantillonnage x est appliqué.
- **Maitrise des risques** : Pour réduire $W@R$, plusieurs indicateurs ont été calculés pour ajouter une perspective d'assurance au plan de contrôle. Afin d'éviter une crise de rejet massif de produits, un indicateur $MaxW@R$ a été créé. Il consiste au nombre maximum de produits qui peuvent être défectueux à la fois dans le système de production, après une dérive possible. La réduction de cette valeur a un impact direct sur la probabilité d'occurrence d'un événement majeur de mise au rebut. Le deuxième critère est alors $MaxW@R^x$, qui est la valeur du $W@R$ le plus élevé atteint sur toute la période de production pendant laquelle le plan d'échantillonnage x est appliqué. Elle s'exprime comme suit :

$$MaxW@R^x = \max_z MaxW@R_z^x \quad (2.2)$$

où :

$z \in \{1, \dots, Z\}$ représente l'indice de machine de production ; avec Z le nombre de machines de production disponibles dans l'atelier.

$MaxW@R_z^x$ représente la valeur maximale du $W@R$ atteinte par la machine de traitement z pendant la période considérée.

La valeur $MeanW@R$ est une valeur moyenne des risques en nombre de produits, sur le système de production considéré. Il est utilisé pour chercher l'amélioration de $W@R$, même s'il n'y a pas de pic $MaxW@R$ pertinent. Le troisième critère est alors $MeanW@R^x$, qui est la moyenne du $W@R$ sur toute la période de production pour le plan d'inspection x . Elle s'exprime comme suit :

$$MeanW@R^x = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z MeanW@R_z^x \quad (2.3)$$

Où :

$MeanW@R_z^x$ indique la valeur moyenne de $W@R$ de la machine de production z pendant la période considérée.

Le $MeanMaxW@R$ est la perte maximale moyenne sur tous les outils de production. Le quatrième critère est alors $MeanMaxW@R^x$, qui est la moyenne de $MaxW@R$ atteinte par toutes les machines de production (noté z) pendant toute la période de

production. Il est calculé comme suit :

$$MeanMaxW@R^x = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z MaxWR_z^x \quad (2.4)$$

— **Contrainte sur la capacité de métrologie utilisée :**

L'utilisateur définit ses besoins avec le paramètre $\Delta CAPA_c(\%)$ qui représente la limite inférieure du pourcentage de réduction de la capacité utilisée. La contrainte correspondante sur cette capacité est définie comme suit :

$$\begin{aligned} \Delta CAPA^x(\%) &\geq \Delta CAPA_c(\%) \\ \Rightarrow \frac{CAPA^{init} - CAPA^x}{CAPA^{init}} \times 100 &\geq \frac{CAPA^{init} - CAPA_c}{CAPA^{init}} \times 100 \\ \Rightarrow CAPA^x &\leq CAPA_c \end{aligned}$$

where :

$CAPA_c$: est la valeur de la contrainte sur la capacité utilisée ;

$CAPA^{init}$: est la capacité utilisée du plan d'échantillonnage initial ;

$CAPA^x$: est la capacité utilisée par le plan d'échantillonnage x .

— **Contrainte sur $MeanMaxW@R$:**

Cette contrainte définit la tolérance liée à la moyenne de $MaxW@R_z$ sur toutes les machines de traitement considérées. Une solution acceptable sous cette contrainte respecte la relation suivante :

$$\begin{aligned} \Delta MeanMaxW@R^x(\%) &\leq \Delta MeanMaxW@R_c(\%) \\ \Rightarrow MeanMaxW@R^x &\leq MeanMaxW@R_c \end{aligned}$$

Où :

$$\Delta MeanMaxW@R^x(\%) = \frac{MeanMaxW@R^x - MeanMaxW@R^{init}}{MeanMaxW@R^{init}} \times 100$$

$$\Delta MeanMaxW@R_c(\%) = \frac{MeanMaxW@R_c - MeanMaxW@R^{init}}{MeanMaxW@R^{init}} \times 100$$

$MeanMaxW@R_c$: est la contrainte sur $MeanMaxW@R$;

$MaxW@R_z^x$: est le maximum de $W@R$ atteint par la machine de production z sur la période simulée en utilisant le plan d'échantillonnage x ;

$MaxW@R_z^{init}$: est le maximum de $W@R$ atteint par la machine de production z pendant la période simulée en utilisant le plan d'échantillonnage initial.

— **Contrainte sur $MeanW@R$:**

Cette contrainte définit la tolérance par rapport à la valeur moyenne de $W@R$ pour toutes les machines de traitement. Une solution acceptable sous cette contrainte respecte la relation suivante :

$$\begin{aligned} \Delta MeanW@R^x(\%) &\leq \Delta MeanW@R_c(\%) \\ \Rightarrow MeanW@R^x &\leq MeanW@R_c \end{aligned}$$

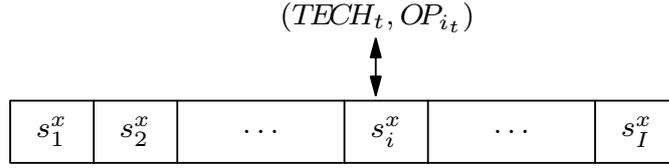
Où :

$$\Delta MeanW@R^x(\%) = \frac{MeanW@R^x - MeanW@R^{init}}{MeanW@R^{init}} \times 100;$$

$$\Delta MeanW@R_c(\%) = \frac{MeanW@R_c - MeanW@R^{init}}{MeanW@R^{init}} \times 100;$$

$MeanW@R_c$ est la contrainte sur la moyenne de $W@R$;

R est la valeur moyenne de $W@R$ sur la période simulée en utilisant le plan



I : number of pairs that can be sampled ($TECH.$, $OP.$)
 s_i^x : sampling rate of the i^{th} pair in sampling plan x

FIGURE 2.9 – Codage de la solution représentant un plan d'échantillonnage

d'échantillonnage x ; et

$MeanW@R^{init}$ est la valeur moyenne de $W@R$ sur la période simulée en utilisant le plan de prélèvement initial.

— **Contraintes sur $MaxW@R$ par machine :**

Cette contrainte définit la tolérance de $MaxW@R$ pour chaque machine de traitement. Une solution acceptable sous cette contrainte respecte la relation suivante :

$$\begin{aligned} \Delta MaxW@R_z^x(\%) &\leq \Delta MaxW@R_{c,z}(\%) \quad \forall z \in \{1, \dots, Z\} \\ \Rightarrow MaxW@R_z^x &\leq MaxW@R_{c,z} \quad \forall z \in \{1, \dots, Z\} \end{aligned}$$

Où :

$$\Delta MaxW@R_z^x(\%) = \frac{MaxW@R_z^x - MaxW@R_z^{init}}{MaxW@R_z^{init}} \times 100;$$

$$\Delta MaxW@R_{c,z}(\%) = \frac{MaxW@R_{c,z} - MaxW@R_z^{init}}{MaxW@R_z^{init}} \times 100;$$

$MaxW@R_{c,z}$ est la contrainte sur $MaxW@R$ pour la machine de production z ;

$MaxW@R_z^x$ est le maximum de $W@R$ pour la machine de production z sur la période simulée en utilisant le plan d'échantillonnage x ;

$MaxW@R_z^{init}$ est le maximum de $W@R$ pour la machine de traitement z sur la période simulée en utilisant le plan d'échantillonnage courant.

Codage de la solution La mise en œuvre des AG nécessite la codification de l'espace de solution en un ensemble fini de chaînes de longueur finies, qui sont les chromosomes (voir Figure 2.9). Dans l'AG proposé, chaque chromosome est un plan d'échantillonnage réalisable où un gène correspond au taux d'échantillonnage d'une opération qui peut être échantillonnée, c'est-à-dire une paire (technologie, opération). Un gène est codé par un nombre variant de 1% à 100%, par accroissement d'1%. La taille des chromosomes dépend des paires sélectionnées qui peuvent être échantillonnées et qui sont définies par l'expert. A chaque itération de l'AG, une nouvelle population est générée en utilisant des opérateurs génétiques classiques avec des proportions différentes (sélection, mutation, croisement et génération aléatoire), à l'exception de la population initiale, qui est générée de manière totalement aléatoire.

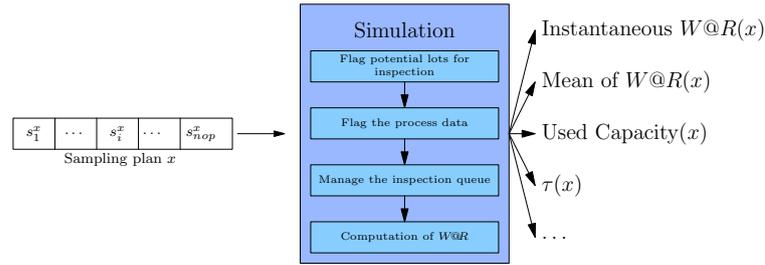


FIGURE 2.10 – Entrées sorties de la simulation utilisée pour évaluer chaque chromosome

évaluation par simulation Un simulateur a été développé pour appliquer chaque nouveau plan d'échantillonnage et évaluer les indicateurs du $W@R$ pour chaque machine de traitement et la valeur correspondante de la capacité d'inspection utilisée, $CAPA^x$ (Figure 2.10).

Les données d'entrée de la simulation sont basées sur deux ensembles de données historiques extraites sur la même période de temps. Le premier ensemble contient des informations sur le système de production : le nom du lot, l'équipement sur lequel il a été traité, le nombre de plaquettes dans le lot, la date du traitement, le nom de l'opération et la technologie. Le deuxième ensemble de données historiques est lié aux événements d'inspection, qui sont caractérisés par l'équipement de métrologie, le nom du lot, la date d'inspection (entrée), l'opération du procédé mesurée et la technologie associée. Le plan d'échantillonnage initial calculé à partir des entrées est indiqué par $S^{init} = (s_1^{init}, \dots, s_i^{init}, \dots, s_I^{init})$, et est caractérisé par son indicateur SPS (Sampling Plan Saturation) :

$$SPS^{init} = \frac{CAPA^{init}}{CAPA^{100\%}} \quad (2.5)$$

Comme l'illustre la Figure 2.10, la simulation est réalisée en quatre étapes détaillées ci-dessous.

Step 1- Marquage des lots potentiels à l'échantillonnage

Cette étape consiste à sélectionner, à partir des données historiques de métrologie, le sous-ensemble de lots mesurés lorsque le plan d'échantillonnage x est appliqué. Il devrait garantir les taux d'échantillonnage souhaités s_i^x pour toutes les paires (technologie, opération).

A la fin de cette étape, le nouveau plan d'échantillonnage x est présenté par l'ensemble des lots marqués dans la liste des inspections possibles (les données historiques de métrologie).

Étape 2- Indiquer les données du processus

Après avoir défini les lots à contrôler, ils doivent être marqués dans les données de traitement historiques. Dans cette étape, un lot est marqué lorsqu'il l'a déjà été dans les données de métrologie pour la même opération. Les dates de traitement des lots marqués sont utilisées dans les étapes suivantes.

Step 3-réarrangement des files d'attentes des machines d'inspection

Les opérations d'inspection d'intérêt dans cette étude sont effectuées par des équipements de métrologie autonomes. Chacun a une file d'attente séparée dans laquelle les lots sont placés avant d'être inspectés.

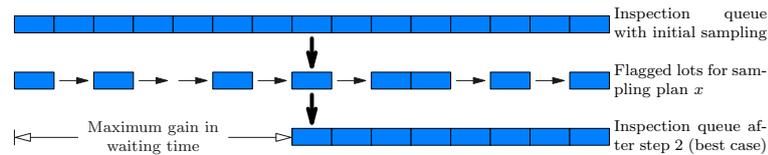


FIGURE 2.11 – réarrangement des files d’attentes

Cette étape vise à définir la date d’inspection pour chaque lot échantillonné (marqué à l’étape précédente), selon le plan d’échantillonnage x , sans changer l’envoi initial des lots échantillonnés aux équipements de métrologie.

Comme le nombre de lots marqués est inférieur ou égal au nombre de lots mesurés dans le plan d’échantillonnage initial, certains lots des données métrologiques historiques sont ignorés. Ces lots sont retirés et remplacés par les nouveaux lots échantillonnés dans les files d’attente métrologiques (voir Figure 2.11). Les nouvelles dates de mesure de ces lots sont avancées afin de remplir les emplacements vides. Ces dates ne doivent pas être antérieures à la date de production additionnée au temps de transport (T_t). Cette condition est représentée dans l’équation suivante :

$$D_{nm}(l) \geq D_{pro}(l) + T_t(l) \quad (2.6)$$

où : $D_{nm}(l)$ est la nouvelle date de mesure du lot l
 $D_{pro}(l)$ est la date de traitement du lot l .

Le gain maximal de temps d’attente qui en résulte est la somme des temps de mesure de tous les lots retirés de la file d’attente, comme l’illustre la Figure 2.11. À la fin de cette étape, les dates de mesure des lots sélectionnés selon le plan d’échantillonnage x sont définies.

Step 4-Calcul du $W@R$

Dans cette étape de la simulation, les indicateurs basés sur $W@R$ sont calculés séparément pour chaque machine de traitement et pour chaque événement de processus, comme je l’ai expliqué dans la première problématique sur l’estimation du $W@R$ (voir SHANOUN et al., 2011 pour plus de détails).

Cette simulation nous donne également la possibilité de calculer le temps de retard τ entre le traitement et la mesure, afin d’étudier le comportement des lots entre ces deux étapes, et la variation de τ pour chaque plan d’échantillonnage. D’autres indicateurs de performance peuvent être extraits du simulateur tels que le makespan, le nombre d’inspections, etc.

Mise en œuvre, expérimentation et discussion

La mise en œuvre de l’approche proposée et de ses algorithmes a été développée avec MS Excel VBA 2010. Ce choix a été fait afin de faciliter les tests d’études de cas et l’échange de données avec les partenaires industriels. Avant de lancer cet outil, les données historiques de traitement et de métrologie doivent déjà être chargés sur deux feuilles différentes. Une interface graphique (Figure 2.12) permet à l’utilisateur de définir les paramètres d’optimisation et d’exécuter le MOGA. Cette interface est également utilisée pour sélectionner les paires (technologie, opération) à prendre en compte dans le plan d’échantillonnage, en utilisant l’une des trois alternatives possibles :

- Sélection de l’élément Sélection des opérations de production pouvant être échantillonnées : Pour chaque opération sélectionnée, toutes les paires où cette

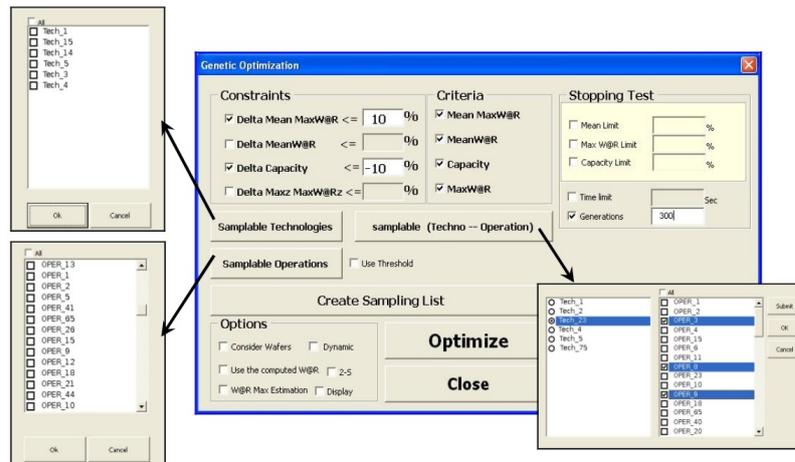


FIGURE 2.12 – Interface graphique de l'outil d'aide à la décision

opération est présente sont ajoutées à l'ensemble des paires qui peuvent être échantillonnées.

- Sélection des technologies pouvant accepter un échantillonnage : Pour chaque technologie sélectionnée, toutes les paires où cette technologie est présente sont ajoutées à l'ensemble des paires qui peuvent être échantillonnées.
- Sélection des paires pouvant être échantillonnées (technologie, fonctionnement) : Dans ce cas, seules les paires sélectionnées sont ajoutées à l'ensemble des paires pouvant être échantillonnées.

De plus, comme la combinaison de technologies peut être différente pour chaque période de production, certaines opérations et/ou technologies peuvent ne pas être bien représentées dans les données métrologiques historiques extraites. Si l'échantillonnage est réduit pour ces paires, il y a un risque que des infractions au contrôle soient générées, ou que trop peu de données soient utilisées dans le contrôle statistique du processus. C'est pourquoi il est possible d'établir un seuil qui restreint la sélection des opérations pouvant être échantillonnées, à celles pour lesquelles les données historiques contiennent un nombre d'inspections supérieur ou égal à ce seuil. La valeur du seuil est entrée dans une case de saisie qui apparaît lorsque la case à cocher "Seuil d'utilisation" est activée.

Après avoir sélectionné les opérations qui peuvent être échantillonnées, l'utilisateur sélectionne et définit les contraintes, les critères à minimiser (objectifs), et les tests d'arrêt MOGA. Les contraintes ne sont pas obligatoires, mais au moins un critère et un test d'arrêt doivent être sélectionnés afin de démarrer l'algorithme d'optimisation.

Implémentation du MOGA Le MOGA que nous avons implémenté est décrit dans Figure 2.13. Le principe de base d'un AG est de générer des populations successives de solutions candidates et d'assurer leur évolution vers de meilleures solutions. La génération de nouvelles populations est effectuée à l'aide de techniques inspirées de l'évolution naturelle (comme la sélection, la mutation et le croisement) et elles sont répétées jusqu'à ce qu'une "condition d'arrêt" prédéfinie soit remplie.

Caractérisation de l'échantillonnage initial

Avant de commencer l'optimisation, une simulation initiale est nécessaire pour calculer le $W@R$ initial ($W@R^{init}$) pour définir le plan d'échantillonnage initial S^{init} et le

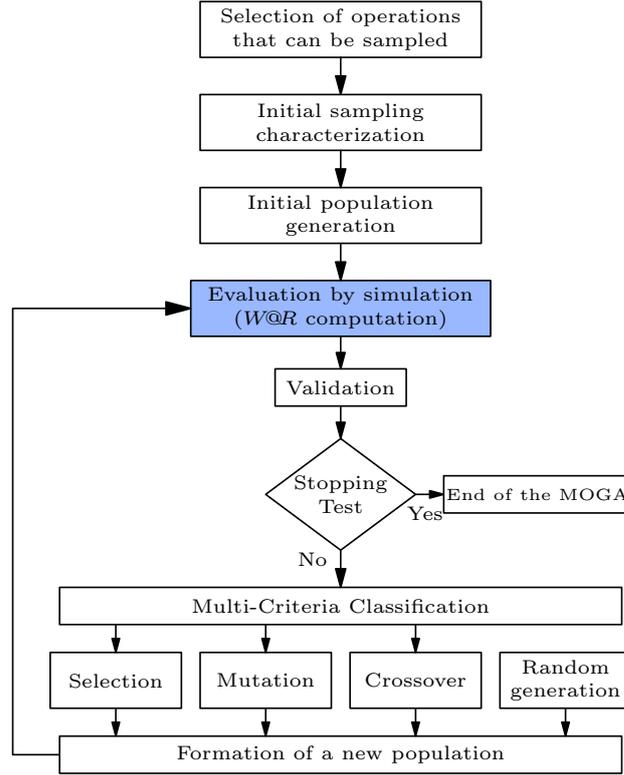


FIGURE 2.13 – Processus de simulation optimisation avec un AG

nombre de mesures pour chaque opération N^{init} . Ce dernier représente une limite supérieure pour l'opération correspondante du plan d'échantillonnage à optimiser. Les valeurs de $MeanMaxW@R^{init}$, $MeanW@R^{init}$, $CAPA^{init}$, et $MaxW@R^{init}$ par machine sont également déduits de cette simulation. Sur la base des valeurs des paramètres sélectionnés par l'utilisateur, ces résultats sont ensuite utilisés pour calculer les valeurs effectives des contraintes :

$$MeanMaxW@R_c = (\Delta MeanMaxW@R_c + 1) \times MeanMaxW@R^{init};$$

$$MeanW@R_c = (\Delta MeanW@R_c + 1) \times MeanW@R^{init};$$

$$CAPA_c = (\Delta CAPA_c + 1) \times CAPA^{init}; \text{ et}$$

$$MaxW@R_{c,z} = (\Delta MaxW@R_c + 1) \times MaxW@R^{init} \quad \forall z \in \{1, \dots, Z\}.$$

Génération initiale de la population

La population initiale est composée de 50 chromosomes, générés de manière aléatoire à l'aide de la fonction "random" d'Excel VBA.

Evaluation et validationn

Chaque chromosome est évalué par simulation. Dans le cas où une ou plusieurs contraintes sont actives, chaque individu (chromosome) est validé par rapport aux contraintes. Tout chromosome qui ne remplit pas la contrainte sera déclassé par le critère d'évaluation (noté CR) en augmentant sa valeur.

$$CR^x = CR_0^x + k^x \quad (2.7)$$

Avec

$$k^x = \sum_{i=1}^{i=n} |Const(i) - Const_c(i)| \times tr(i) \quad (2.8)$$

Où :

CR_0^x	est l'évaluation initiale des critères (avant déclassement) du plan d'échantillonnage x ;
CR^x	est la valeur des critères déclassés du plan d'échantillonnage x ;
k^x	représente la distance entre l'évaluation du chromosome et les contraintes ;
n	est le nombre de contraintes considérées ;
$Const(i)$	est la valeur de la contrainte i pour le chromosome concerné
$Const_c(i)$	est la valeur effective de la contrainte i ;
$ \cdot $	c'est la valeur absolue de la fonction \cdot ;
$tr(i)$	est une variable booléenne égale à 1 si la contrainte i est transgressée ; 0 sinon.

Test d'arrêt

L'AG crée de nouvelles populations jusqu'à ce que la condition du test d'arrêt soit remplie. Trois types de test d'arrêt sont proposés.

1. Un test d'arrêt basé sur la valeur des critères : l'utilisateur peut sélectionner une ou plusieurs conditions sur les critères. L'optimisation sera arrêtée lorsque la valeur des critères du meilleur chromosome d'une population satisfait toutes les valeurs spécifiées.
2. Un test d'arrêt basé sur le temps d'optimisation : l'algorithme s'arrête lorsqu'une limite de temps spécifiée est atteinte.
3. Un test d'arrêt basé sur le nombre de générations : l'algorithme s'arrête lorsqu'un nombre spécifié de générations est atteint.

Si l'utilisateur définit un certain nombre de conditions, l'optimisation s'arrête dès que la première condition est remplie. Si la condition d'arrêt n'est pas remplie, l'algorithme retourne à la validation, l'évaluation et l'évolution.

Classification multi-critères

Lorsque l'optimisation mono-objectif est déployée, les chromosomes sont classés en conséquence et les meilleurs individus sont sélectionnés. Lorsque l'optimisation multi-objectifs est déployée, en sélectionnant deux ou plusieurs critères pour l'optimisation, l'algorithme classe les chromosomes en fonction de chaque critère. Les meilleurs individus sont ceux qui ont la plus petite somme de rangs de tous les critères.

La Figure 2.14 illustre la méthode adoptée pour la classification multi-critères par un exemple simple, où 10 chromosomes sont classés selon trois critères (C_1 , C_2 , et C_3). Premièrement, les chromosomes sont évalués par simulation et classés séparément pour chaque critère. Ensuite, une classification globale est effectuée, basée sur le meilleur classement pour tous les critères.

Cette méthode permet de réduire le front de Pareto parce qu'elle permet de classer des individus non-dominés.

Formation d'une nouvelle population

De nouveaux individus sont générés à l'aide de méthodes de sélection, de mutation, de croisement et de génération aléatoire.

Résultats et discussions

L'approche proposée a été testée dans le cadre d'une étude de cas utilisant un mois de données réelles fournies par STMicroelectronics à Crolles, France. Elle se concentrait sur l'optimisation des mesures de CD utilisés pour contrôler les ateliers

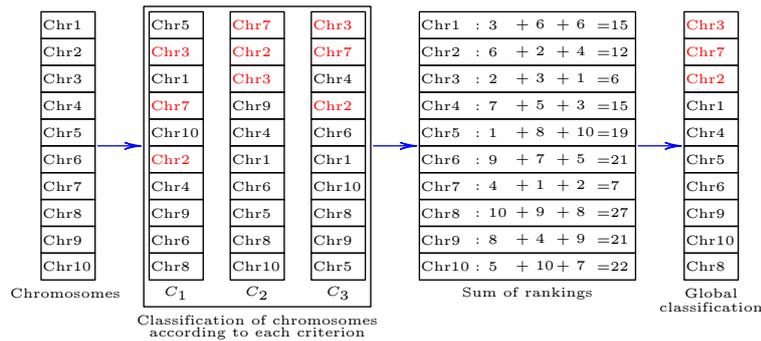


FIGURE 2.14 – Classification multi-critère

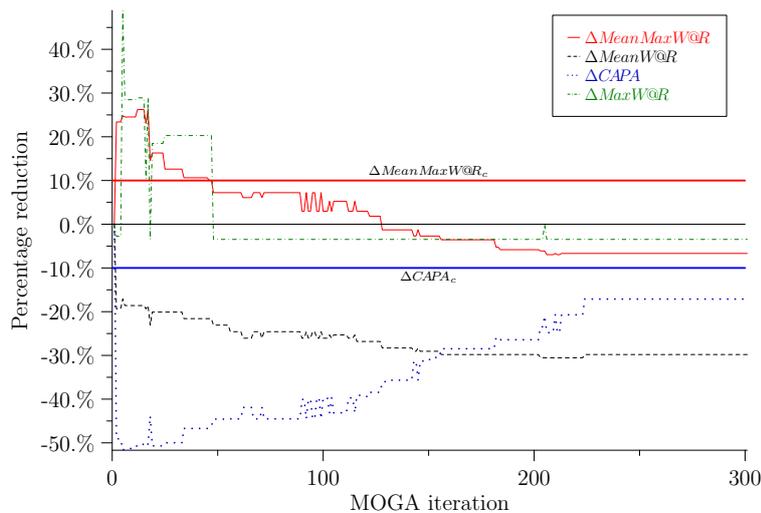


FIGURE 2.15 – Évolution des critères en fonction des générations pour l’une des meilleures solutions trouvées

de lithographie et de gravure.

La simulation a été exécutée en tenant compte de deux contraintes : (1) 10% de tolérance dans l’augmentation de $MeanMaxW@R$ pour toutes les machines de fabrication, et (2) une réduction minimum de 10% de la capacité utilisée.

L’objectif était alors de minimiser chacun des critères suivants : $MeanMaxW@R$, $MeanW@R$, $CAPA$. Chaque chromosome utilisé pour l’optimisation correspondait aux taux d’échantillonnage combinés de toutes les opérations inspectées plus de 10 fois pendant la période considérée, ce qui signifie que les chromosomes étaient composés de 342 gènes. Le test d’arrêt est défini par un nombre de génération (300).

Chaque chromosome a été évalué par simulation d’une durée d’une seconde, sur une période d’un mois. Bien que la simulation ait fourni une bonne évaluation du plan d’échantillonnage, il a fallu trop de temps pour simuler 300 générations (environ 4 heures avec un ordinateur équipé d’un processeur Intel(C) Core™2 Duo CPU P8600 @ 2.40GHz).

Figure 2.15 présente l’évolution des critères d’optimisation en fonction des itérations pour l’une des solutions de l’ensemble des meilleures solutions dans chaque génération. Les contraintes ont été satisfaites après l’itération 50, et les critères ont continué à s’améliorer jusqu’à l’itération 225, après quoi ils se sont stabilisés.

En raison de la taille énorme des chromosomes (342 gènes), la variation des critères par génération est lente. L’amélioration des résultats nécessiterait beaucoup

plus de générations et beaucoup plus de puissance de calcul. Les critères sélectionnés ne variaient pas en harmonie; par exemple, la réduction de la capacité utilisée (CAAPA) augmentait de *MeanMaxWR* et vice versa. Cela a rendu l'optimisation difficile, nécessitant plusieurs itérations. L'un des chromosomes du résultat final, présente un plan d'échantillonnage optimisé correspond à un *SPS* égal à 82,9%.

	<i>CAPA</i>	<i>MeanW@R</i>	<i>MaxW@R</i>	<i>MeanMaxW@R</i>
<i>init</i>	16660	133.9	720	352.5
<i>gen</i>	13808	93.7	695	329.1
Δ	-17.1%	-30%	-3.5%	-6.6%
Δ_c	-10%	-	-	10%

TABLE 2.2 – Résumé des résultats pour une solution optimisée

Le tableau 2.2 résume les résultats finaux obtenus pour les quatre critères considérés. Dans la ligne "*init*", les valeurs des critères sont tirées du plan d'échantillonnage initial. La deuxième ligne ("*gen*") présente les valeurs obtenues après optimisation par le MOGA. La troisième ligne présente les améliorations en pourcentage et la dernière ligne présente la valeur de chaque contrainte sélectionnée. La capacité est exprimée en nombre de mesures effectuées pendant la période d'observation. La valeur initiale de 16 600 est réduite de 17,1%, ce qui représente une diminution de 2 792 mesures. Comme un outil d'inspection assure environ 1 300 opérations d'inspection, l'amélioration permet d'économiser 2,14 outils. Parce qu'un outil peut coûter entre \$1 et \$3 millions, les économies sont considérables (le coût passe de \$6,84 millions à \$2,14 millions).

En même temps, le risque de perte de produits a également été réduit : en moyenne (deuxième colonne), une baisse de 30%, passant de 133,9 produits à 93,7 produits. Cela signifie que 94 lots de wafers étaient potentiellement à risque après l'application de MOGA, au lieu de 134. Cela représente une économie potentielle de 42,2 lots. Avec un lot coûtant entre 2000 \$ et 10,000 \$, cela signifie que la couverture d'assurance pourrait être réduite de 84,400 \$, en moyenne, à 422,000 \$.

Le troisième critère a été diminué de 3,5%, ce qui représente 25 lots. Il en a résulté une réduction de perte évaluée entre \$50 000 et \$250 000.

Le quatrième critère a été diminué de 6,6%, même si la contrainte a été levée de 10% par l'utilisateur du système. Cela représente un gain de 23 plaquettes, soit de 46 000 \$ à 230 000 \$.

Sur le plan opérationnel, en fonction de la politique d'assurance mise en place pour couvrir les rebuts de plaques, l'un des gains mentionnés ci-dessus peut être sélectionné pour estimer le gain global. Par exemple, si la police d'assurance de la ferraille couvre une perte moyenne, alors le gain associé à *MeanW@R* peut être choisi. Dans ce cas, le MOGA génère des économies entre 2,224,400 \$ et 7,262,000 \$.

Globalement, les résultats présentés dans le Tableau 2.2 représentent des économies très importantes, qui peuvent être facilement réalisées en modifiant le plan d'échantillonnage en fonction des résultats MOGA.

Les résultats concernant la réduction de l'exposition aux risques sont détaillés dans les Figures 2.16 et 2.17. Figure 2.16 montre le pourcentage de réduction en *MeanW@R* et *MaxW@R* pour chaque machine de traitement obtenue par le plan d'échantillonnage optimisé calculé par le MOGA. Il montre l'écart significatif entre la solution optimisée et le plan d'échantillonnage actuel concernant les *MeanW@R* et *MaxW@R* de certaines machines de production. En fait, ces deux indicateurs ont été réduits

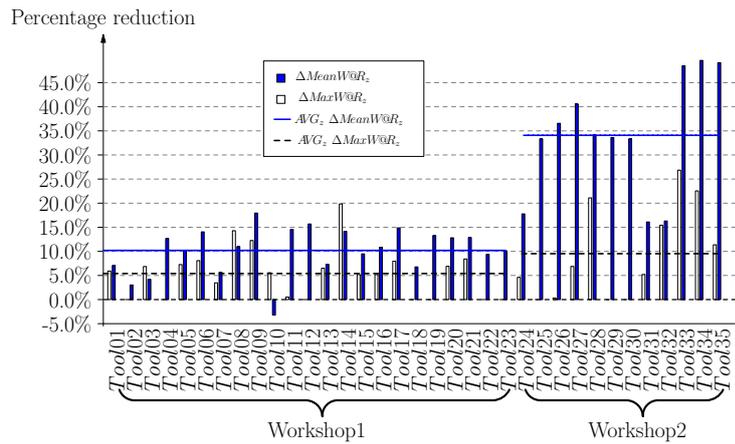


FIGURE 2.16 – Grains en maxW@R et meanW@R par machine utilisant l’optimisation génétique

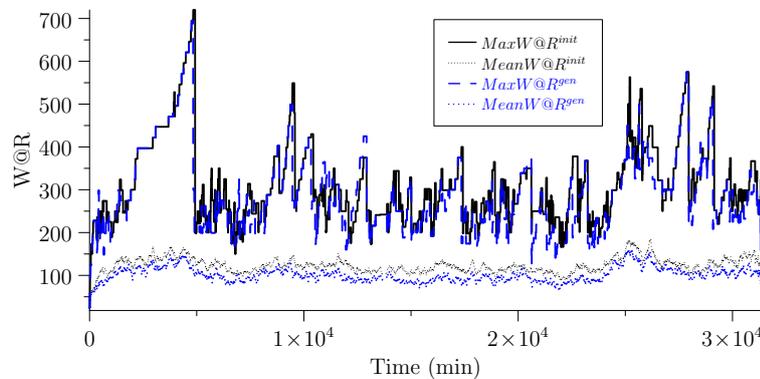


FIGURE 2.17 – Réduction instantané du W@R dans le temps

pour presque toutes les machines de production, en moyenne, de 30% et 3,5% respectivement. Cette figure fournit également une analyse du point de vue de l’atelier. Les 23 premières machines de traitement appartiennent à *Workshop1* (Gravure) et les autres appartiennent à *Workshop2* (Photolithographie). Les résultats montrent que la moyenne de $\Delta MeanW@R$ est meilleure pour *Workshop2*. Cela peut s’expliquer par le fait que les machines de traitement *Workshop2* étaient globalement plus chargées que celles de *Workshop1*, et que la réduction des taux d’échantillonnage est plus efficace en terme de réduction de l’exposition au risque avec une augmentation de la charge des machines de traitement.

La Figure 2.17 représente l’évolution temporelle de l’ensemble (tous outils confondus) $MaxW@R$ et $MeanW@R$ avec le plan d’échantillonnage initial comparé au plan calculé par le MOGA ($MaxW@R^{gen}$ et $MeanW@R^{gen}$). Les résultats tirés de cette figure confirment les améliorations potentielles en matière de maîtrise de l’exposition aux risques. De plus, ces améliorations sont effectives sur toute la période de production considérée, en particulier pour le $MeanW@R$.

Le délai n’était pas un critère de décision dans notre algorithme, car ce n’est pas la principale préoccupation des fabricants dans cette étude de cas. Cependant, il a été démontré que la variation du temps de retard métrologique a un impact sur la variation en W@R (SAHNOUN et al., 2012). C’est pourquoi le retard de temps de métrologie τ a été enregistré dans ces expériences. L’observation de τ avant et après

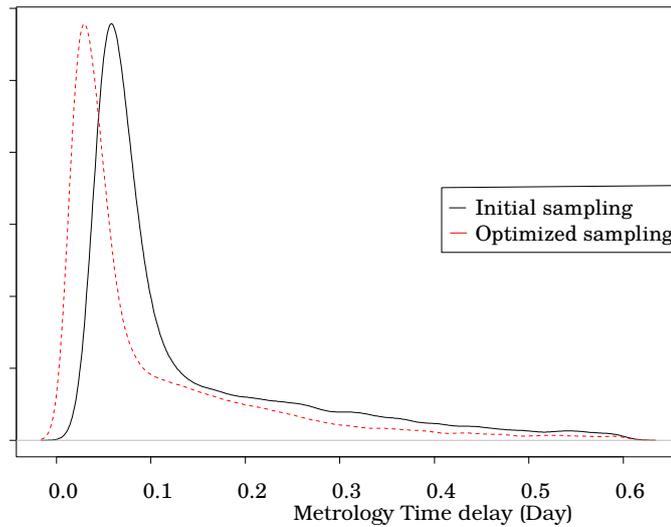


FIGURE 2.18 – Comportement des lots entre les machines de productions et d'inspections

l'obtention du plan d'échantillonnage optimisé par le MOGA confirme cette relation. Le temps de retard métrologique a été amélioré, comme le montre la Figure 2.18 : la moyenne et l'écart-type de τ sont réduits respectivement de 40% et 70%.

2.4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai détaillé une partie de mes travaux durant sur le développement d'outils d'aide à la décision pour la planification des plans d'inspection dans le domaine de l'industrie semi-conducteur. Ces travaux se sont déroulés principalement durant mon poste d'ingénieur de recherche au laboratoire G-scop puis ont continué après sous forme de collaboration, avant et pendant mon poste au CESI.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent clairement la valeur ajoutée d'un plan d'inspection optimale basé sur le risque. Ils ont montré aussi l'efficacité de l'indicateur choisi pour l'estimation des risques.

Cette recherche montre également l'importance de la tâche de transport des lots entre les différentes machines. Cela va ouvrir d'autres horizons de recherches qui vont être détaillés dans les prochains chapitres. Concernant les cas où nous avons relevé des problèmes sur les produits et donc les machines de production, des actions de qualification ou de maintenance devront être supervisés. J'ai mené aussi durant cette période des collaborations, notamment avec Eric Zamaï et Mohammed-Farouk Bouaziz, sur la prédiction de l'état des machines et la mise en place de maintenance prédictive.

3

Gestion des systèmes de production d'énergie renouvelable

L'un des plus grands défis auxquels l'humanité devrait faire face est la production énergétique qui connaît de plus en plus de demande et plus de contraintes environnementales (HIGHTOWER et PIERCE, 2008). Le développement des énergies renouvelables représente l'une des priorités de l'Europe dans les programmes de recherche et d'investissement (HORIZON-2020, 2018). Mes travaux dans ce domaine se sont focalisés sur l'amélioration de la productivité des parcs éolienne offshore et des installations de traitement de bio-déchets et de méthanisation. Ces deux sources d'énergies renouvelables représentent à mon avis et d'après la littérature (PERVEEN, KISHOR et MOHANTY, 2014) des alternatives très intéressantes aux énergies fossiles. Au-delà du développement technologique du procédé de transformation de l'énergie du vent ou les biodéchets en électricité, plusieurs autres problématiques scientifiques liées à l'optimisation de l'exploitation de ces installations sont d'actualités. Les plus pertinentes sont dûes au fait que ces installations restent nouvelles telles que l'optimisation des processus d'installation et de maintenance, la réduction de la variabilité de production, la problématique de stockage d'énergie, la minimisation des risques de black-out, l'installation des stations de traitement de production d'électricité, etc. Dans mes travaux je me suis intéressé aux problèmes de réduction des coûts et des effets néfastes sur l'environnement, de la tâche de maintenance dans les parcs éoliens offshore, ainsi que la réduction de coût de production des biogazs à partir des bio-déchets conditionnés.

Une grande partie de ces travaux dans le domaine de l'énergie éolienne a été mené dans le cadre du projet Interreg Mer-Innovate, qui s'intéresse à l'optimisation de la maintenance des parcs éoliens offshore. J'ai eu à développer cette axe à travers le développement des collaborations avec d'autres laboratoires intéressés par la même problématique, notamment l'école des mines de Nantes et l'université de Lorraine, pour étudier l'exploitation de nouvelles techniques telles que le remanufacturing. J'ai aussi défini et encadré deux sujets de thèse sur le même sujet avec l'université de El-djilali el-yabes de Sidi belabes en Algérie.

Mes travaux dans le domaine de traitement des biodéchets ont été déclenchés par ma participation dans le projet PcBioD, qui s'intéresse à l'étude de la faisabilité d'installation de déconditionneurs utilisés dans le processus de traitement de biodéchets conditionnés. Nous nous sommes intéressés à la problématique d'installation des déconditionneurs dans la région Normande en respectant les contraintes réglementaires et les coûts de transport pour la collecte et la distribution. Nous avons étendu ce sujet à travers une thèse en collaboration avec Noema Business School, qui se focalise sur le transport multi-modela et le développement des processus de négociation entre les centres de collecte et de traitement pour l'établissement des contrats.

Ma démarche globale dans le traitement de ces systèmes complexes, est basée sur la modélisation du système concerné sous forme de systèmes multi-agents. Une fois tous les éléments du système identifiés et renseignés, nous développons une simulation assez complète du système, ce qui nous permet de tester plusieurs métriques en même temps. Par la suite, plusieurs techniques de simulation sont utilisées pour améliorer les performances du système, soit en testant des postulats généraux, soit par l'essai de plusieurs scénarios potentiels ou par l'utilisation des techniques de sim-optimisation.

Ce chapitre est divisé en deux parties : une partie concerne le développement dans le domaine des éoliens offshore, et une autre partie concerne la méthanisation des bio-déchets. La première partie traite le problème de la maintenance des parcs éoliens offshore et l'utilisation de la technique de remanufacturing pour l'approvisionnement en pièces de rechange.

La deuxième partie va discuter le processus de modélisation et de simulation du processus de traitement de bio-déchets conditionnés, puis il finira par discuter les travaux sur les processus de négociation des contrats dans ce domaine.

3.1 Amélioration de rendement et propreté des parcs éoliens offshore

3.1.1 introduction

L'énergie produite par des éoliennes offshore représente une piste très prometteuse qui peut remplacer les énergies traditionnelles. Elle est supposée devenir la première source d'électricité dans le futur (HENDERSON et al., 2003). Un parc éolien offshore est un ensemble d'éoliennes utilisées pour générer de l'électricité. Le choix des sites d'implantation de ce type de parc dépend principalement de (1) la distance de la côte, (2) la profondeur des eaux, et (3) la qualité du vent. L'Europe est leader mondial dans ce domaine grâce aux parcs développés surtout par les pays nordiques tels que la Suède, la Hollande ou le Danemark (PINEDA et al., 2014). Plusieurs pays sont de plus en plus intéressés par ce type de technologie. La France connaîtra ses premiers parcs offshore début 2018 mais le projet de Fecamp a prit du retard et est en cours d'installation en ce moment. Le plus grand obstacle devant le développement de cette énergie est le prix d'installation, d'exploitation et de maintenance élevé comparé aux autres sources d'énergies (BRENNAN, 2013). La maintenance des éoliennes offshore est une tâche complexe, coûteuse et difficile à effectuer surtout quand les conditions météorologiques sont dégradées. D'après (OWEE et HASSAN, 2001), le coût de la maintenance constitue de 25 à 30% du prix global du kWh, alors qu'il est seulement compris entre 10 et 15% pour des éoliennes onshores (terrestres). Ce coût dépend très fortement de la stratégie de maintenance, par exemple la maintenance préventive (systématique et/ou conditionnelle) représente entre 0.003 et 0.006 (€/kWh) tandis que la maintenance corrective représente entre 0.005 et 0.01 (€/kWh) (DIMEAS et HATZIARGYRIOU, 2005). La réduction des coûts de la maintenance devient donc une nécessité pour l'avenir des éoliennes offshore.

L'utilisation des nouvelles techniques de maintenance est la seule manière de réduire le coût de la maintenance des éoliennes offshore. Etant donné les spécifications des parcs éoliens offshore, la e-maintenance semble une option intéressante pour avoir des plans de maintenance efficaces et moins cher (HOLMBERG et al., 2010). Cette technologie a prouvé son efficacité dans plusieurs applications offshore telles

que les plateformes pétrolières. Elle a aussi été utilisée pour la maintenance des parcs éoliens offshore dans la mer du nord (LIYANAGE, 2008). Plusieurs travaux s'intéressent à l'optimisation des plans de maintenance des éoliennes offshore. Par exemple, dans (PIETERMAN et al., 2011), les auteurs ont proposé une architecture permettant d'intervenir rapidement en cas de panne en installant un bateau permanent dans le parc éolien. Ce dernier va constituer une base pour les équipes de maintenance du parc. Rademakers et al (RADEMAKERS et al., 2003) ont proposé de placer plusieurs grues de 50 MT pour réduire le temps de maintenance des pièces conséquentes telles que les boîtes de vitesse. Ils ont montré que la multiplication des grues à 150 K€ coûtera moins cher à long terme. (BRENNAN, 2013) et (NIELSEN et SØRENSEN, 2011) ont proposé une maintenance basée sur le risque pour éviter les maintenances correctives très coûteuses. D'un point de vue opérationnel et vu la rareté des bons experts, même s'il y a de très bons programmes de monitoring déjà opérationnels, les pannes continuent d'avoir lieu, causant des pertes énormes pour les exploitants et mettant en cause l'investissement qui a été mis dans la maintenance conditionnelle. Plusieurs chercheurs ont essayé de surpasser ce problème en utilisant des systèmes expert basés sur des techniques d'intelligence artificielle. Un état de l'art très intéressant a été fait par Liao (LIAO, 2005) et Kalogirou (KALOGIROU, 2003) sur les systèmes experts et leurs utilisations. A titre d'exemple Wang (WANG, 2003) utilisait des systèmes experts pour le monitoring et la maintenance des systèmes complexes. La modélisation et la simulation des parcs éoliens offshore est une étape nécessaire pour pouvoir optimiser les plans de maintenance et observer l'évolution du système dans le temps. L'intervention de plusieurs acteurs dans le fonctionnement du système rend la tâche de modélisation complexe et difficile. Plusieurs équipes de recherche se sont intéressées au développement de simulateurs permettant de reproduire une ou plusieurs parties du système. (PÉREZ et al., 2010) présente un modèle simple basé sur les réseaux de Petri, il propose aussi plusieurs implémentations possibles pour son modèle. (BYON et al., 2011a) ont proposé un simulateur basé sur la Spécification Des Systèmes à Événement discret (Discrete Event System Specification (DEVS)). Ils ont modélisé chaque composante de l'éolienne, et leur simulateur a permis de montrer les avantages de l'utilisation d'une maintenance préventive conditionnelle plutôt qu'une maintenance préventive systémique. L'étude s'est intéressée uniquement à la maintenance de la boîte de vitesse. Pieterman et al (PIETERMAN et al., 2011) ont aussi développé un modèle basé sur l'historique pour le calcul des coûts de maintenance. Ils ont étudié le système de transport et proposé une solution optimale pour le cas d'étude qu'ils avaient. Toutes les précédentes études ont été confrontées à l'incontournable problème de la complexité de la planification de maintenance des éoliennes offshore, dû au nombre de paramètres non maîtrisés dans le système, tels que les conditions météorologiques, le facteur humain et la difficulté d'accès, etc. L'utilisation des systèmes distribués, notamment les systèmes multi-agents (MAS), est une solution intéressante pour ce genre de système. Plusieurs études (TAYLOR et SAYDA, 2008) (TONY, 2001) ont appliqué les systèmes multi-agents pour la modélisation et la simulation des parcs éoliens parce que les méthodes conventionnelles de modélisation ne permettent pas de traduire fidèlement tous les phénomènes qui peuvent apparaître dans un tel système complexe (LIYANAGE, 2008). Ce type d'architecture consiste à modéliser chaque partie du système indépendamment, et de gérer plus tard les interactions et la négociation entre les différentes parties du système (DIMEAS et HATZIARGYRIOU, 2005). Cette partie va décrire mes contributions par rapport à trois problématiques :

- Évaluation et optimisation de la stratégie de maintenance pour PEO

- Utilisation des techniques de "remanufacturing" pour l'approvisionnement de la maintenance.

Plusieurs problématiques sont traitées pour satisfaire ces contributions notamment la modélisation et simulation des systèmes multi-agents et l'évaluation des systèmes complexes.

3.1.2 Stratégie de maintenance des éoliennes offshore

L'un des avantages importants des éoliennes offshore est la possibilité d'installer des éoliennes beaucoup plus grandes (p. ex. longueur de pale supérieure à 90 m) permettant une production d'électricité de 6MW et plus KOOIJMAN et al., 2003. De telles dimensions et des conditions climatiques extrêmes augmentent la difficulté d'exploitation et de maintenance (O&M), même si le coût par kW.h diminue avec la taille de la turbine BRAAM et VERBRUGGEN, 2000. Les activités de maintenance pour les éoliennes offshore sont soumises à des contraintes de conditions météorologiques très importantes. De plus, plusieurs maintenances peuvent durer de nombreux jours, ce qui signifie qu'il faut avoir des fenêtres de temps avec des conditions météorologiques permettant l'intervention des équipes. Ceci n'arrive que quelques fois dans l'année surtout dans des emplacements tels que la Manche ou la Mer du nord. Il faut donc définir et tester des politiques de maintenance permettant de respecter ces contraintes et assurer le bon fonctionnement des éoliennes. Il faut tout d'abord comprendre le comportement des éoliennes offshore face aux différents facteurs qui peuvent l'influencer.

Modélisation multi-agent d'un parc éolien

La maintenance d'un parc éolien en mer est une tâche complexe parce qu'il se déroule sur plusieurs sites et il est soumis à des contraintes liées aux conditions météorologiques et à la disponibilité de ressources humaines, de pièces de rechange, de bateaux et de grues qualifiées. Le succès d'une intervention de maintenance dépend de l'intervention de plusieurs parties du système. La décomposition du système en plusieurs parties en interaction et en considérant chaque partie séparément est un moyen très efficace d'éviter les problèmes liés à la complexité et de rendre la tâche de modélisation facile. L'utilisation d'une architecture multi-agents est une méthode intéressante et utile pour modéliser et simuler un tel système.

Nous avons divisé le système en cinq parties interconnectées, chacune composée d'un ou plusieurs agents autonomes, comme le montre la Figure 3.1. Nous avons identifié cinq types d'agents :

- Turbine
- Stratégie de maintenance
- Ressources
- Surveillance
- Météo

Les différentes interactions et relations entre agents sont numérotées de 1 à 8 sur la Figure 3.1.

Je vais décrire brièvement les différents agents en mettant l'accent sur l'agent "turbine" et "monitoring" qui représentent les éléments les plus importants dans le modèle adopté.

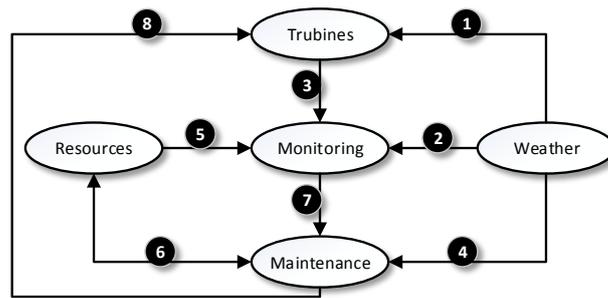


FIGURE 3.1 – modèle multi-agents : entités et interactions

Agent "Turbine" Chaque éolienne est représentée par un agent autonome capable d'interagir avec son environnement composé d'autres agents tels que : "Maintenance", "Météo" et "Monitoring" comme illustré à la Figure 3.1.

Chaque agent "Turbine" est caractérisé par des variables qui représentent l'état de la turbine, son facteur de santé de l'équipement (*EHF*) et l'énergie qu'elle produit. La figure 3.2 détaille les paramètres de l'agent "Turbine" et leurs relations. Chaque agent "Turbine" suit deux règles : la dégradation de la turbine et la production de la turbine, qui sont influencées par plusieurs variables internes (p. ex. la qualité des composants, la taille de la turbine, son âge, les points) et des variables externes générées par les autres agents :

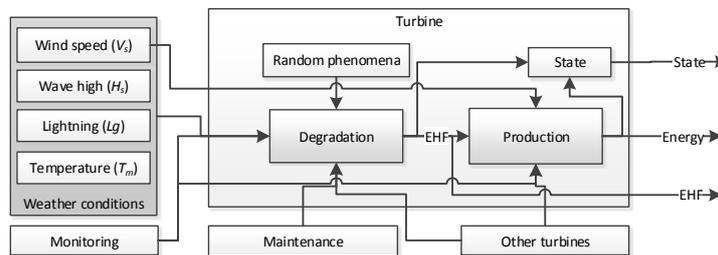


FIGURE 3.2 – Composition et comportement de l'agent "Turbine"

- Les conditions météorologiques déterminent l'énergie produite grâce à la vitesse et la direction du vent (Figure 3.1, relation 1). Elle affecte également la dégradation de l'éolienne, où les conditions météorologiques sont l'une des principales causes de défaillance.
- L'agent "maintenance" affecte directement la production et le niveau de dégradation de la turbine. En effet, la turbine est arrêtée pendant la maintenance. Toutefois, après une intervention de maintenance, le *EHF* est augmenté à sa valeur maximale. (Figure 3.1, relation 8).
- La relation entre l'agent "Monitoring" et la turbine (Figure 3.1, relation 3) consiste en l'information fournie par la turbine sur son état, son *EHF* et sa production énergétique.

Production d'énergie L'énergie produite par une éolienne dépend de la vitesse du vent, de l'état de l'éolienne et de sa capacité de production. Nous considérons plusieurs spécifications techniques associées à la production d'électricité en fonction de la vitesse du vent V_s principalement :

- V_{cin} la vitesse du vent de démarrage représentant la vitesse du vent la plus faible à laquelle l'électricité peut être produite.
- V_{cout} la vitesse du vent qui est la vitesse maximale admissible pour un fonctionnement sûr. L'éolienne est arrêtée si la vitesse du vent dépasse cette valeur.
- V_r la vitesse nominale du vent qui est la vitesse minimale à laquelle chaque éolienne individuelle peut produire son énergie maximale.

La puissance générée par chaque éolienne suit un modèle classique de la courbe de puissance des éoliennes (SAHNOUN et al., 2014b) telle que présentée sur la Figure 3.3. Selon (KARKI et PATEL, 2009) la puissance générée par une éolienne avec une vitesse du vent de V_s est calculée par l'équation suivante :

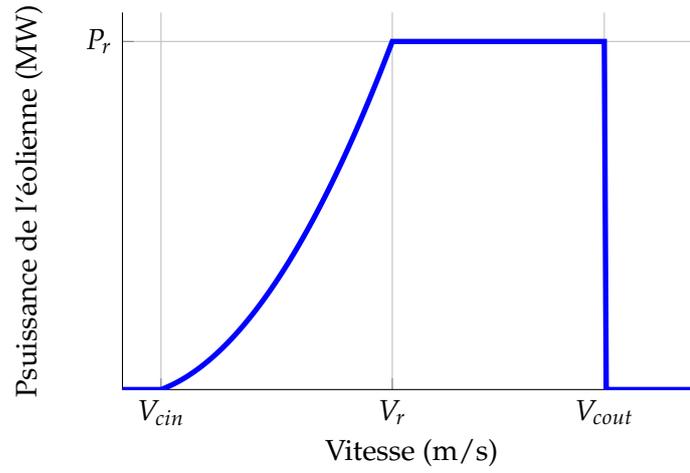


FIGURE 3.3 – la courbe de puissance d'une éolienne de $p_r = 6$ MW

$$P = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq V_s < V_{cin} \\ P_r \cdot (a + b \cdot V_s + c \cdot V_s^2) & \text{if } V_{cin} \leq V_s < V_r \\ P_r & \text{if } V_r \leq V_s < V_{cout} \\ 0 & \text{if } V_{cout} \leq V_s \end{cases} \quad (3.1)$$

Où P_r est la puissance de sortie nominale de l'éolienne. Les paramètres a , b et c dans l'équation (3.1) sont obtenus des équations suivantes :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[V_{cin}(V_{cin} + V_r) - 4V_{cin}V_r \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \\ b &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[4(V_{cin} + V_r) \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{cin} + V_r) \right] \\ c &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \end{aligned}$$

La vitesse du vent est mesurée par des stations météorologiques souvent situées au sol ou au niveau de la mer. Cette vitesse mesurée n'est pas la même que la vitesse à la hauteur de la nacelle et cette différence dépend de la hauteur de la nacelle, de la hauteur de la station météorologique et du type de terrain séparant la station et la turbine (BURTON et al., 2011a). La vitesse du vent à la hauteur de l'éolienne est donnée par la relation suivante (HAU et VON RENOUARD, 2013; ZHOU, YANG et FANG, 2006) :

$$V_s = V_0 \times \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

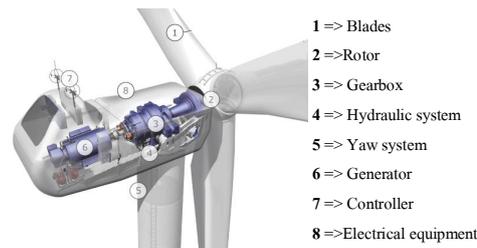


FIGURE 3.4 – Les plus importantes composants d’une éolienne offshore

Où :

- h : La hauteur de la nacelle
- h_0 : La hauteur du point de mesure
- V_s : La hauteur de l’anémomètre de vitesse du vent h (nacelle) à l’emplacement de l’éolienne
- V_0 : La vitesse du vent à la hauteur du moyeu h_0
- α : Le coefficient de la loi de vitesse du vent, cette valeur dépend principalement du terrain géographique local.

Dégradation de l’éolienne : Afin de définir une planification efficace de la maintenance, il est important d’analyser le type de pannes et leurs causes. Cette analyse permettra de définir facilement l’interaction entre la turbine et son environnement pour une meilleure interopérabilité de la modélisation multi-agent. Afin de comprendre le comportement d’une éolienne offshore et les différentes interactions avec son environnement, il est important de déterminer les causes de panne de chaque sous composant. La dégradation des éoliennes est causée par plusieurs phénomènes et affecte plusieurs parties de l’éolienne. Une étude d’un parc éolien danois HYERS et al., 2006 a montré que 60% des pannes concernent le système électrique, la boîte de vitesses, le système de contrôle directionnel, le générateur, et le système hydraulique (Figure 3.4).

En ce qui concerne la classification des causes de défaillance des différents composants de l’éolienne, nous avons utilisé dans un premier temps les trois grands domaines suivants : les conditions météorologiques, les erreurs d’exploitation humaines et la qualité du produit ou les effets techniques représentés sur la figure 3.5. L’élaboration d’une stratégie de maintenance doit tenir compte de tous ces éléments. Le modèle que nous décrivons ci-dessous prendra en compte les effets des conditions météorologiques sur les turbines, les différents types de défaillance dus aux défauts de construction ou d’installation sous-jacents.

Du point de vue de la fiabilité, les parties de l’éolienne considérées sont connectées en série, ce qui permet l’utilisation d’indicateurs globaux de dégradation affectés par toutes les causes mentionnées dans la section précédente TAVNER, 2012. Nous suggérons plusieurs indicateurs de performance tels que : le facteur de santé de l’équipement (EHF) et le temps écoulé depuis la dernière inspection ou maintenance pour estimer le niveau de dégradation de l’éolienne et définir son état.

Les $EHFs$ de chaque éolienne diminuent avec le temps en raison de l’usure et des effets des intempéries. Il varie entre 10 (l’éolienne est neuve ou comme neuve) et 0 (la turbine est en panne). Le modèle EHF tient compte de la dégradation aléatoire due

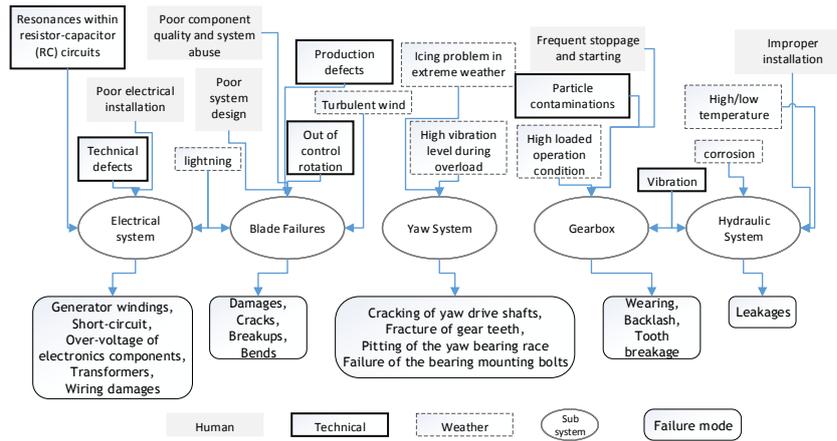


FIGURE 3.5 – Les principales causes de pannes d'une éolienne off-shore

à l'installation inadéquate, à la mauvaise qualité des composants de l'éolienne ou à des événements rares comme la foudre. Il varie également en fonction de la tâche de maintenance exécutée sur la turbine. Le EHF d'une turbine donnée i à l'instant $k + 1$ est exprimé comme suit :

$$EHF_i(k+1) = \begin{cases} 0 & \text{if } f_i(k+1) = 1 \\ EHF_{max} & \text{if } M_i(k+1) = 1 \\ \gamma_i(k) \times (EHF_i(k) - deg_{td}(k+1) - deg_{tr}(k+1)) & \text{Otherwise} \end{cases}$$

Où :

- $f_i(k+1)$: est la probabilité qu'une panne qui arrête la turbine i , se produise à l'instant $k + 1$. Elle suit une distribution de probabilité exponentielle avec une moyenne de 5 ans qui représente le MTBF (temps moyen entre les pannes) de l'éolienne. Cette valeur représente la moyenne des défaillances imprévues les plus importantes qui provoquent l'arrêt immédiat de l'éolienne, comme la panne de la boîte de vitesse, des pales, du générateur ou du système hydraulique SAHNOUN et al., 2014a.
- EHF_{max} : est la valeur de EHF quand une turbine est neuve. Nous considérons que l'approche de la maintenance est "as good as new", c'est-à-dire qu'après une maintenance, la turbine devient comme neuve, au moins pour sa fonction principale, (BYON et al., 2011b). Dans notre cas le $EHF_{max} = 10$
- $M_i(k+1)$: est une variable égale à 1 lorsqu'une intervention de maintenance est effectuée sur la turbine i (0 sinon).
- $deg_{td}(k+1)$: est la dégradation en fonction du temps par pas de simulation (un jour dans notre cas). Il dépend de la dernière valeur de $EHF(k)$, où le taux de dégradation est proportionnel à la dégradation de l'éolienne ($EHF_{max} - EHF(k)$). Par conséquent, la dégradation temporelle déterministe est définie comme suit :

$$deg_{td}(k+1) = \phi \times (EHF_{max} - EHF(k))$$

Où : ϕ est défini empiriquement pour assurer une valeur EHF égale à 0 après 10 ans sans l'intervention d'aucun phénomène externe.

- deg_{tr} : est la dégradation aléatoire en fonction de l'environnement par étape de simulation (un jour). Il suit une distribution uniforme avec les paramètres $a = 0$ et $b = \theta \times deg_{td}$. θ représente le rapport maximal entre la dégradation déterministe et la dégradation aléatoire. Dans cette étude, $\theta = 10$.
- $\gamma_i(k)$: représente le coefficient de l'effet des conditions météorologiques sur la dégradation de l'éolienne, il est exprimé comme suit :

$$\gamma_i(k) = \gamma_i^{Tm}(k) \times \gamma_i^v(k) \times \gamma_i^{lg}(k)$$

Où :

$$\gamma_i^{Tm}(k) = \begin{cases} \gamma^{Tm} & \text{if temperature degrades the turbine } i \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma_i^v(k) = \begin{cases} \gamma^v & \text{if wind speed degrades the turbine } i \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma_i^{lg}(k) = \begin{cases} \gamma^{lg} & \text{if lightning degrades the turbine } i \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Les valeurs de γ^{Tm} , γ^v et γ^{lg} sont incluses dans l'intervalle $[0, 1[$ et indiquent respectivement le taux de l'effet de la température, la vitesse du vent et la foudre sur l'éolienne. Par exemple, si l'éolienne i avec un $EHF = EHF_{Avant\ effet\ vent}$ est soumise à un vent fort, son EHF Après effet vent peut être défini comme suit :

$$\begin{aligned} EHF_{After\ wind\ effect} &= \gamma_i^{Tm}(k) \times \gamma_i^v(k) \times \gamma_i^{lg}(k) \times EHF_{Before\ wind\ effect} \\ &= 1 \times \gamma^v \times 1 \times EHF_{Before\ wind\ effect} \end{aligned}$$

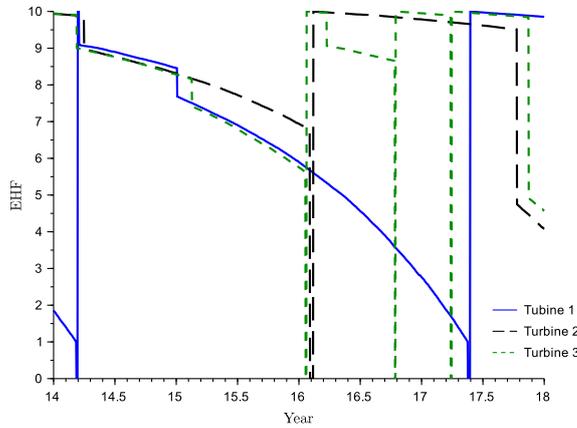


FIGURE 3.6 – Exemples de la variation de l'EHF pour trois éoliennes différentes

Nous considérons que les conditions météorologiques peuvent dégrader l'éolienne si elles dépassent les valeurs nominales, c'est-à-dire $V_s > V_r$; $T_m < 0^\circ$ ou $T_m > 40^\circ$. En ce qui concerne la foudre, elle dégrade une ou plusieurs turbines quand elle se produit. La Figure 3.6 illustre la variation en EHF pour trois éoliennes différentes. La valeur de l' EHF diminue avec le temps et aussi en raison de changements aléatoires dus à l'effet des conditions météorologiques ou à des défaillances internes. Après chaque intervention de maintenance, le EHF est remis à 10 (max).

Chaque turbine peut se trouver dans un nombre fini de situations (états) concernant son niveau de dégradation, les tâches de maintenance et son fonctionnement. Les différentes situations de la turbine sont comme suit :

- Situation 1 ($8 \leq EHF \leq 10$) : le mode de fonctionnement est "Normal" et l'éolienne peut être en fonctionnement ou arrêtée en fonction de la maintenance et de la vitesse du vent. Notez que si la vitesse du vent est supérieure à $25m/s$, l'éolienne doit être arrêtée afin d'éviter que le vent ne la brise.
- Situation 2 ($4 \leq EHF < 8$) : le mode de fonctionnement est "Dégradé" et la turbine peut être en fonctionnement ou non, la probabilité qu'une tâche de maintenance soit effectuée est plus grande que la première situation.
- Situation 3 ($1 \leq EHF < 4$) : le mode de fonctionnement est "Alerte" et la turbine peut être en fonctionnement ou non, la probabilité qu'une tâche de maintenance soit effectuée est plus grande que les situations précédentes (Normal et Dégradé).
- Situation 4 ($EHF \leq 1$) : le mode de fonctionnement est "en panne" et la turbine est arrêtée. Dans ce cas, la turbine a besoin d'une action de maintenance corrective.

L'agent "Weather"

Les variations des conditions météorologiques sont représentées par l'agent "Weather". Ceci est caractérisé par la vitesse du vent V_s , la hauteur des vagues H_s , la foudre et la visibilité. Ces paramètres sont fournis par des données historiques réelles ou par la distribution statistique appropriée (Weibulle pour V_s et Rayleigh pour H_s BURTON et al., 2011a) avec un paramètre adapté selon les saisons. Les limites des conditions météorologiques, qui limitent l'exécution des tâches de maintenance, sont définies par une vitesse du vent $V_s = 8m/s$ et une hauteur de vague $H_s = 1,5m$.

Le comportement de l'agent "Weather" est défini par une fonction de "mise à jour" capable de générer les caractéristiques de la météo qui seront directement utilisés par la fonction "degrad" de l'éolienne pour dégrader ses performances en fonction des conditions météorologiques. Cet agent affecte la dégradation des turbines (Figure 3.1, relation 1), la décision de "Monitoring" (Figure 3.1, relation 2) et la tâche de maintenance.

L'agent "Resource"

Nous avons défini plusieurs types d'agents ressources, qui peuvent être humains ou matériels.

- Les agents de matériaux sont : bateaux, pièces de rechange et grues
- Les agents humains sont : ingénieurs et techniciens

La différence entre un ingénieur et un technicien réside dans le coût de chacun et le type de tâches qu'il effectue.

Chaque agent "Ressource" a deux états : "Occupé" pendant l'intervention de maintenance et "disponible" sinon. L'utilisation de chaque agent matériel génère un coût et une empreinte carbone, alors que l'utilisation d'un agent humain génère un coût seulement. Dans cette étude, nous n'avons pas considéré l'empreinte carbone et nous avons considéré que la taille du stock de pièces de rechange est illimitée.

L'agent "Maintenance"

Les interventions de maintenance sont représentées par différents types d'agents. Chaque agent se caractérise par son type, son coût et ses besoins propres en termes de ressources et de conditions d'exploitation (fenêtre météo, type de panne). Nous avons considéré trois types de maintenance comme le montre la Figure 3.7 :

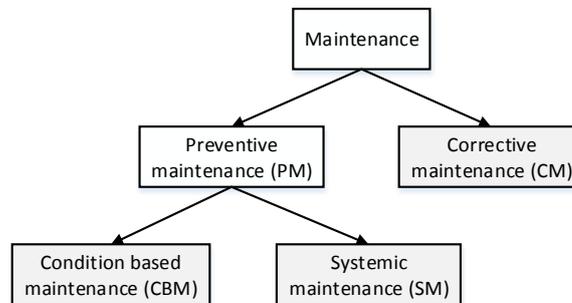


FIGURE 3.7 – Classification des types d'entretien

- *Maintenance corrective (CM)* : ce type de maintenance est effectué pour réparer des pannes importantes provoquant l'arrêt total de l'éolienne. Il s'agit d'une stratégie très coûteuse qui nécessite du matériel important (sous-traitants, moyen ou grand bateau, grues lourdes, etc.) et des délais entre 2 et 6 jours pour effectuer les tâches nécessaires. Cette stratégie n'est donc pas recommandée. Dans notre modèle, cette stratégie n'est utilisée que si l'éolienne a un $EHF = 0$.
- *Maintenance systématique (SM)* : c'est un des deux types de maintenance préventive (voir Figure 3.7). Elle s'effectue selon un calendrier défini et lorsque les conditions météorologiques le permettent. Si nous avons un modèle de dégradation régulier, cette stratégie est la plus efficace. Souvent, les lubrifiants et autres composants, tels que les joints et les tuyaux, ont une durée de vie prévue de moins d'un an et sont remplacés. De plus, des inspections régulières sont effectuées au cours de la tâche SM. Le SM prend moins d'une journée et peut aller jusqu'à deux jours et nécessite en moyenne un ingénieur et deux techniciens.
- *Condition Based Maintenance (CBM)* : c'est la deuxième variante de la maintenance préventive (voir Figure 3.7). Elle est guidée par les informations sur les performances de l'éoliennes fournies par le système de supervision. Cette stratégie est généralement utilisée en conjonction avec un arbre de défaillance pour diagnostiquer les causes principales. Il est recommandé de profiter de l'occasion des tâches liées au méthane de houille pour exécuter les tâches prévues pour la maintenance systématique.

Les différents types d'agents "Maintenance" nécessitent une gestion attentive des interactions entre les faits et les dates potentielles d'intervention afin d'accroître l'efficacité des maintenances. Nous avons supposé que l'action de maintenance restaure la turbine à son mode de fonctionnement "Normal", et restaure tous les indicateurs de fonctionnement à leur état requis avant la panne. Le comportement des agents de maintenance peut être décrit par les fonctions suivantes :

- *Demande de ressources* : elle combine les ressources matérielles et humaines nécessaires à l'exécution de la tâche spécifiée (Figure 3.1, relation 6). L'agent

"maintenance" demande aux ressources d'être occupé lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

- *Repair* : cette fonction lance l'action de réparation de la turbine (Figure 3.1, relation 8), pendant laquelle l'éolienne est arrêtée et est mise en mode maintenance.
- *Return resources* : une fois la maintenance terminée, cette fonction libère les ressources utilisées (Figure 3.1, relation 6), permet à la turbine de redémarrer et provoque l'autodestruction de l'agent "Maintenance".

L'agent "Monitoring"

Cet agent est chargé de planifier les tâches de maintenance et d'établir les priorités entre les différentes éoliennes à maintenir. Il contrôle l'état des autres agents (Figure 3.1, relation 3) et assure que chaque éolienne reçoit la maintenance appropriée.

Le choix de l'éolienne à maintenir repose sur les critères suivants :

- La date du prochain entretien systémique préventif (SM),
- Le niveau de dégradation,
- Le mode de fonctionnement et son état,
- Les conditions météorologiques (Figure 3.1, relation 2)
- Les ressources disponibles (Figure 3.1, relation 5).

Le choix du type de maintenance dépend de la cause de sélection de la turbine, c'est-à-dire que le type de maintenance est systémique (SM) lorsque l'éolienne est choisie en fonction du temps, et basé sur l'état (CBM) lorsque l'éolienne est choisie en fonction de la dégradation (*EHF*). Si la fenêtre météo ne permet pas l'exécution de longues tâches de maintenance, c'est le "Monitoring" qui choisit un autre type de maintenance palliative plus court. De plus, lorsqu'une éolienne tombe en panne, une action corrective de maintenance (CM) est choisie et réalisée. Cet agent peut commander plusieurs tâches de maintenance pour plusieurs turbines en même temps (Figure 3.1, relation 7). La Figure 3.8 résume le fonctionnement global de l'agent de "Monitoring".

L'agent "Monitoring" possède deux comportements : il recueille des renseignements auprès des autres agents et choisit l'éolienne à maintenir et le type de maintenance à utiliser.

Modèle des coûts

Le coût de la maintenance est un critère important dans la prise de décision de la stratégie de maintenance. Cela dépend de plusieurs paramètres tels que les types de défaillance, les types et la durée de la maintenance, les conditions météorologiques et le coût des installations de maintenance NILSSON et BERTLING, 2007.

Le modèle de coût adopté est un paramètre influencé par plusieurs agents, par exemple : l'agent de maintenance génère un coût à chaque action de maintenance ; ce coût est fonction du type de maintenance choisi et des ressources utilisées. Lorsque la turbine est arrêtée ou fonctionne en mode dégradé, l'énergie produite est inférieure à l'énergie nominale, cette perte de production est également considérée comme un coût lié à la stratégie de maintenance. Nous considérons que la maintenance corrective est plus coûteuse qu'une maintenance préventive ; selon Rademakers2003 nous considérons que le coût d'une maintenance corrective est équivalent à celui de

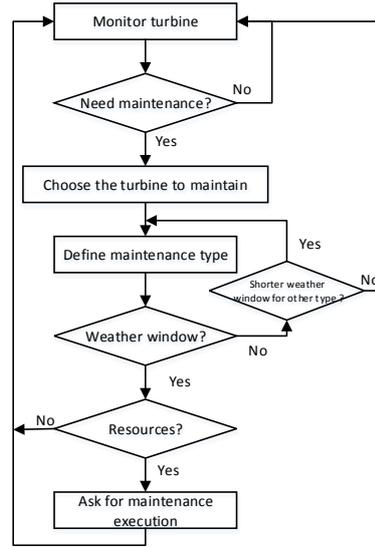


FIGURE 3.8 – fonctionnement de l'agent "Monitoring"

deux tâches de maintenance systémique. Lorsque la maintenance conditionnelle est utilisée, le coût de l'installation du système de surveillance s'ajoute au coût global de la maintenance et cela dépend de l'EHF de l'éolienne.

Le coût total (CT) de la maintenance sur une période de temps donnée peut être exprimé comme suit :

$$\begin{aligned}
 CT &= I_{s_{cbm}} \times C_{init} + C_{sm} + C_{cbm} + C_{cm} + C_{down} + C_{deg} \\
 &= I_{s_{cbm}} \times C_{init} + \sum_{k=1}^{k=T} CT(k)
 \end{aligned}$$

où :

- $I_{s_{cbm}}$: une variable binaire égale à 1 si un système de capteur pour la maintenance conditionnelle est installé et 0 sinon.
- C_{init} : le coût d'installation du système de surveillance pour la maintenance conditionnelle.
- C_{sm} , C_{cbm} et C_{cm} : sont respectivement le coût de la maintenance systémique, conditionnelle et corrective. Ils comprennent le coût des pièces de rechange et le coût des ressources humaines et matérielles.
- C_{down} : le coût de la perte d'énergie due à l'entretien ou à la défaillance de la turbine.
- C_{deg} : le coût de la perte d'énergie due au fonctionnement en mode dégradé.
- $CT(k)$ est le coût total à l'étape de simulation k , il peut être exprimé par la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 CT(k) = \sum_{tr=1}^{tr=NT} & (Down(tr,k) + C_{sm}(tr,k) \cdot X_{sm}(tr,k) \\
 & + C_{cbm}(tr,k) \cdot X_{cbm}(tr,k) \\
 & + P_e(tr,k) \cdot Deg(tr,k) \\
 & + C_{cm}(tr,k) \cdot X_{cm}(tr,k))
 \end{aligned}$$

où :

- NT est le nombre d'éoliennes dans le parc éolien offshore.

- $C_{sm}(tr, k)$, $C_{cbm}(tr, k)$ et $C_{cm}(tr, k)$ sont respectivement le coût en daly de la maintenance systémique, conditionnelle et corrective de la turbine tr en ce moment k
- $X_{sm}(tr, k)$, $X_{cbm}(tr, k)$ et $X_{cm}(tr, k)$ sont des variables binaires définies comme suit :

$$\begin{cases} 1 & \text{si le type d'entretien correspondant est} \\ & \text{effectué sur l'éolienne } tr \text{ à l'instant } k. \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- P_e est le profit généré par la turbine tr dans un état normal.
- $Deg(tr, k)$ le coût de la perte d'énergie due à la dégradation de la turbine tr à l'instant k . Elle peut s'exprimer comme suit :

$$Deg(tr, k) = \frac{EHF_{max} - EHF(tr, k)}{EHF_{max}}$$

. Le coût dû à la dégradation d'une turbine tr à l'instant k peut être exprimé comme suit :

$$C_{deg}(tr, k) = P_e(tr, k) \times Deg(tr, k)$$

- $Down(tr, k)$ est une variable binaire définissant l'état de la turbine tr , où :

$$Down(tr, k) = \begin{cases} 1 & \text{si l'éolienne } tr \text{ est en panne à l'instant } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Le coût de la perte d'énergie due à l'arrêt de la turbine en raison d'un entretien ou d'une défaillance d'une turbine tr à l'instant k peut être exprimé comme suit :

$$C_{down}(tr, k) = P_e(tr, k) \times Down(tr, k)$$

Interactions entre les agents

Supposons un parc éolien offshore qui comprend NT éoliennes, affectées par l'agent "Waether" ayant un impact à la fois sur la production et la dégradation des turbines. Chaque agent "Turbine" change d'état sous l'effet des agents "Maintenance" et "Weather". L'agent "Monitoring" évalue tous les états des turbines et fait rapport sur celles qui sont en panne ou qui doivent être maintenues. Il sélectionne l'éolienne à maintenir et le type de maintenance à effectuer et évalue si l'agent "Maintenance" est disponible, c'est-à-dire qu'il vérifie si l'agent "Maintenance" dispose des ressources suffisantes et des conditions météorologiques appropriées pour effectuer les tâches requises. L'agent "Maintenance" demande les ressources nécessaires et commence la réparation de la turbine pendant la durée définie par l'agent "Monitoring". Lorsque l'opération de maintenance est terminée, les ressources sont retournées avant l'autodestruction de l'agent "Maintenance". Les agents de ressources sont alors mis à disposition et attendent un nouvel appel par d'autres agents "Maintenance". La figure 3.9 montre les relations entre les agents et les décisions prises, ainsi que les actions entreprises par les agents.

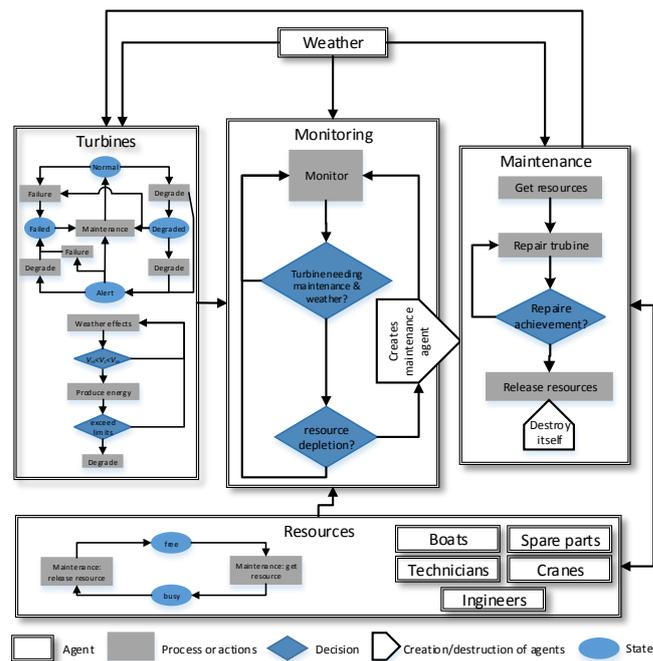


FIGURE 3.9 – Diagramme global de fonctionnement et de prise de décisions

Simulateur numérique et discussions

Cette section décrit le simulateur développé à partir du modèle présenté ci-dessus, le scénario utilisé pour comparer les différents types de maintenance et discuter des résultats des simulations réalisées en termes de coût et de production électrique de chaque stratégie de maintenance.

Nous avons utilisé le logiciel NetLogo 5.1.0 pour développer un simulateur basé sur le modèle défini dans la section précédente. NetLogo est un environnement de modélisation programmable multi-agent, particulièrement adapté à la modélisation de systèmes complexes évoluant dans le temps (TISUE et WILENSKY, 2004).

L'objectif du simulateur développé est de comparer différentes stratégies de maintenance en se basant sur la puissance générée et du coût de maintenance sur la durée de vie d'une turbine. L'interface du simulateur développé (Figure 3.10) est composée de trois types de vues :

1. La représentation du parc éolien offshore, composé d'éoliennes, et des équipes de direction telles que les ingénieurs, les techniciens et leurs outils.
2. Représentations des indicateurs de suivi (météo, paramètres des éoliennes et évolution des tâches de maintenance, ...) qui permettent la prise de décision.
3. Élément Interface de commande composée d'un ensemble de boutons, de curseurs et d'interrupteurs qui permet à l'utilisateur de modifier les paramètres de la simulation tels que le nombre de turbines, le type de maintenance et la taille de l'équipe de maintenance.

Une vue 2D dédiée permet de visualiser les animations des turbines et les positions de maintenance. Cette interface facilite la compréhension des actions et du

comportement de chaque agent. L'interface animée du simulateur est composée des éléments suivants :

- Le parc éolien composé d'éoliennes. Chaque éolienne est animée lorsqu'elle produit de l'énergie. L'état de chaque turbine est représenté par une couleur différente : vert pour le fonctionnement normal, jaune pour l'alerte, orange pour le critique et rouge pour le cassé. Lors de l'entretien, la couleur de la turbine passe au noir.
- La tâche de maintenance est représentée visuellement par une clé placée à côté de la turbine qui est en maintenance. La clé disparaît lorsque l'opération de maintenance est terminée.
- Les ressources spécifiques aux ingénieurs, techniciens, bateaux et grues sont représentées par différents avatars avec une indication du nombre d'agents disponibles de chaque type.

Afin de contrôler facilement le simulateur et d'exécuter plusieurs scénarios, nous avons ajouté plusieurs curseurs et commutateurs pour contrôler les paramètres de la simulation. L'interface de commande du simulateur (Figure 3.10) permet de modifier les paramètres suivants :

- La taille du parc éolien offshore (NT).
- Type de maintenance utilisée (systémique, conditionnelle et corrective).
- Paramètres de la maintenance préventive (retard de la maintenance systémique et seuil de la maintenance conditionnelle).
- La taille de l'équipe de maintenance, à savoir le nombre de : ingénieurs, techniciens, bateaux et grues.
- L'horizon temporel de la simulation (de 1 à 30 ans).
- Les paramètres des éléments relatifs à l'affichage et à l'animation.

Grâce à l'interface visuelle de la simulation, plusieurs indicateurs de performance tels que la production d'énergie, la situation des conditions météorologiques, l'évolution de l'état des turbines, etc. peuvent être observés en temps réel. L'interface du simulateur contient quelques graphiques et affiche l'évolution en temps réel des indicateurs de performance suivants :

- Énergie produite par le parc éolien.
- Élément Nombre de tâches appartenant à chaque type d'entretien sélectionné.
- Coût total TC de la maintenance.
- Article Conditions météorologiques : température T_m , vitesse du vent V_s , hauteur des vagues H_s et éclairage L_g .
- Facteur de guérison de l'équipement EHF des turbines (un échantillon de 3 turbines).

Simulations

Nous avons supposé un PEO composé de 80 éoliennes d'une puissance maximale nominale de $P_r = 6MW$; vitesse du vent au démarrage $V_{cin} = 4m/s$; vitesse nominale du vent $V_r = 14m/s$; et vitesse maximale du vent en arrêt de sécurité $V_{cout} = 25m/s$ (KOOIJMAN et al., 2003). La maintenance de ce PEO est assurée par 5 unités de maintenance mobiles indépendantes, chacune d'entre elles est composée de : 1 ingénieur, 2 techniciens d'entretien, 1 bateau et 1 grue. La durée de l'intervention de maintenance dépend de la nature de la panne et du type de maintenance. En

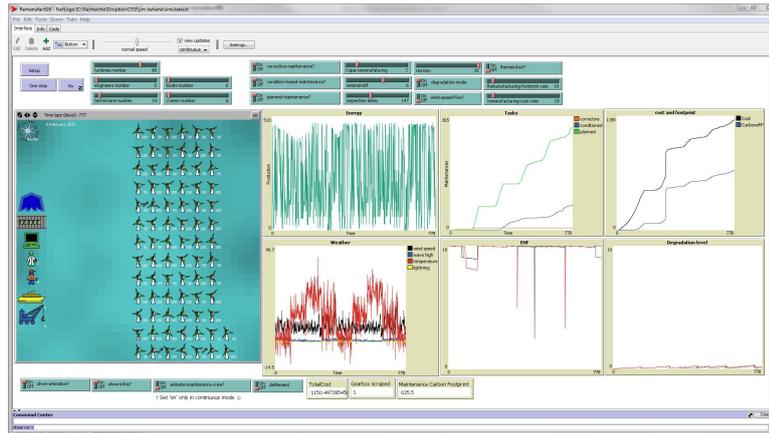


FIGURE 3.10 – Copie d'écran de l'interface du simulateur conçu avec le logiciel NetLogo

effet, la durée d'un entretien correctif varie de 1 à 3 jours ouvrés, alors que la durée d'un entretien préventif (systémique ou conditionnel) varie de 1 à 2 jours. La durée des maintenances peut être inférieure à une journée

Concernant les conditions météorologiques, nous avons utilisé les données historiques de la vitesse du vent V_s obtenues de l'aéroport du Havre, situé sur la côte de la Manche. Nous avons supposé que cette vitesse du vent n'est pas très différente de la vitesse du vent mesurée dans la position de l'POE. Pour la hauteur de vague H_s , nous avons utilisé la distribution de Rayleighs, avec un paramètre σ qui varie selon la saison (THORNTON et GUZA, 1983). Comme le logiciel NetLogo n'a pas une telle fonction, nous avons utilisé la relation suivante (CIDRÁS, DORNELAS et al., 1999) pour générer la hauteur des vagues en utilisant la distribution uniforme disponible sur NetLogo :

$$H_s = \sigma \times \sqrt{-\log U} \quad (3.2)$$

Où :

U est une variable aléatoire uniforme entre 0 et 1.

La foudre est générée selon une distribution uniforme en fonction de la saison. Afin d'identifier l'effet de la stratégie de maintenance particulière sur les performances d'PEO, nous avons exécuté et comparé plusieurs scénarios de stratégie de maintenance. En raison du temps considérable nécessaire à la planification et à l'exécution des tâches de maintenance et parce que les données historiques obtenues sur la vitesse du vent sont composées d'une moyenne journalière, nous avons envisagé une simulation par étapes d'un jour.

Nous avons examiné trois types de stratégies d'entretien pour comparer l'effet de chaque stratégie sur la production globale d'électricité et les coûts d'entretien. Les stratégies adoptées étaient :

- *Stratégie de maintenance systémique (SMS)* : cette stratégie est basée sur des actions de maintenance systémique effectuées tous les 6 mois et combinées à des actions de maintenance corrective effectuées en cas de panne. Après une intervention de maintenance, la date de la maintenance systémique est recalculée.
- *Stratégie de maintenance conditionnelle (CBMS)* : cette stratégie est basée sur les actions de maintenance CBM lancé lorsque le EHF de l'éolienne est inférieur à la valeur limite de 6 combinée à des actions de maintenance correctives effectuées en cas de panne.

- *Stratégie hybride (combinant conditionnelle, systémique et corrective (HS))* : basée sur l'état de l'éolienne sélectionnée par l'agent de Monitoring pour être maintenue, où le type de maintenance à effectuer dépend uniquement de cet état. Si l'éolienne choisie a un mauvais facteur de santé (EHF), une tâche conditionnelle est choisie, si elle est sélectionnée parce qu'elle n'a pas été entretenue depuis plus de 6 mois, la tâche de maintenance systémique est effectuée, et si elle est sélectionnée après une panne, une tâche de maintenance corrective est choisie.

En raison de la nature stochastique de plusieurs paramètres du modèle (durée de maintenance, conditions météorologiques ...), tous les résultats présentés sont les moyennes de 100 simulations pour chaque stratégie.

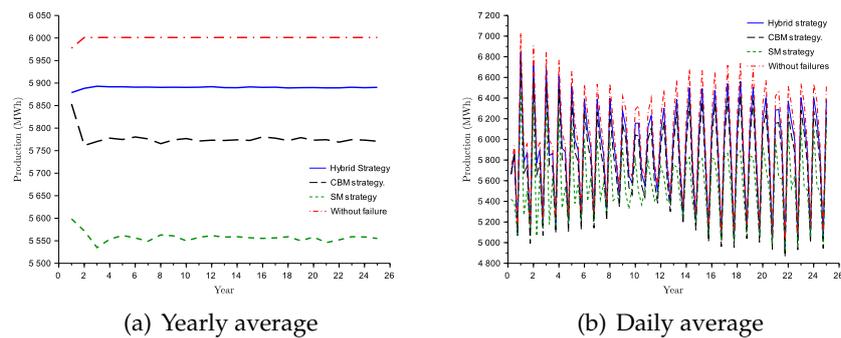


FIGURE 3.11 – Electricity production variation over 25 years

La figure 3.11 représente le niveau d'énergie produite sur une période de 25 ans de simulation pour les trois stratégies adoptées et le scénario de référence où les turbines ne sont jamais en panne. Il montre que la stratégie de maintenance et les conditions météorologiques ont une influence significative sur la production d'énergie. La production journalière sur Figure 3.11(b) indique que la production varie selon la saison de l'année. La comparaison des valeurs sur une période de 25 ans montre qu'une stratégie hybride que nous avons proposée donne les meilleurs résultats par rapport à d'autres stratégies (stratégie CBM et stratégie SM) avec une moyenne de production de 97% du cas idéal. Notez que le cas idéal ("sans panne") produit 52% du rendement potentiel de l'exploitation à cause des variations de vent. Les deux autres stratégies produisent 95% et 90% des cas de référence pour les stratégies CBM et SM respectivement.

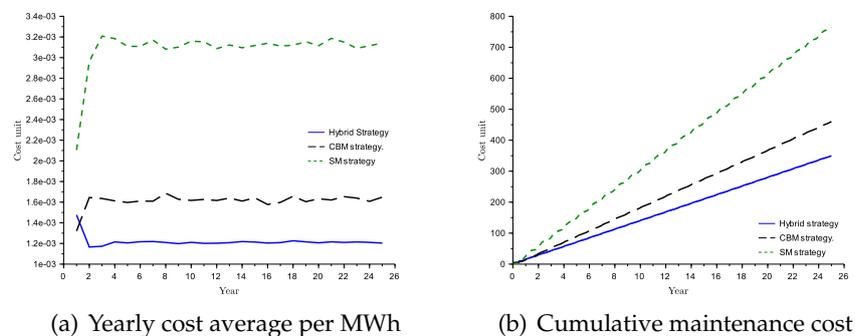


FIGURE 3.12 – Variation du coût sur 25 ans

La figure 3.12 présente l'évolution annuelle (figure 3.12(a)) et quotidienne (figure 3.12(b)) du coût sur la période de simulation (25 ans) des trois stratégies. Le coût est calculé selon le modèle présenté dans la section précédente. Les résultats

obtenus montrent l'efficacité de la stratégie hybride en terme de coût, où la pente de la courbe de coût de la stratégie hybride (cf. Figure 3.12(b)) est inférieure à celle des deux autres stratégies. Nous observons également que la stratégie SM est plus coûteuse que la stratégie CBM (cf. Figure 3.12). Le modèle de dégradation de la turbine influence le coût de la stratégie de maintenance. Dans une étude précédente (SAHNOUN et al., 2014a), nous avons constaté que la stratégie du MH est plus coûteuse que la stratégie SM avec l'utilisation d'un modèle de dégradation linéaire des turbines. Cela peut indiquer que la stratégie de maintenance est fortement influencée par la qualité de la turbine.

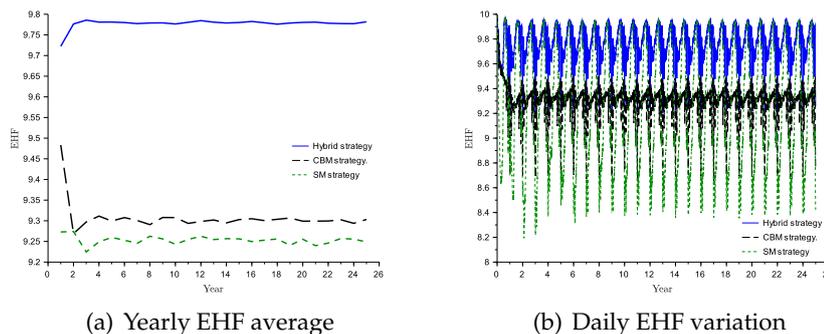


FIGURE 3.13 – Variation de l'EHF sur 25 ans

La stratégie hybride améliore la moyenne du facteur de santé de l'équipement du PEO plus que les deux autres stratégies, comme le montre la Figure 3.13. En ce qui concerne le FHE, la stratégie CBM donne également de meilleurs résultats que la stratégie SM (cf. Figure 3.13(a)).

Table 3.1 résume les performances de chaque stratégie de maintenance, en termes de coût, de production cumulée et de nombre d'interventions de maintenance effectuées par type de maintenance.

Une CBMS demande le moins de tâches de maintenance avec 2059 interventions, mais elle est plus coûteuse que la stratégie de maintenance hybride qui nécessite 5079 interventions au cours des 25 années de fonctionnement. La stratégie SMS présente un plus grand nombre d'actions de maintenance et elle reste la plus coûteuse. Pas à cause du coût de la maintenance mais plutôt à cause de la quantité d'énergie perdue en raison du niveau de production bas par rapport aux autres stratégies. En effet, la stratégie hybride produit la quantité d'énergie la plus importante parce qu'elle maintient les turbines en bonne santé (EHF moyen = 9,8), alors que la stratégie SM est la plus coûteuse en raison de sa perte de production comme le montre la Figure 3.11. La stratégie CBMS comporte de nombreuses tâches correctives (1020), ce qui est très coûteux et non désiré. Ceci peut être amélioré en ajustant le seuil de lancement des tâches CBM. La stratégie hybride démontre une performance intéressante; certes avec un plus grand nombre d'interventions par rapport aux autres stratégies, mais elle reste la stratégie la moins coûteuse grâce à son haut niveau de production (plus de 97%). Nous remarquons également que le type de tâche de maintenance effectuée le plus souvent dans la stratégie hybride est la maintenance systémique avec environ deux tiers des tâches de maintenance effectuées. Cette maintenance régulière des éoliennes explique le constat que les turbines sont en bon état (EHF= 9,8) et qu'elles ne se détériorent pas aussi souvent qu'avec une stratégie de maintenance conditionnelle.

En utilisant le simulateur multi-agents, nous avons démontré l'efficacité de la stratégie que nous proposons. Notre stratégie hybride produit des résultats notables

TABLE 3.1 – Comparaison des stratégies de maintenance en terme de coût, EHF, production et nombre de tâches de maintenance sur 25 ans

	CBMS	SMS	HMS
Nombre de tâches CBM	1039	0	986
Nombre de tâches SM	0	4162	3781
Nombre de tâches CM	1020	459	312
Nombre total des tâches	2059	4621	5079
Coût [unité de coût]	11046	18378	8389
Moyenne de EHF	9.3	9.25	9.8
Production cumulée [GWh]	52713	50714	53747

pour la maintenance des éoliennes offshore, qui présentent des difficultés et des contraintes de maintenance bien connues. La stratégie hybride permet de choisir un compromis entre la production d'énergie, le coût de maintenance, les conditions météorologiques et l'état de santé des éoliennes, rendu possible par le choix de l'éolienne à maintenir et le type de tâche à effectuer.

Conclusion et travaux futurs

Cette première contribution a focalisé sur l'identification des défis que pose la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance pour les parcs éoliens en mer. Les résultats montrent que, par rapport aux autres stratégies, l'approche hybride HS permet de produire plus de puissance et à moindre coût, et ce malgré le grand nombre de tâches de maintenance nécessaires à la stratégie hybride. L'examen de ces résultats nous permet de conclure que la stratégie hybride est une approche de maintenance viable qui devrait être prise en considération par les intervenants lors de la planification des activités de maintenance. Nous avons aussi démontré l'efficacité des systèmes multi-agents dans la représentation des systèmes complexes. Le simulateur développé peut être utilisé pour d'autres tests sur les politiques de maintenances dans les parcs éoliens offshore.

Ce travail a été initiateur à d'autres travaux possibles sur les points suivants :

- L'introduction de nouveaux types de maintenance notamment la maintenance prédictive et la maintenance proactive. Pour cela il faut pouvoir faire de la prédiction de l'état de l'éolienne et aussi faire un diagnostic précis permettant d'agir sur les causes des pannes. Ce point sera discuté dans le chapitre sur les perspectives de recherche
- La possibilité de faire des maintenances opportunistes permettant de profiter de la présence des équipes dans la mer pour faire d'autres maintenances qui seront moins chères et plus efficaces.
- Discuter et tester des politiques de maintenance plus respectueuses de l'environnement puisque c'est la première vocation de l'énergie éolienne.

3.1.3 Utilisation des techniques de "remanufacturing" pour l'approvisionnement de la maintenance

L'énergie éolienne présente beaucoup d'avantages et offre la possibilité de produire une énergie propre. Cependant, il est important de quantifier l'étendue de son empreinte carbone (MARTINEZ et al., 2009). En fait, comme tout système énergétique

de conversion, l'énergie éolienne a un impact environnemental qui doit être évalué et analysé (DAVIDSSON, HÖÖK et WALL, 2012). Même si ce type d'énergie est considéré comme propre, avec un impact positif sur l'environnement, la conception, l'installation et l'entretien des turbines restent une source d'empreinte environnementale négative. Les effets environnementaux d'une éolienne concernent la fabrication, le fonctionnement (normal ou en mode dégradé) et la fin de vie.

Basé sur le fait qu'une chaîne d'approvisionnement en pièces de rechange fiables et rentables est cruciale (TRACHT, WESTERHOLT et SCHUH, 2013), cette contribution démontre l'importance d'optimiser la stratégie de maintenance des turbines afin d'améliorer la durabilité de l'PEO et d'optimiser les différents coûts générés. Le but est de définir l'impact de la stratégie de gestion des pièces de rechange sur l'éolienne au cours de son cycle de vie (Opération et Maintenance O&M) ou en fin (remanufacturing) de vie.

L'une des causes les plus importantes du coût élevé de l'activité O&M des éoliennes offshore (PEO) est le remplacement périodique des composants usés ou endommagés, qui ont des valeurs matérielles et fonctionnelles élevées. Dans ce contexte, l'utilisation de composants remanufacturés a le potentiel de réduire le coût unitaire global en kWh et les émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours du cycle de vie de l'éolienne. La difficulté d'envisager une telle approche est liée à la difficulté de concevoir le processus décisionnel optimisé correspondant et ses paramètres. Ce dernier devrait être en mesure de répondre en permanence à trois questions : qui, quand et comment un composant donné est-il remanufacturé ?

Les pièces de rechange remises à neuf ont un mode de fonctionnement différent des pièces neuves, où les pannes sont plus fréquentes mais peuvent assurer un faible coût global et une meilleure empreinte carbone. Par conséquent, l'utilisation d'une telle approche peut avoir un effet négatif sur les activités d'O&M si le système n'est pas bien géré.

Chaque intervention de maintenance peut nécessiter le remplacement de pièces de rechange. Nous nous concentrons sur la boîte de vitesses qui représente l'une des pièces les plus critiques de l'éolienne. Ainsi, chaque remplacement d'une boîte de vitesses nécessite une pièce de rechange et en génère une autre qui est usée. Les pièces de rechange récupérées font l'objet d'une remise à neuf qui vise à prolonger leur durée de vie résiduelle et à les réutiliser lors des remplacements ultérieurs (BOUDHAR, DAHANE et REZG, 2014).

La réduction simultanée du coût et de l'empreinte carbone de l'énergie éolienne semble complexe et difficile en raison du coût élevé et de l'empreinte carbone élevée liés à la fabrication des nouvelles boîtes de vitesses. Dans ce contexte, l'utilisation d'une stratégie de remanufacturing représente une réelle opportunité pour assurer une solution intéressante, mais en même temps, nécessite une gestion attentive du système qui devient plus complexe.

L'approche proposée

Vu la complexité que va rajouter l'utilisation d'une technique basée sur les pièces remanufacturées pour la maintenance, il est nécessaire d'utiliser une technique de modélisation distribuée pour réduire cette complexité. En effet, la décomposition du système en plusieurs parties en interaction et la prise en compte de chaque partie séparément est un moyen très efficace d'éviter la complexité et de rendre la tâche de modélisation facile. Nous avons adopté la même technique basée sur la modélisation multi-agents pour représenter le système.

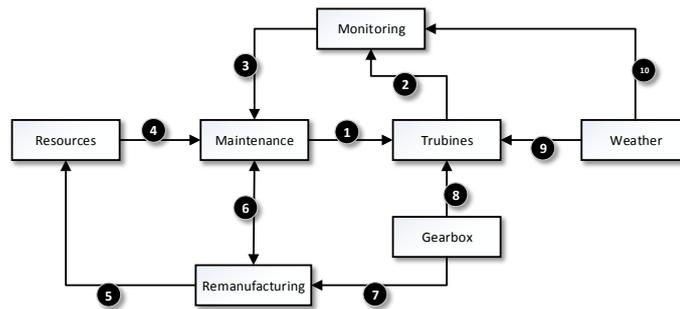


FIGURE 3.14 – Le modèle du système multi-agents : les agents et leurs interactions

On garde la même structure de l'ancien modèle et on rajoute deux nouveaux agents qui sont l'agent "Remanufacturing" qui représente le service remise en état des boîtes de vitesses des éoliennes, et l'agent boîte de vitesse lui-même (Gearbox). On assignera un agent pour chaque tâche de remanufacturing, et autant de Gearbox que d'éoliennes et de pièces en stock ou en remanufacturing. La Figure 3.14 représente les différents agents qui sont déjà définis dans le premier modèle représenté dans la Figure 3.1. Dans la suite nous allons décrire simplement la différence rajoutée dans ce modèle.

L'agent Gearbox Afin de gérer la remise à neuf des réducteurs, nous avons considéré chaque réducteur présent dans le système comme un agent autonome. L'agent de boîte de vitesses a son propre modèle de dégradation, qui varie entre 0 (bonne santé) et 10 (échec), il peut se trouver dans la situation suivante en ce qui concerne sa position et son niveau de dégradation :

- En fonctionnement : le réducteur est installé dans une turbine dont le niveau de dégradation est inférieur à 10.
- Waiting for remanufacturing : la boîte de vitesses est en attente dans la file d'attente de réusinage.
- Remanufacturing de l'article : la boîte de vitesses subit une action de remise à neuf dans le centre de remise à neuf. Cette situation dure 10 jours après quoi la boîte de vitesses est considérée comme neuve, mais avec un taux de dégradation rapide par rapport à une boîte de vitesses neuve. A la fin d'une opération de réusinage, le numéro de réutilisation si le réducteur est incrémenté.
- En stock : après la remise à neuf ou après l'acquisition d'un réducteur neuf, le réducteur est stocké, en attente d'être utilisé pour le remplacement d'un réducteur en panne.
- sélectionné par une équipe de maintenance : pendant la période comprise entre le moment où l'équipe de maintenance immobilise le réducteur et son installation sur la turbine, il se trouve dans une situation "sélectionnée à remplacer".
- Failed : le niveau de dégradation du réducteur installé est égal à 10. Nous ne pouvons que le remplacer, car son entretien sur site est impossible.

La tendance du modèle de dégradation du réducteur est similaire à celle de la turbine. Il tient compte du nombre d'actions de remise à neuf effectuées sur le réducteur ($Ruse_i$) et du niveau de dégradation de l'autre composant de la turbine. Cela signifie qu'une boîte de vitesses remanufacturé se dégrade plus rapidement qu'une

boîte neuve. Nous supposons qu'une boîte de vitesses ne se dégrade que lorsqu'elle est dans la situation "en service". Le niveau de dégradation $Deg_i(k+1)$ du réducteur "i" installé sur la turbine "j" à l'instant "k + 1" peut être exprimé comme suit :

$$Dgl_i(k+1) = \begin{cases} Dgl_{max} & \text{if } fg_i(k) = 1 \\ 0 & \text{if } Rem_i(k) = 1 \\ \frac{Dgl_i(k)}{4} & \text{if } M_i(k) = 1 \\ Dgl_i(k) + Reuse_i \times (degg_i^{td} + degg_i^{tr}) + deg_i^{Tur(j)} & \text{Otherwise} \end{cases}$$

Où :

- Dgl_{max} : est le niveau de dégradation lorsque la boîte de vitesses est en panne.
- $fg_i(k)$: est la probabilité qu'une défaillance arrêtant la boîte de vitesses i se produise à l'instant k . Il suit une distribution exponentielle avec une moyenne égale à 5 ans qui correspond à l'MTTF d'une boîte de vitesses d'un parc éolien offshore selon (BURTON et al., 2011b).
- $M_i(k)$: est une variable binaire égale à 1 lorsqu'une tâche de maintenance est effectuée sur la turbine j et la boîte de vitesses i (0 sinon).
- $degg_i^{td}$: est la dégradation en fonction du temps de la boîte de vitesses i par pas de simulation (un jour). Elle est proportionnelle à la dernière valeur du niveau de dégradation $Dgl_i(k)$. Par conséquent, il est défini comme suit :

$$degg_i^{td}(k+1) = \phi \times Dgl_i(k) \times$$

Avec : ϕ défini empiriquement pour obtenir un niveau de dégradation égal à sa valeur maximale (Dgl_{max}) après 10 ans de fonctionnement.

- $degg_i^{tr}$: est la dégradation aléatoire de la boîte de vitesses en fonction de l'environnement par pas de simulation. Il suit une distribution uniforme avec les paramètres $a = 0$ et $b = Dgl_i^{td} \times \mu$. Où, μ représente le taux de dégradation aléatoire.
- $Reuse_i$ le nombre d'opérations de remise à neuf précédemment effectuées sur la boîte de vitesses i .
- $deg_i^{Tur(j)}$ est le niveau de dégradation de la turbine j , donné par l'expression suivante :

$$deg_i^{Tur(j)} = \zeta \times (EHF_{max} - EHF_j(k))$$

Où : ζ représente l'interaction entre la boîte de vitesses i et les autres composants de la turbine j .

- $Rem_i(k)$ est une variable binaire égale à 1 lorsqu'une action de remanufacturing est effectuée (0 sinon). L'action de remanufacturing réinitialise le niveau de dégradation de la boîte de vitesses i ($Dgl_i(k+1) = 0$).

L'agent "Remanufacturing" Cet agent est en charge de la remise à neuf de la boîte de vitesses. Il consiste en la remise à zéro du niveau de dégradation de la boîte de vitesse récupérée ($Dgl = 0$). Il est possible d'obtenir plusieurs agents de "Remanufacturing" en même temps pour représenter la capacité du service de remanufacturing. Chaque agent se caractérise par la durée de la remise en état, son coût journalier, son empreinte carbone et son état (libre ou occupé). Si tous les agents remanufacturing sont occupés, la boîte de vitesses est affectée à la file d'attente de remanufacturing. A la fin de la tâche de remanufacturing, la boîte de vitesses est placée dans le stock de ressources et son numéro de réutilisation est incrémenté ($Reuse = Reuse + 1$).

Le modèle du coût Le coût de la remanufacturing dépend de la stratégie adoptée : gestion du service de remanufacturing, de sa capacité et de la qualité des actions de remise en état. Ce coût s'ajoute au coût de la maintenance défini précédemment. Le coût total (CT_{rem}) de la maintenance avec une stratégie avec remanufacturing peut être exprimé comme suit :

$$CT_{rem} = CT + C_{rem} + C_{pur} + C_{stocks}$$

- C_{pur} : le coût d'achat de nouvelles boîtes de vitesses.
- C_{rem} : le coût des actions de remanufacturing. Elle représente un pourcentage de C_{pur} défini par la stratégie de remanufacturing. Elle peut s'exprimer comme suit :

$$C_{rem} = RCR \times C_{pur}$$

Où RCR est le taux du coût de remise à neuf.

- C_{stocks} : le coût du stock de boîtes de vitesses récupérées (en stock de remanufacturing) ou remanufacturé (en stock de ressources).

Le coût total peut être exprimé comme suit :

$$CT(k) = \sum_{tr=1}^{tr=NT} (C_{sm}(tr, k) \cdot X_{sm}(tr, k) + C_{cbm}(tr, k) \cdot X_{cbm}(tr, k) + P_e(tr, k) \cdot (Deg(tr, k) + Down(tr, k)) + C_{cm}(tr, k) \cdot X_{cm}(tr, k)) + \sum_{ngb=1}^{ngb=PR(k)} C_{pur} + \sum_{gb=1}^{gb=RM(k)} Cd_{rem} + \sum_{sgb=1}^{sgb=N_{stock}} C_{stock}(sgb, k)$$

- $PR(k)$ est le nombre de boîtes de vitesses achetées à l'instant k .
- C_{pur} est le coût d'achat d'une nouvelle boîte de vitesses. C'est censé être constant.
- $RM(k)$ est le nombre de réducteurs en cours de remanufacturing à l'instant k .
- Cd_{rem} est le coût de remise à neuf d'une boîte de vitesses gb pendant la période $[k - 1, k]$, qui est considéré comme un pourcentage du coût C_{pur} . Ce coût peut être exprimé comme suit :

$$Cd_{rem} = \frac{C_{rem}}{Nd} = \frac{RCR \times C_{pur}}{Nd}$$

Où : Nd est le nombre de périodes nécessaires $[k - 1, k]$ pour une remise à neuf complète

- n_{stock} est le nombre de boîtes de vitesses en stock.
- $C_{stock}(sgb, k)$ est le coût du stock d'une boîte de vitesses sgb pendant la période $[k - 1, k]$.

Modèle de l'emprunte carbone L'emprunte carbone est quantifiée par l'estimation des émissions de gaz à effet de serre (GES) du parc éolien offshore. Dans notre étude, le modèle GES prend en compte les sources les plus importantes de GES pendant la période d'Opération&Maintenance, à savoir l'emprunte carbone des tâches de maintenance, de remise à neuf et d'acquisition de nouvelles boîtes de vitesses (fabrication et transport). Ainsi, l'emprunte carbone totale FP_t sur une période T peut

être exprimée par la relation suivante :

$$FP_t = FP_{sm} + FP_{cbm} + FP_{cm} + FP_{rem} + FP_{pur}$$

- FP_{sm} , FP_{cbm} et FP_{cm} sont respectivement l’empreinte carbone de la maintenance systémique, de la maintenance conditionnelle et corrective. Nous supposons que l’empreinte carbone de l’installation du service de surveillance (destinée à la maintenance du MH) est négligeable.
- FP_{pur} est l’empreinte carbone de la fabrication et du transport de nouvelles boîtes de vitesses.
- FP_{rem} est l’empreinte carbone générée par les actions de remise à neuf des boîtes de vitesses (remanufacturing). Il représente un pourcentage de FP_{pur} défini par la stratégie de remanufacturing. Elle peut s’exprimer comme suit :

$$FP_{rem} = RFPR \times FP_{pur}$$

Où $RFPR$ est le taux d’empreinte de remanufacturing.

l’emprunte carbone peut être exprimée comme suit :

$$FP_t = FP_{sm} + FP_{cbm} + FP_{cm} + (1 + RFPR) \times FP_{pur} = \sum_{k=1}^{k=T} FP_t(k)$$

Où $FP_t(k)$ est l’empreinte carbone à l’instant k , elle peut être exprimée comme suit :

$$FP_t(k) = \sum_{tr=1}^{tr=NT} (FP_{sm}(tr, k) \cdot X_{sm}(tr, k) + FP_{cbm}(tr, k) \cdot X_{cbm}(tr, k) + FP_{cm}(tr, k) \cdot X_{cm}(tr, k)) + \sum_{ngb=1}^{ngb=PR(k)} FP_{pur} + \sum_{gb=1}^{gb=RM(k)} FPd_{rem}$$

Où :

- $FP_{sm}(tr, k)$, $FP_{cbm}(tr, k)$ et $FP_{cm}(tr, k)$ sont respectivement l’empreinte carbone de la maintenance systémique, conditionnelle et corrective de la turbine tr à l’instant k
- FP_{pur} est l’empreinte carbone de l’achat d’une nouvelle boîte de vitesses. Cette valeur est supposée constante.
- FPd_{rem} est l’empreinte carbone du remanufacturing d’une boîte de vitesses gb pendant la période $[k - 1, k]$, qui est considéré comme un pourcentage de l’empreinte carbone FP_{pur} . Ce coût peut être exprimé comme suit :

$$FPd_{rem} = \frac{FP_{rem}}{Nd} = \frac{RFPR \times FP_{pur}}{Nd}$$

Interactions entre les agents Un parc éolien offshore, affectées par l’agent "Weather" ayant un impact à la fois sur la production et la dégradation. L’agent de "Monitoring" évalue les états de toutes les turbines et fait rapport sur celles qui sont en panne ou qui doivent être entretenues. Il sélectionne la meilleure maintenance possible à effectuer et évalue si l’agent "Maintenance" est disponible, c’est-à-dire qu’il vérifie si l’agent "Maintenance" dispose des ressources suffisantes et des conditions

météorologiques appropriées pour effectuer les tâches requises. L'agent "Maintenance" demande alors les ressources nécessaires, analyse le niveau de dégradation de la turbine et de la boîte de vitesses et décide si des actions de remplacement sont nécessaires ou non, en fonction du nombre de boîtes de vitesses disponibles dans le stock.

Lorsque la maintenance est terminée, les ressources sont retournées au stock. En cas de remplacement de la boîte de vitesses, l'équipe de maintenance confie celle récupérée au service de remanufacturing. Si tous les agents de remanufacturing sont occupés, la boîte de vitesses attend qu'un agent de remanufacturing soit disponible. L'agent "remanufacturing" la remet à neuf et la dépose dans le stock de ressources, afin d'être utilisée par l'agent de "maintenance" pour les remplacements futurs. Une boîte de vitesses ne peut pas être remanufacturée à l'infini, nous avons défini un seuil pour le nombre de réutilisation de chaque boîte de vitesses. Lorsque le nombre de réutilisation atteint ce seuil, la boîte de vitesses ne peut pas être remanufacturée et sera destinée à être éliminée, et l'agent "Gearbox" se détruit de lui-même. Ces décisions sont représentées dans la figure 3.15.

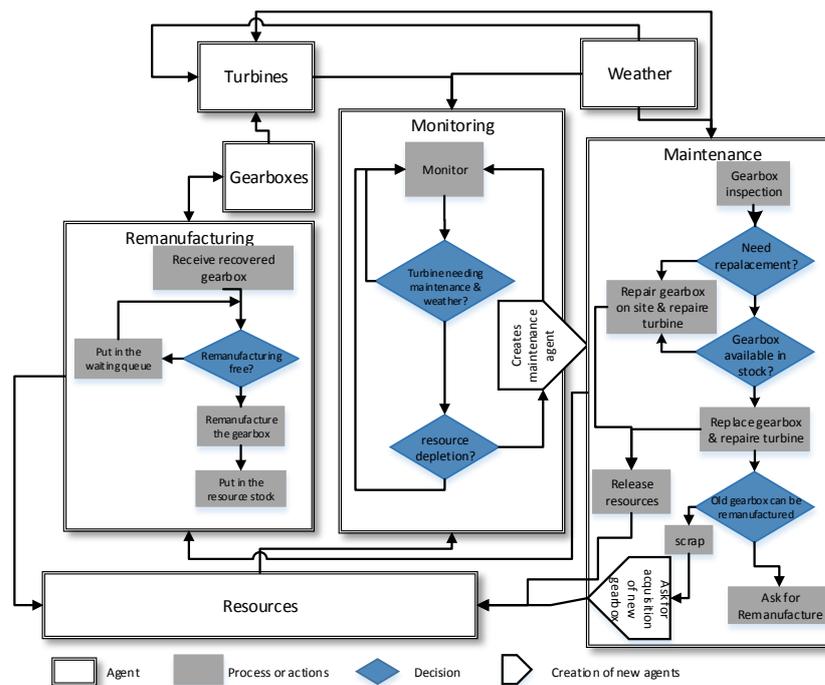


FIGURE 3.15 – diagramme des décisions

Simulation

Nous avons adapté le même simulateur développé pour les stratégies de maintenance afin de rajouter un centre de remanufacturing et adopter le comportement défini juste en haut. Il est possible de régler le taux des coûts et d'emprunte carbone. Le système considéré pour ces simulations est constitué de :

- 80 éoliennes offshore ;

Configuration	<i>RFPR</i>	<i>RCR</i>
Without Reman.	-	-
Neg. <i>RFPR</i> & <i>RCR</i>	0	0
Low <i>RFPR</i> & Low <i>RCR</i>	0.1	0.1
Low <i>RFPR</i> & High <i>RCR</i>	0.1	0.5
High <i>RFPR</i> & Low <i>RCR</i>	0.5	0.1
High <i>RFPR</i> & High <i>RCR</i>	0.5	0.5
Ext. High <i>RFPR</i> & <i>RCR</i>	1	1

TABLE 3.2 – Caractéristiques de la configurations testée

- 5 unités de maintenances mobiles indépendantes, chacune composée de : 1 ingénieur, 2 techniciens d’entretien, 1 bateau et 1 grue,
- 1 usine de remanufacturing capable de traiter 5 boîtes de vitesses en même temps (si l’option de remanufacturing est activée).

Les simulations ont été réalisées pour 7 configurations différentes, telles que présentées dans le tableau 3.2. La première configuration ("Sans remanufacturing") est ensuite comparée à 6 configurations qui incluent une option de remanufacturing. Ces derniers correspondent aux combinaisons relatives à certains niveaux spécifiques de deux paramètres, à savoir le taux d’empreinte de remanufacturing (*RFPR*) et le taux du coût de remanufacturing (*RCR*). Ils sont proportionnels aux gains en termes d’émissions de carbone et de coûts de maintenance, respectivement. Le premier paramètre permet d’évaluer l’empreinte carbone issue de l’opération de remanufacturing, qui est égale à *RFPR* fois l’empreinte carbone d’une nouvelle boîte de vitesses. Le deuxième paramètre est utilisé pour calculer le coût de l’opération de remanufacturing, c’est-à-dire *RCR* fois le coût d’achat d’une nouvelle boîte de vitesses. Chaque configuration a été exécutée 100 fois sur un horizon de 25 ans, en utilisant un pas de simulation d’une journée (appelée tick dans NetLogo).

Les Figure 3.16 et Figure 3.17 indiquent respectivement la variation de la moyenne annuelle et de la moyenne cumulative (plus de 1000 simulations) du coût unitaire par kWh (UckWh) et de l’empreinte carbone (kg d’équivalent de dioxyde de carbone "CO₂e" émis par kWh : FPkWh) sur un horizon de 25 ans. Dans la sous-figure 3.16(a) et la sous-figure 3.17(a), la moyenne UckWh fin FPkWh est calculée en utilisant uniquement les résultats enregistrés du début à la fin de l’année considérée. Cependant, dans la sous-figure 3.16(b) et la sous-figure 3.17(b), les UckWh et FPkWh moyens (plus de 1000 simulations) sont calculés en utilisant les résultats cumulés enregistrés du début de la simulation jusqu’à la fin de l’année considérée.

Dans le scénario "Sans remanufacturing", la moyenne annuelle UckWh et la moyenne annuelle FPkWh sont pratiquement doublées à la fin des 6 premières années, puis elles restent presque constantes au cours des années suivantes. Ceci peut s’expliquer par le fait que pendant les 6 premières années les turbines de la ferme sont encore neuves, donc il n’y a pas beaucoup de pannes de boîtes de vitesses et l’équipe de maintenance peut gérer cela facilement. Les rares remplacements sont dus à des défaillances inattendues causées par des phénomènes externes tels que les conditions météorologiques, les erreurs humaines, ... Ceci peut être observé clairement sur la Figure 3.18 où le nombre moyen de boîtes de vitesses remplacées est inférieur à 1 par an pendant les 4 premières années car le temps moyen avant défaillance des boîtes de vitesses est de 5 ans.

Après cette phase transitoire, le nombre de boîtes de vitesses remplacés atteint un niveau stable qui dépend de plusieurs paramètres comme la capacité de l'équipe de maintenance, le seuil de dégradation de déclenchement et la stratégie de maintenance. Ainsi, les moyennes annuelles UCKWh et FPkWh deviennent également stables pendant une phase d'équilibre (voir Figure 3.16 et Figure 3.17, années 6 à 25).

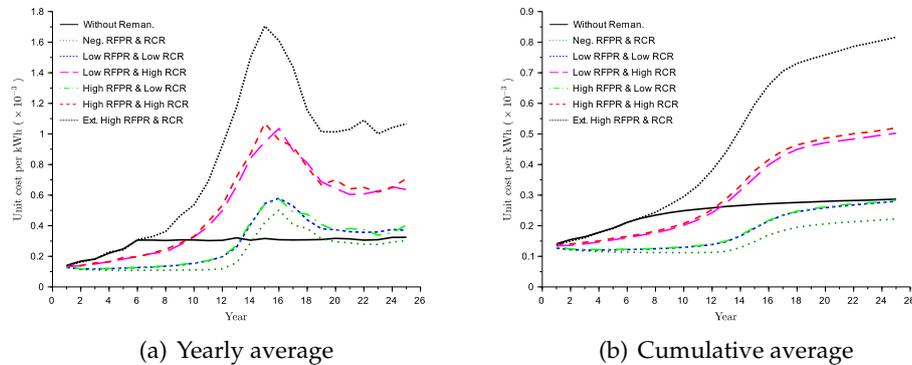


FIGURE 3.16 – Coût moyen par kWh

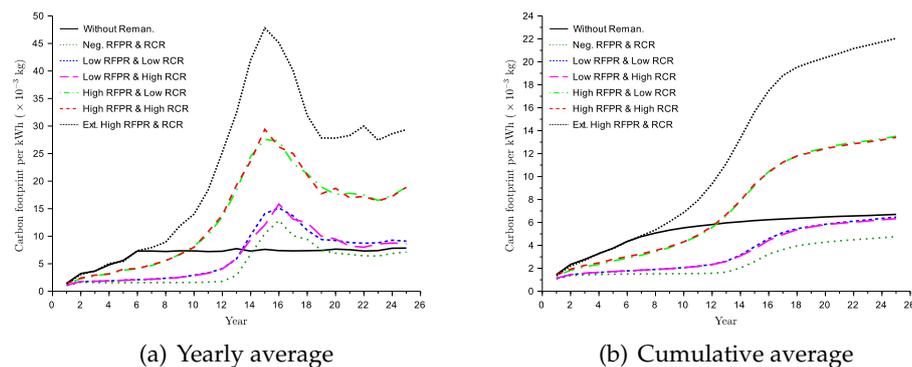


FIGURE 3.17 – Empreinte carbone moyenne par kWh

Dans les scénarios de " remanufacturing ", les moyennes annuelles UCKWh et FPkWh augmentent lentement au cours de la première période de dix ans, après quoi commence une période de temps où elles augmentent plus fortement pour atteindre un maximum vers la 16^{me} année. Ensuite, les moyennes annuelles UCKWh et FPkWh diminuent rapidement pour atteindre un niveau quasi stationnaire (voir Figure 3.16 et Figure 3.17). En comparant les différents scénarios de remanufacturing, nous pouvons observer que l'utilisation d'une stratégie de remanufacturing peut être avantageuse ou non en fonction des paramètres *RCR* et *RFPR*, qui reflètent l'efficacité du remanufacturing en terme de coût et d'empreinte carbone. Les Figures 3.16-3.17 confirment cette constatation, où les scénarios à faible *RCR* et *RFPR* donnent de meilleurs résultats. Alors que l'option de remanufacturing n'est pas intéressante dans le cas de *RCCR* et *RFPR* élevés.

La figure 3.18 montre qu'il n'y a pas de boîtes de vitesses rebutées pendant les onze premières années, car toutes les boîtes de vitesses récupérées peuvent être réutilisées plusieurs fois pendant cette période (le seuil de réutilisation n'est pas encore atteint). Ceci explique le faible coût et l'empreinte carbone des scénarios de remanufacturing dans cette période. Immédiatement après, ce nombre augmente fortement (entre 12 et 19 ans) car plusieurs boîtes de vitesses atteignent leur seuil

de réutilisation et doivent être rebutées. Chaque boîte de vitesses rebutée entraîne l'achat d'une nouvelle, ce qui permet le renouvellement d'une grande partie des boîtes de vitesses des parcs. Ainsi, le nombre de boîtes de vitesses rebutées diminue et se stabilise à partir de l'année 19. Cette variation du nombre de boîtes de vitesses rebutées explique le pic des moyennes annuelles UckWh et FpkWh (voir Figures 3.16(a)- 3.17(a)).

Le scénario avec $RCR = 0.1$ et $RFPR = 0.1$ a pratiquement le même coût cumulé et la même empreinte carbone que le scénario sans remanufacturing sur 25 ans d'exploitation. Ces résultats peuvent être considérés comme un avantage de la stratégie de remanufacturing car l'augmentation du coût arrive 10 ans après l'installation de la ferme, ce qui donne aux entreprises le temps de récupérer le coût de son installation. Par conséquent, la stratégie de remanufacturing encouragera les entreprises à investir dans ce type de production d'énergie. Ajoutez à cela, la marge entre cette stratégie et ses limites (stratégie avec RCR et $RFPR$) est considérable, ce qui donne la possibilité d'améliorer la stratégie de remanufacturing pour être avec un meilleur coût et une empreinte carbone cumulatifs. La Figure 3.19 montre que la politique de remanufacturing n'influence pas le niveau de production, où la variation de la production varie entre 2156MWh et 2161,5MWh pour toutes les stratégies, ce qui représente 0,2% de variation. Ceci est dû à la stratégie de maintenance qui n'a pas été modifiée par les différents scénarios.

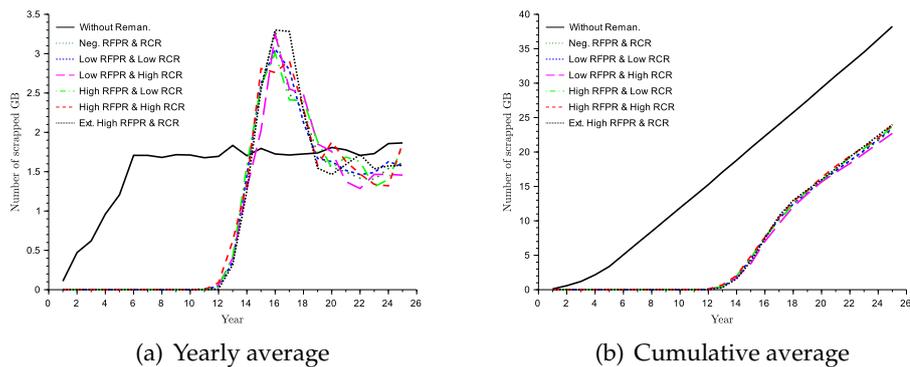


FIGURE 3.18 – Nombre de boîtes vitesses rebutées

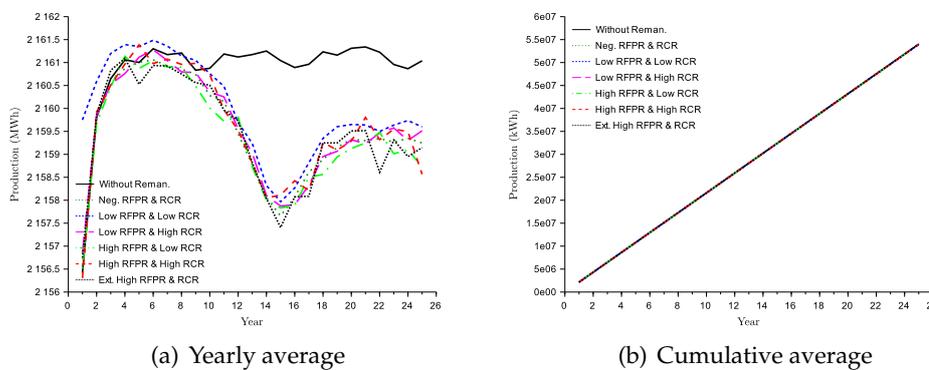


FIGURE 3.19 – Production moyenne

Conclusion

L'impact environnemental de l'énergie renouvelable est une question importante et représente une clé essentielle de son succès. Même si elle est considérée comme propre, l'énergie éolienne offshore, comme toute énergie renouvelable, reste coûteuse et avec une empreinte carbone non négligeable. Dans ce contexte, le remanufacturing des pièces de rechange récupérées est une solution très intéressante pour réduire le coût et l'empreinte carbone des parcs éoliens offshore. Les résultats des expérimentations numériques montrent que la stratégie de remise à neuf est intéressante si le coût et l'empreinte carbone de la remise à neuf d'une boîte de vitesses sont inférieurs à 10% du coût et de l'empreinte carbone d'une nouvelle boîte de vitesses. En plus, l'utilisation de la remanufacturing retarde de gros investissements dans les tâches de maintenance qui peut aider les entreprises à mieux maîtriser leur dépenses. Il faut rappeler que plusieurs suppositions sont assez fortes tels que le nombre de réutilisations possibles, et le lien entre le nombre d'utilisations et le MTBF. Plusieurs extensions sont possibles pour ce travail. Par exemple; nous avons déposé une projet ANR dans le but d'étendre cette technique à d'autres composants, et de retravailler sur le design de l'éolienne pour faciliter et améliorer son remanufacturing.

3.2 Valorisation des biodéchets par méthanisation

3.2.1 Introduction

Depuis le 1er janvier 2016, les producteurs de biodéchets, avec une production supérieure à 10 tonnes annuelle, se voient concernés par une obligation de tri à la source et de valorisation organique. Parallèlement, le plan Energie Méthanisation Autonomie Azote prévoit le déploiement annuel de 130 unités de méthanisation d'ici 2020 (MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 2013). Plusieurs types de déchets demandent un pré-traitement avant le passage à la méthanisation notamment les déchets conditionnés (dans des emballages)(RAVINDRAN et JAISWAL, 2016). Afin de les méthaniser, il est obligatoire de les séparer de leurs emballages grâce à des machines appelées déconditionneurs, capables d'extraire la matière organique de son emballage. Dans ce contexte, le marché du déconditionnement grandit et la compétitivité entre les différents acteurs implique le caractère confidentiel des données technico-économiques. Toutefois, la méthanisation des biodéchets conditionnés devient obligatoire et exige l'introduction d'une étape de déconditionnement dans le processus de méthanisation. Cette étape est assurée par différents types de déconditionneurs avec des caractéristiques variées. Le choix des utilisateurs finaux dépend de plusieurs paramètres liés à leurs besoins, leurs capacités de production et leurs situations économiques . Le bon choix de machine n'est pas toujours évident sachant que le retour sur investissement n'est pas toujours garanti dans ce domaine.

Les biodéchets sont définis par l'article R541-8 du code de l'Environnement comme « des déchets non dangereux biodégradables de jardin ou de parc, des déchets non dangereux alimentaires ou de cuisine issus notamment des ménages, des restaurants et des traiteurs, ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires. »

Les sous-produits animaux (SPA) constituent une grande partie des biodéchets en France, et sont soumis à une réglementation sanitaire particulière. Cette réglementation, ainsi des limites techniques, sont la source principale des contraintes auxquelles se soumet le processus de collecte et de traitement des biodéchets.

La collecte des biodéchets auprès des producteurs, ainsi que l'exploitation des installations de leur valorisation (comme le compostage ou la méthanisation) sont encadrés par une double réglementation :

- Relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) :
En fonction du mode de valorisation des biodéchets, deux rubriques ICPE sont applicables ; 1) traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2771, 2780 (Compostage), 2781 (Méthanisation) et 2782 : 2791 (INERIS, ICPE 2791) et 2) Transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux non inertes : 2716 (INERIS, ICPE 2716). Cette réglementation est obligatoire pour tout producteur de déchets dépassant les 10 tonnes/ an
- Relative à la protection sanitaire

Les biodéchets conditionnés, issus d'usines agro-alimentaires et grandes et moyennes surfaces, rentrent dans cette catégorie et représentent un gisement aisément collectable et potentiellement vertueux. Engendrés par la péremption des produits, les défauts de fabrication ou la mauvaise gestion des stocks, ils étaient jusqu'à présent acheminés vers les usines d'incinération. Or, l'intérêt de la valorisation de ce type

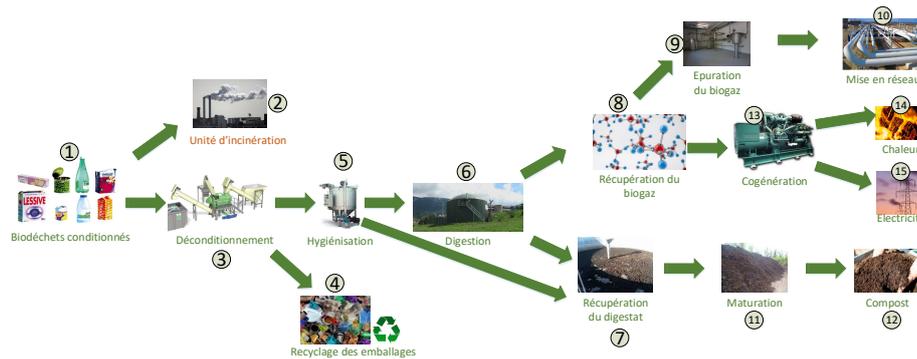


FIGURE 3.20 – Chaîne de valorisation des biodéchets conditionnés

de déchet est multiple : conversion en énergie du méthane récupéré lors de la digestion de la fraction organique, production de digestat épandable via la maturation de la matière sèche et recyclage des emballages vidés de leur contenu (VERNIER, 2013). Le processus de valorisation préviendra également un important dégagement gazeux en évitant le relâchement de méthane et de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Il favorisera le développement de l'économie locale en créant de nouveaux emplois et en faisant intervenir un large panel d'acteurs.

Plusieurs problématiques sont liées à cette chaîne de valeur complexe et non maîtrisée. De plus, le contexte économique fait que de grands groupes industriels monopolisent le secteur et communiquent très peu d'informations sur le sujet. A travers ma participation dans le projet régional PCBiod, j'ai pu apprécier les difficultés liées à ce sujet, ainsi que la rareté des travaux de recherche concernant l'optimisation de la chaîne de valeur des biodéchets d'une manière générale, et pas seulement les biodéchets conditionnés. Dans cette partie, je vais m'attarder sur la description des différentes étapes du processus de traitement de biodéchets et expliquer les problématiques que j'ai traité et qui peuvent être résumées dans les points suivants :

- Simulation du processus en se basant sur un modèle multi-agents
- Optimisation de processus de distribution de la soupe
- Sim-optimisation de la collecte de bio-déchets
- Processus de négociation

3.2.2 Description de la chaîne de valeur

Les étapes du processus de transformation sont illustrées sur la Figure 3.20. Les étapes les plus importantes sont :

- **La collecte (étape 1) :** Consiste à transporter les déchets depuis les gisements vers les centres de traitement. Le transport est souvent assuré par des camions et inclut aussi la gestion et le nettoyage des caisses de collecte de déchets. Cette étape peut être gérée par différents modèles économiques et représente souvent un important investissement en terme de coût et de temps.
- **Déconditionnement (étape 3) :** Séparation de l'emballage (inerte) et de la fraction organique méthanisable. Cette tâche est effectuée par un déconditionneur, jouant également le rôle de broyeur pour réduire la taille des particules, augmentant leur biodégradabilité et donc le rendement du processus de méthanisation. (ARIUNBAATAR et al., 2014)

- **Hygiénisation (étape 5)** : Pasteurisation de la « soupe », une heure à 70° selon la législation afin d'inhiber le développement des agents pathogènes. Cette fraction organique devra être méthanisée dans les 48 heures suivant son hygiénisation (BRAUN et WELLINGER, 2003).
- **Digestion (étape 6)** : Enchaînement de 4 réactions en milieu anaérobie : Hydrolyse, Acidogénèse, Acétogénèse et Méthanogénèse (MOLETTA, 2008). Le résultat est la transformation de la matière organique en biogaz sous l'action contrôlée de populations microbiennes diversifiées. Ce biogaz sera composé d'un pourcentage de méthane (CH₄) et d'impuretés (CO₂, H₂S, ..). Son pouvoir calorifique inférieur sera défini par sa teneur en méthane. Le potentiel méthanogène de la fraction organique des biodéchets conditionnés, et le PCI des gaz issus de sa digestion sont respectivement compris autour de 172 Nm³/TMO et 6,5KWh/Nm³ (BRAUN et WELLINGER, 2003) ce qui représente d'excellents indicateurs comparés aux autres types de biodéchets. L'introduction de ces produits en co-digestion ne dépasse pas généralement les 20% de la capacité globale de la méthanisation. Le reste est composé de déchets verts, du fumier ou lisier, des huiles, etc. (AL SEADI et LUKEHURST, 2012).
- **Digestat (étape 7)** : Fraction organique sèche n'émettant plus de particules de CH₄ pouvant subir une phase de maturation pour devenir du compost épanachable. Le digestat issu des biodéchets conditionnés a un potentiel fertilisant de haute qualité (AL SEADI et LUKEHURST, 2012).
- **Co-génération (étape 13)** : Production simultanée de chaleur et d'électricité grâce à un moteur à 4 temps. Le rendement global des moteurs de dernière génération est compris autour de 85% avec 41% d'électricité pour 44% de chaleur.
- **Injection (étape 10)** : Mise en réseau du biogaz obtenu. Cette mise en réseau soulève la nécessité de purifier le biogaz initialement composé de 35% de CO₂ environ (BRAUN et WELLINGER, 2003)

La Figure 3.20 représente les différentes étapes possibles lors de la valorisation des biodéchets conditionnés. Les biodéchets conditionnés sont récoltés de plusieurs points de production de déchets tels que les GMSs ou l'industrie agro-alimentaire (étape 1). Pour le moment, le traitement passe par l'incinération (étape 2) qui représente une mauvaise valorisation du déchet, ou le déconditionnement qui consiste à séparer la matière organique de son contenant (étape 3). Le déconditionneur génère de l'emballage qui peut être recyclé ou enfoui (étape 4) et de la matière organique sous forme liquide qu'on appelle soupe organique. Pour des raisons de sécurité et de réglementation sur l'hygiène, toute la soupe produite doit être hygiénisée (étape 5). Après cela, la soupe hygiénisée est mélangée avec d'autres déchets conditionnés pour qu'elle soit méthanisée dans un digesteur (étape 6). Plusieurs types de méthanisation peuvent être utilisées telles que la méthanisation liquide, sèche, ou directement utiliser la soupe pour le compostage sans l'exploiter en méthanisation (étape 7). A la sortie de la méthanisation, on récupère le digestat (étape 7) que l'on passe à la maturation (étape 11), puis on obtient un compost (étape 12) qui peut être utilisé en épandage. D'autre part, le biogaz récupéré de la méthanisation (étape 8) est exploité de deux manières, soit en injection dans le réseau (étape 10), après l'avoir passé par une étape d'épuration (étape 9) pour filtrer tous les gaz non tolérés dans le réseau de gaz, soit en le passant par la cogénération (étape 13), afin d'obtenir de l'électricité qui est injectée au réseau électrique (étape 15). La chaleur produite par la cogénération est exploitée (étape 14) pour chauffer des installations ou pour d'autres utilisations telles que l'hygiénisation ou le séchage.

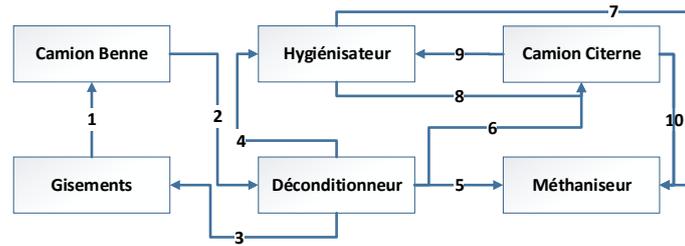


FIGURE 3.21 – modèle du système multi-agent

Selon la position géographique des différentes unités et la politique de gestion de l'unité de déconditionnement, trois scénarios d'implantation sont envisageables à partir de l'étape 3 jusqu'à l'étape 6. Le processus complet de valorisation des biodéchets conditionnés ne va pas changer mais des étapes d'hygiénisation supplémentaires peuvent être ajoutées lors de la méthanisation ou déconditionnement distant. Ces scénarios à étudier présentent des avantages et inconvénients propres à chacun. Une modélisation puis une simulation de ce processus permettront de mettre en évidence le scénario le plus pertinent.

- **Scénario 1** : les étapes 3 et 5 sont en même endroit mais l'étape 6 est distante. la contrainte temporelle est forte ou le délai entre la sortie de l'étape 5 et l'entrée dans l'étape 6 ne doit pas dépasser 48h.
- **Scénario 2** : cette configuration place les hygiénisateurs à côté des unités de méthanisation. Ceci est intéressant du fait que les hygiénisateurs peuvent utiliser la chaleur issue de la cogénération et la contrainte des 48h avant le traitement n'est plus obligatoire. Malgré ces avantages, cette solution impose la multiplication des installations d'hygiénisateurs qui coûtera plus cher en terme d'investissement.
- **Scénario 3** : cette configuration propose de tout installer en même endroit. Cela évite les problèmes de transport mais demande des investissements importants. Afin d'amortir les frais, il faut avoir des installations à grand débit. Ceci risque de réduire le nombre d'unités de méthanisation/déconditionnement à cause de la lourdeur des investissements.

3.2.3 Modélisation et simulation

Nous avons procédé par une modélisation multi-agents du système que l'on vient de décrire. En effet, il est composé de plusieurs parties qui peuvent être facilement modélisées par des agents autonomes avec un comportement spécifique, ou même une intelligence lui permettant de prendre des décisions indépendantes. Le modèle contient six types d'agents liés les uns aux autres pour représenter le comportement global du processus de collecte et de traitement des bio-déchets conditionnés comme le montre la Figure 3.21.

Les agents sont :

- **Gisements** : Les endroits où les camions vont collecter les bio-déchets : ces points de chargement sont généralement les supermarchés ou les hypermarchés. Chaque gisement produit des déchets suivant une loi de probabilité donnée.

- **Camions Benne** : Les camions bennes permettent de transporter les bio-déchets depuis les gisements vers le déconditionneur. Ils ont une capacité limitée et génèrent un coût de location et de transport.
- **Déconditionneur** : L'agent déconditionneur est l'agent du modèle prenant le plus de décisions. Son comportement influe sur tous les autres agents puisqu'il est en charge de commander la collecte et de répartir la « soupe » produite selon les capacités de traitement disponibles. Il produit 15 % d'emballage et 85 % de soupe.
- **Hygiénisateur** : L'agent hygiénisateur a un comportement trivial, mais est capable de prendre des décisions selon les conditions dans lesquelles il est implanté. En effet, la fonction basique de l'hygiénisateur est la chauffe de la « soupe » pendant une heure à 70°. Il fonctionne tant que son stock d'entrée n'est pas vide, et transmet la « soupe » hygiénisée soit à un camion-citerne via son stock post-hygiénisation, soit directement au stock du méthaniseur éventuellement présent sur site qui prendra le relais pour la valorisation.
- **Camions Citernes** : Les camions citernes permettent de transporter la soupe hygiénisée vers les stations de méthanisation.
- **Méthaniseur** : Il est pourvu d'un stock qui se vide à hauteur de sa capacité de traitement. Dès lors que ce stock est rempli, le méthaniseur se remplit chaque heure en vidant le stock d'entrée et en remplissant le stock de digestat, biogazs et emballages. Ce débit est défini par la capacité du digesteur. A noter que la capacité de traitement globale du méthaniseur ne correspond pas à la capacité de traitement de la « soupe ». En effet, le débit réservé à la soupe varie de 5 à 15% de la capacité totale de traitement selon les installations.

3.2.4 Les interactions entre les agents

La Figure 3.21 montre les différentes interactions entre les agents, définies comme suit :

- **L'interaction 1** c'est la relation entre les gisements et les camions, de telle sorte que les camions réduisent le contenu des gisements et les gisements remplissent les camions.
- **L'interaction 2** Après que les camions bennes font leurs tournées de chargement des déchets depuis les gisements, ils rentrent directement dans les déconditionneurs pour décharger.
- **L'interaction 3** Le déconditionneur sélectionne des gisements qui peuvent travailler avec lui sous contrat, dans un rayon de 60 km.
- **L'interaction 4** Le déconditionneur envoie les 85% de soupes vers le ou les hygiénisateur(s).
- **L'interaction 5** Le déconditionneur est installé avec une unité de méthanisation et peut choisir d'autre station de méthanisation pour travailler avec elles.
- **L'interaction 6** Le déconditionneur peut envoyer la soupe directement vers les stations de méthanisation en utilisant le camion-citerne, dans ce scénario on transporte une soupe non-hygiénisée.
- **L'interaction 7** L'hygiénisateur peut envoyer une soupe hygiénisée dans le méthaniseur sur place.
- **L'interaction 8** L'hygiénisateur peut envoyer la soupe hygiénisée vers d'autres stations de méthanisation en utilisant le camion-citerne. Dans ce scénario, on transporte une soupe hygiénisée.

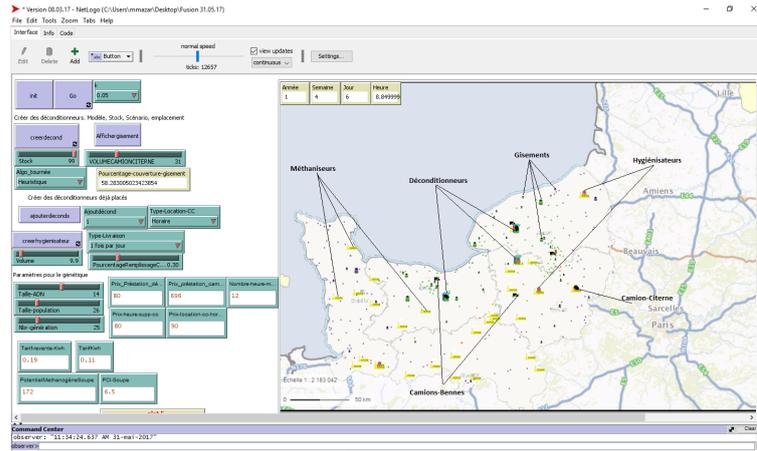


FIGURE 3.22 – Interface graphique du simulateur

- **L'interaction 9** Le camion-citerne transporte la soupe non-hygiénisée vers l'hygiénisateur avant la méthanisation.
- **L'interaction 10** Le camion-citerne transporte la soupe hygiénisée vers le méthaniseur. La soupe hygiénisée ne doit pas dépasser les 48 h avant la méthanisation sinon elle sera ré-hygiénisée une autre fois.

Nous avons développé un modèle de coût qui se base sur l'incrémentation avec une variable globale avec les coûts des actions individuelles de chaque agent du système. Comme nous avons des actions qui apportent et d'autres qui coûtent, nous avons calculé un bilan de coût qui doit être positif si le déconditionneur est rentable. Le bilan énergétique a été aussi calculé pour vérifier que le système produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. Le dernier indicateur considéré est le bilan carbone qui permet de mesurer la propreté de tout le processus notamment la collecte et la distribution.

Déroulement de la simulation

Le simulateur peut exécuter le fonctionnement de plusieurs déconditionneurs en même temps. La Figure 3.22 représente l'interface graphique de la simulation, où on peut voir des boutons permettant la configuration du système et une représentation animée de la carte de la Normandie avec les installations existantes (gisements, méthaneurs et les trois déconditionneurs). Les camions sont loués par les déconditionneurs à la journée. Un camion benne fait une tournée de plusieurs gisements afin de minimiser les coûts de la collecte. Une fois rempli, il rentre au déconditionneur pour que les déchets soient traités. La soupe obtenue après le déconditionnement est transmise dans quelques cas aux autres unités de méthanisation (équipé ou non d'un hygiénisateur). Quand le camion citerne veut transporter la soupe hygiénisée il définit à son tour une tournée pour faire la distribution. Le simulateur prend en considération la région de Normandie en utilisant une carte routière obtenue du site www.openstreetmap.org. Les temps de déplacements ont été aussi pris à partir de ce site avec une modification pour prendre en charge une vitesse plus réduite pour les camions.

Le système comporte plusieurs aspects qui demandent une optimisation, tels que le nombre et la position des déconditionneurs, la configuration de chaque station de traitement, la tournée de collectes, la tournée de distribution, etc. La partie concernant la définition du nombre de déconditionneurs et leurs placements est prise en

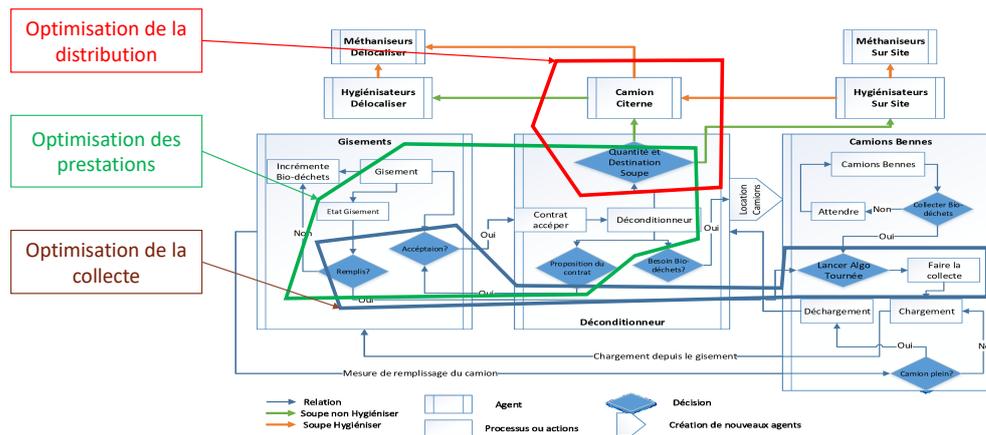


FIGURE 3.23 – Diagramme de décisions

charge par un autre partenaire du projet. De notre côté, on prend cette information comme une entrée de notre simulation. Nous avons ajouté l'option de placer manuellement des déconditionneurs ou des hygiénisateurs afin de faire des tests. L'outil développé permet de suivre les paramètres d'un déconditionneur donné dans le temps (l'évolution de bilan économique, et énergétique).

3.2.5 Optimisation du processus

Dans les systèmes complexes, plusieurs phénomènes peuvent se dérouler en même temps. Le problème est que l'on ne peut pas considérer chaque phénomène indépendamment parce qu'il dépend de la situation de l'autre partie du système surtout quand les décisions sont au même niveau (opérationnel, tactique ou stratégique). Par exemple, pour le cas de notre système, nous avons la collecte et la distribution qui se passent en même temps donc si la collecte se passe mal, la distribution se passe mal aussi. Le schéma des différentes décisions qui se passent dans le système est représenté sur la Figure 3.23. Nous avons identifié trois optimisations de trois aspects du système qui se déroulent en même temps. Nous avons procédé par sim-optimisation afin de résoudre ce problème. L'idée générale est de placer différents moteurs d'optimisation qui vont se lancer à des moments différents. Nous avons choisit les trois problèmes suivants :

- Optimisation de la tournée de collecte de déchet
- Optimisation de la distribution de soupe
- Optimisation de la négociation de contrat

Optimisation de la tournée des camions pour la collecte

Chaque déconditionneur est lié à un certain nombre de gisement par contrat, et il doit collecter les déchets au moins une fois tous les trois jours de chaque gisement. La flotte des camions est définie selon le besoin puisque c'est une location. Nous avons proposé une heuristique pour résoudre ce problème puis nous avons testé avec un algorithme génétique. L'objectif de l'optimisation est de minimiser les distances parcourues et de maximiser la quantité de déchets collectés. Il est possible d'effectuer plusieurs tournées dans la même journée. Le processus d'optimisation se lance chaque jour travaillé. Ce travail est détaillé dans (MAZAR et al., 2017).

Optimisation de la distribution de la soupe

L'hygiénisation est le processus de la chaîne de valorisation portant le plus de contraintes en terme sanitaire, temporel, logistique. Un batch d'hygiénisation est défini par un temps et un volume propre à l'hygiénisateur. La plus grande contrainte est la nécessité de méthaniser la soupe organique dans les 48 heures suivant le batch. L'objectif de la démarche d'optimisation des flux est de minimiser les coûts de traitement tout en ayant un bilan d'émission le plus faible possible. Selon la quantité de déchets récoltés, les programmes calculeront la quantité à transférer aux méthaniseurs qui n'ont pas d'hygiénisateurs et celle à transférer aux méthaniseurs avec hygiénisateurs. Nous avons utilisé une méthode exact pour résoudre le problème. La modélisation du problème est présentée dans (CONSTANT-MENEY et al., 2017)

Optimisation des contrats

L'installation d'un premier déconditionneur permet de décrocher des contrats avec les gisements de sa région, puisqu'il choisit les gisements par rapport aux distances qui les séparent du déconditionneur qui doit être inférieur à 60 Km. Généralement le déconditionneur décroche des contrats de 6 mois, et le prix de prestation des traitements des biodéchets est différent d'un gisement à un autre. Pour établir un contrat il faut vérifier certains paramètres de gisement comme sa distance par rapport au déconditionneur, sa capacité de stockage, son rendement et son emplacement par rapport aux autres gisements (s'il est placé seul ou s'il est dans une zone remplie de gisements). Après l'installation d'un nouveau déconditionneur dans un territoire proche de l'ancien, le nouveau cherche des gisements pour créer des contrats avec de meilleures conditions.

L'adaptation de la dynamique des contrats entre déconditionneurs et gisements dans le simulateur permettra d'optimiser la forme des contrats pour assurer un comportement durable et équitable du système. Pour résoudre cette problématique nous avons proposé une solution basée sur la négociation entre agents. La négociation s'active à la fin de chaque contrat, elle permet au déconditionneur d'ajouter des gisements s'il a besoin ou d'augmenter le prix de prestation des biodéchets. En même temps, la négociation permet aux gisements de changer le déconditionneur s'il en existe un autre dans leur territoire ou de demander une réduction de prestation.

Le déconditionneur calcule ses investissements et ses gains pour chaque période de contrat. À la fin de chaque contrat on estime un prix de prestation par tonne proposé par l'agent déconditionneur avec l'équation suivante :

$$PrixP_k = \sum_{j=0}^{NbT} CoutT_j \times \frac{stockGis_{k,j}}{\sum_{i=0}^{Gis_j} stockGis_{i,j}}$$

Où :

- $PrixP_k$: Prix de prestation de biodéchets proposés par le déconditionneur au gisement k .
- $StockGis_{i,j}$: Quantité de biodéchets ramassés dans la tournée j depuis le gisement i .
- NbT : est le nombre de tournées dont a fait partie ce gisement
- $CoutT_j$ le coût de la tournée numéro j
- Gis_j le nombre de gisements dans la tournée j

A la fin du contrat, le déconditionneur propose de nouveaux prix pour chaque gisement, ces prix sont calculés par la relation suivante :

$$PrixP_i \leftarrow PrixP_i + PrixP_i \times \delta_i \quad (3.3)$$

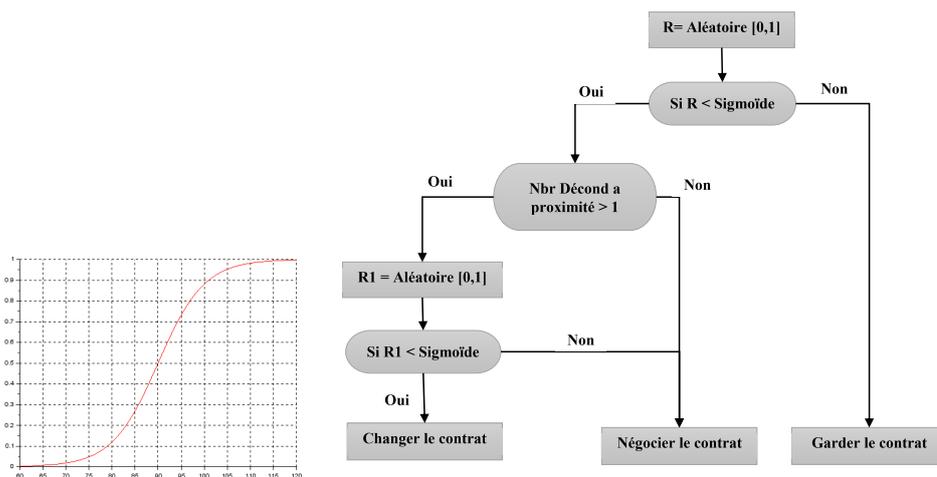
δ_i est une valeur de pourcentage adapté pour chaque gisement i , cette valeur est calculée par rapport à son historique pendant le contrat précédent. Le calcul du δ se fait comme suit :

$$\delta_i = \frac{ProxPMoy - PrixP_i}{ProxPMoy}$$

Avec $ProxPMoy$ est le prix moyen proposé par le déconditionneur.

Après l'implémentation des variables de décisions et le calcul de la valeur δ qui permet au déconditionneur de gérer ses prix. Nous avons implémenter un algorithme basé sur une sigmoïde qui permet aux agents de prendre différentes décisions aléatoires. L'équation 3.4 détermine l'allure de cette fonction que l'on peut observer sur la Figure 3.24(a) qui varie entre 60 et 120 euros (qui sont les extrêmes des prix proposés sur le marché). Cette fonction est définie pour chaque gisement i .

$$Sigmoide_i = 1 / (1 + \exp(0.2 \times (90 - PrixP_i))) \quad (3.4)$$



(a) La fonction d'activation (b) Algorithme de négociation de contrat : de point de vue gisement
de comportement de l'agent ment lors de la négociation

FIGURE 3.24 – Algorithme de négociation

La Figure 3.24(b) montre le diagramme de l'algorithme des contrats. Il génère une variable aléatoire R pour prendre une décision de garder ou négocier le contrat. Si $(R < sigmoide_i)$ donc le prix du contrat est supérieur à un seuil, alors le gisement déclenche un processus de négociation. il va tout d'abord vérifier s'il y a plus qu'un déconditionneur dans son entourage. Si oui, il génère une autre variable aléatoire $R1$, si $(R1 < Sigmoide_i)$ donc la probabilité du prix élevé est grande, dans ce cas le gisement demande le changement du contrat, sinon il demande une négociation avec l'ancien déconditionneur. quand un déconditionneur reçoit une demande de négociation, il propose un nouveau prix calculé avec le relation 3.3

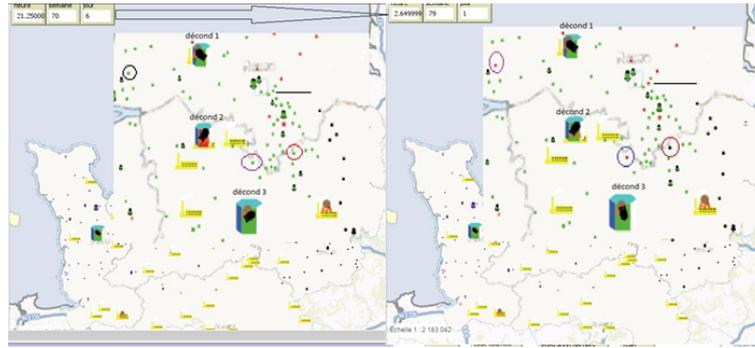


FIGURE 3.25 – Implémentation de l'algorithme de négociation pour les déconditionneurs existants

TABLE 3.3 – Comparaison des performances d'un déconditionneur pour deux modes de fonctionnement différents

	Collecte [Tonne]	$\frac{\text{Gain}}{\text{Tonne}}$ [€]	$\frac{\text{Energie Produite}}{\text{Energie Consommée}}$	$\frac{\text{KCO}_2}{\text{Tonne}}$ [KCO ₂]
Mode centralisé	4461	73.02	6	19.8
Mode Collaboratif	11161	62.58	4.2	44.2

Nous avons exécuté quelques simulations pour voir le comportement des contrats. La Figure 3.25 montre deux copies d'écrans de la répartition des gisements avant et après le processus de négociation. On peut observer que :

- les gisements en rouge sont en contrat avec le déconditionneur 1
- les gisements en vert sont en contrat avec le déconditionneur 2
- les gisements en noir sont en contrat avec le déconditionneur 3

les gisements G1, G2 et G3 sont en contrat avec le déconditionneur 2 avant la négociation. Après la négociation, G1 et G2 changent de contrat pour passer avec le déconditionneur 1 (Rouge), G2 passe avec le déconditionneur 3 (noir).

Cette méthode fonctionne pour ces premiers résultats, mais le domaine de l'optimisation par négociation est très dépendant du comportement des agents et de leurs préférences. Un thèse vient de commencer en collaboration avec Neoma Business-School pour creuser ce point et l'étendre aux moyens de transport pour assurer une logistique multi modale.

À titre d'exemple, nous testons deux modes de fonctionnement d'un déconditionneur existant dans un mode optimale où la collecte des déchets est optimisée par une méthode hybride (génétique-heuristique), la distribution quand il y a lieu est assuré par une heuristique. Les résultats montrent que le mode collaboratif augmente la quantité collectée par le déconditionneur qui passe de 4461 Tonnes/an en mode centralisé à 11161 Tonnes/an en mode collaboratif. Par contre le taux d'énergie produite par rapport à l'énergie consommée passe de 6 en mode centralisé à 4.2 en mode collaboratif. Cela est dû à la consommation énergétique de la distribution qui n'a pas lieu dans le mode centralisé. Pour la même raison, on remarque que le taux de gain par tonne baisse, alors que l'empreinte carbone augmente. Par contre, la méthode collaborative est plus rentable puisque dans la même période le gain total du déconditionneur est de 325742 € en mode centralisé contre 698455 € dans le mode collaboratif.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai résumé mes travaux sur la simulation et l'optimisation des systèmes de production d'énergies renouvelables. C'est le résultat de la participation dans un projet européen Interreg (MerInnovate) et un projet régional (PcBioD). Mon travail sur ce domaine m'a permis de découvrir la puissance de la simulation par systèmes multi-agents et d'approfondir les techniques d'optimisation basées sur la simulation. J'ai pu aussi proposer trois sujets de thèse pour approfondir plusieurs points que l'on a pas pu traiter durant les projets, tels que l'application d'autres techniques de maintenance comme la maintenance opportuniste ou la maintenance pro-active pour les éoliennes offshore (Deux thèses en cours en Algérie) ou l'approfondissement de l'étude de l'effet de changements réglementaires et techniques sur le traitement de déchets et la production énergétique à base de méthanisation (Thèse régionale avec co-financement Neoma-bs). Plusieurs projets ont été déposés pour continuer à alimenter cette axe tels que le projet cleanwind (ANR) ou les projets windrisk et tide-DS (Interreg-FCE).

4

Logistique interne dans les ateliers de production flexibles

4.1 Introduction

La personnalisation des produits manufacturés, la concurrence internationale, les normes réglementaires nationales et internationales, l'introduction des énergies renouvelables, la variation et la diversification de la demande, sont des contraintes externes auxquelles les entreprises du secteur industriel doivent faire face. Les systèmes de production traditionnels sont incapables de satisfaire ces nouvelles exigences (KOREN et al., 1999). Face à ces aléas, les entreprises migrent de plus en plus vers des systèmes de production flexibles et intelligents capables de satisfaire une large gamme de produits, de répondre rapidement aux demandes des clients et qui ne coûtent pas cher.

Les systèmes de production flexibles ont été introduits comme une réponse à ces exigences, sauf que la flexibilité implique souvent des coûts importants et des difficultés dans la gestion. Ainsi, l'adoption des systèmes de production flexibles ou reconfigurables nécessite des études approfondies avant leur mise en application, tant sur le plan économique que sur le plan des nouvelles performances qu'elles pourraient apporter à l'entreprise. La structure générale de ce genre de systèmes de production permet le passage de produits d'un poste de production à un autre rapidement, grâce à la réduction de lignes dédiées, la concentration de la production sur des structures en cellules où différents produits peuvent avoir des flux différents et complexes au sein du même atelier. Le transport des produits entre les différents postes de travail devient une tâche de plus en plus importante dans les ateliers de production flexibles (CHRISTOPHER, 2016). De plus, cette tâche fait partie des tâches les plus complexes dans la gestion des ateliers de production flexibles GATTORNA, 2015 où elle est centrale par rapport aux autres tâches parce qu'elle touche à tous les autres services de l'atelier tels que la production, l'inspection et la maintenance. Différents types de décisions sont prises en permanence dans les FMS concernant le transport des produits à différents niveaux de décisions stratégiques (type de transport dans l'atelier), tactiques (nombre de transporteurs et leurs capacités) et opérationnelles (ordonnancement et supervision). Avec l'introduction de la robotique dans l'industrie et notamment la robotique collaborative, et grâce aux avancées faites dans la sécurisation des interactions hommes-robots (LASOTA, ROSSANO et SHAH, 2014), on trouve plusieurs types de robots travaillant côte à côte avec les humains notamment les AGV. L'introduction de ces robots est venue principalement pour assurer les tâches répétitives et pénibles sans valeur ajoutée pour l'humain ou dangereuse pour sa santé. Dans un tel contexte, les architectures de supervision et les algorithmes d'ordonnancement doivent être développés pour gérer de telles complexités.

La première fois que j'ai travaillé sur ce problème dans les ateliers de production flexibles et complexes date de mon expérience avec G-scop et STmicroelectroniques, où j'ai travaillé sur le problème d'inspection. En fait, j'ai remarqué que la plupart des problèmes d'inspection, notamment les inspections inutiles, viennent du comportement des lots entre les machines de production et les machines d'inspection. Ce comportement est dû en réalité à la tâche de transport qui est planifiée indépendamment des autres tâches. Par la suite, j'ai travaillé sur ce problème avec le Dr. Eloundou José, durant sa thèse sur l'ordonnancement dynamique des tâches de transport en développant un algorithme basé sur l'entropie et en essayant de considérer le plus de critères possibles. J'ai participé par la suite dans le projet Xterm, où nous avons amélioré ces algorithmes et prouvé leur qualité en les comparant à d'autres algorithmes d'optimisation. J'ai aussi travaillé avec l'équipe du CESI sur le montage du projet Européen "CoRoT", sur la robotisation de la tâche de transport en développant des manipulateurs mobiles et en les implémentant dans le milieu industriel. Je suis actuellement le chef de projet de CoRoT et je participe dans l'encadrement de la thèse de Mr. Moussa Souleymane, sur le développement d'une architecture distribuée pour la supervision de robots manipulateurs mobiles modulaires.

Dans ce chapitre, je vais détailler les contributions suivantes :

- Développement de l'algorithme d'ordonnancement dynamique basé sur l'entropie
- Simulation et optimisation du job shop flexible
- Robotisation du transport au sein de l'atelier flexible

4.2 Ordonnancement dynamique de tâches de transport dans l'atelier flexible

Cette partie a été réalisée durant la thèse de Dr. Eloundou José, qui a soutenu le 11 Juillet 2016. Le sujet de la thèse tourne autour de la modélisation des systèmes de production flexibles en se basant sur les réseaux de pétri. Au cours du développement du modèle, nous nous sommes retrouvés à gérer à chaque fois les transporteurs, pour estimer les temps de commencement réel de l'exécution des opérations de production. Cela est d'autant plus vrai pour des configurations Hosb shop ou jobshop flexibles, où les déplacements sont multiples ainsi que les transporteurs. En apportant une solution au problème de transport, nous allons ainsi résoudre celui dû à l'allocation des ressources dans un atelier de production flexible.

La gestion du transport consiste à assurer le déplacement des produits en cours de production, ainsi que les produits finis des zones de chargement, vers de zones de déchargement afin que ces derniers subissent des opérations de production, ou qu'ils soient expédiés (produits finis). Le transport dans un atelier de production doit respecter les contraintes logistiques (ressources limitées, nombre de machines, positions des équipements, temps de production etc.) et les contraintes contractuelles et réglementaires (délai, qualité, coût etc.). Une tâche de transport consiste au déplacement d'un produit d'une zone de chargement vers une autre zone de déchargement. Elle peut être divisée en trois opérations élémentaires qui sont :

- le chargement d'un produit sur un moyen de transport,
- le déplacement du produit via le moyen de transport vers la destination
- le déchargement du produit vers l'emplacement de la destination

Une ou plusieurs ressources sont nécessaires à l'exécution de la tâche de transport. D'autres opérations peuvent être ajoutées à cette tâche sans qu'elles soient directement liées à elle, par exemple le déplacement à l'emplacement de chargement ou le déplacement vers la position de repos. Les ressources de transport que l'on va considérer dans cette étude sont :

- Un ou plusieurs opérateurs transportant des produits, soit manuellement, ou alors à l'aide de transpalette ou au moyen de chariots élévateurs.
- Un ou plusieurs robots automatisés qui se coordonnent pour assurer le déplacement des produits. Ces robots peuvent prendre plusieurs formes, un robot mobile seul, un robot mobile avec un bras de chargement/déchargement, des bras fixes et un humain, etc.

Dans les industries faible volume et grande diversité de produits, il y a souvent plus d'opérations de transport que de ressources disponibles. Dans ce cas de figure, c'est au gestionnaire du système de production de trouver une stratégie pour résoudre ce problème d'allocation de ressources. Les hypothèses suivantes ont été émises afin de cadrer l'étude :

- Chaque machine ou poste de travail possède deux types de stocks : un stock d'entrée où arrivent les produits, et un autre de sortie d'où ces derniers repartent lorsqu'ils ont subi une opération. Les stocks en entrée des machines constituent des zones de déchargement, tandis que ceux en sortie des zones de chargement pour les transporteurs.
- Chaque ressource de transport est capable de se déplacer librement d'une machine à une autre. Cela signifie qu'il y a une flexibilité totale des moyens de manutention.
- Le déplacement de la ressource assurant le transport entre deux machines est rectiligne et uniforme.
- La vitesse de déplacement des ressources de transport, ainsi que les temps de chargement et déchargement sont constants.
- La gestion des files d'attente des machines se fera suivant des règles de dispatching qui seront définies de manière locale au niveau de chaque machine.

4.2.1 Objectifs et étapes méthodologiques

La méthode d'aide à la décision que nous proposons doit permettre d'assurer le flux, en gérant les conflits liés au transport dans l'atelier de production, et ainsi d'empêcher des situations de blocage de l'exécution d'une séquence de production. De plus, la méthode d'aide à la décision que nous proposons permet de proposer une stratégie d'ordonnancement dont les buts sont :

- L'optimisation des charges des machines
- La minimisation de la distance parcourue par les ressources de transport
- La minimisation des temps moyens de production par produit
- L'augmentation de la flexibilité dynamique du routage du système de production

Pour la mise en place de la méthode d'aide à la décision, nous allons suivre les étapes méthodologiques présentées dans les travaux de MENA, 2000. L'auteur présente les quatre grandes étapes d'un processus d'aide à la décision à savoir :

1. Établir la liste des actions potentielles

2. Dresser la liste des critères à prendre en considération
3. Établir le tableau des performances
4. Agréger les performances

Nous avons défini une activité de transport comme l'ensemble des opérations de transport susceptibles d'être réalisés à un instant t de la production. Ainsi, l'ensemble des actions potentielles sera aussi celui des opérations de transport susceptibles d'être réalisées à un instant donné. Concrètement, cela signifie que la notion d'activité de transport dépend du temps (ou de l'instant) et de la disponibilité des ressources de transport à ces dits-instants. Ainsi, à chaque instant de décision, il y aura des actions potentielles (opérations de transport) qui seront réalisables. SOURISSE, 1995 DEVISE, 1995 LARABI, 2010 Nous appelons instant de décision tout instant où une ressource de transport est disponible, et où un ou plusieurs produits sont disponibles et prêts à être transportés.

Une opération de transport est caractérisée par les éléments suivants :LARABI, 2010

- Le produit à transporter
- La zone de chargement ou le stock d'entrée, dans lequel se trouve le produit à transporter
- La zone de déchargement vers laquelle sera transporté le produit
- La ressource qui devra permettre le transport du produit de la zone de chargement vers la zone de déchargement.

La définition des caractéristiques d'une activité de transport permet de déterminer pour une opération un ensemble de données au cours de la production. Par exemple, la connaissance de la zone de déchargement permet d'avoir des données sur le nombre de produits et le temps d'attente au niveau de cette machine. La connaissance des couples zone de chargement et de déchargement permet de connaître la distance à parcourir par la ressource de transport afin d'en effectuer l'opération. Les données que l'on rattache ainsi à une opération de transport permettent de définir des critères de décision.

L'ensemble des actions potentielles (opération de transport réalisables) sont listées à chaque instant de prise de décision dans une table appelée table de décision instantanée du transport. Pour chaque opération de transport, un ensemble de critères d'évaluation est défini pour la gestion des conflits liés aux ressources de transport. Nous avons considéré les critères suivants :

- La distance entre un stock de départ et le stock d'arrivée;
- La distance entre le stock de départ et une ressource de transport;
- Le temps de parcours par une ressource de transport pour effectuer le transport entre un stock de départ et un stock d'arrivée;
- Le taux de remplissage des zones de chargement et de déchargement;
- La charge du stock d'arrivée (C'est la durée totale des opérations dans la file d'attente du stock d'entrée de la machine de destination.);

Le nombre de critères constitue le nombre de colonnes de la table de décision. Le nombre de lignes de la table d'évaluation instantanée du transport correspondra à celui des opérations qui constituent l'activité de transport à l'instant de décision.

Rappelons qu'une opération de transport n'est possible que s'il existe un produit p à transporter, d'une Zone de Chargement Z_c vers une Zone de Déchargement Z_D par une ressource de transport Tr .

Présentation de la table de décision

Pour définir la table d'évaluation des activités de transport, on se place à un instant de décision T , où il est possible d'effectuer I opérations de transport possibles. Considérons aussi que pour toute la phase de production il y a un nombre J de critères d'évaluation. La table d'évaluation instantanée de l'activité de transport sera alors celle de la table 4.1 La table d'évaluation possède I lignes et $J + 5$ colonnes.

Opération	Tr	Pr	ZC	ZD	$critre_1$...	$critre_j$...	$critre_J$
1	$Tr_{\sigma(1)}$	$Pr_{\lambda(1)}$	$ZC_{\mu(1)}$	$ZD_{\phi(1)}$	A_{11}	...	A_{1j}	...	A_{1J}
2	$Tr_{\sigma(2)}$	$Pr_{\lambda(2)}$	$ZC_{\mu(2)}$	$ZD_{\phi(2)}$	A_{21}	...	A_{2j}	...	A_{2J}
3	$Tr_{\sigma(3)}$	$Pr_{\lambda(3)}$	$ZC_{\mu(3)}$	$ZD_{\phi(3)}$	A_{31}	...	A_{3j}	...	A_{3J}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
i	$Tr_{\sigma(i)}$	$Pr_{\lambda(i)}$	$ZC_{\mu(i)}$	$ZD_{\phi(i)}$	A_{i1}	...	A_{ij}	...	A_{iJ}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
I	$Tr_{\sigma(I)}$	$Pr_{\lambda(I)}$	$ZC_{\mu(I)}$	$ZD_{\phi(I)}$	A_{I1}	...	A_{Ij}	...	A_{IJ}

TABLE 4.1 – Table d'évaluation de l'activité de transport

Chaque ligne représente une opération de transport. La première colonne donne le numéro de l'opération de transport, les quatre colonnes suivantes représentent les attributs liés à chaque opération, à savoir la ressource de transport affectée (colonne Tr), le produit à transporter (colonne Pr), la zone de chargement (colonne ZC) et la zone de déchargement (ZD). Les J dernières colonnes représentent les critères d'évaluation des opérations de transport qui ont été au préalable définis par le gestionnaire du système de production. Les fonctions $\sigma(i)$, $\lambda(i)$, $\mu(i)$, $\phi(i)$ sont les fonctions d'affectation vers les ensembles des transporteurs, produits, zones de chargement, zones de déchargement disponibles à l'instant T .

Classification des critères et prise de décision

Dans la table d'évaluation les critères sont rangés suivant un ordre décroissant d'importance de la gauche vers la droite. Nous appliquons des ordres dynamiques basés sur l'entropie à chaque instant de décision. La prise en compte de chaque critère consiste à établir un filtrage qui consistera à déterminer, pour un critère j l'ensemble des opérations qui dominent toutes les autres pour une minimisation ou une maximisation de ce critère. Ainsi, à l'issue de chaque filtration, on éliminera de la table les opérations de transport qui sont dominées par d'autres (réduction de nombre de lignes).

La stratégie de l'algorithme dynamique consiste donc à établir un classement dynamique selon une entropie maximale de chaque critère, puis appliquer les critères selon ce classement. Dans les ateliers flexibles, les valeurs concernant un objectif sont rarement identiques. Cela signifie que le processus d'optimisation s'arrête très probablement après avoir minimisé le premier critère (le plus important vis à vis à l'entropie), puisqu'une solution unique est trouvée. Afin d'éviter ce problème, nous modifions la procédure d'obtention des ordres et introduisons des niveaux d'aspiration objectifs pour permettre un compromis entre une petite diminution pour un critère plus important et une augmentation substantielle pour un critère moins important, ce qui peut être intéressant dans la pratique.

Classement dynamique des critères L'algorithme de gestion dynamique de l'activité de transport a pour objectif de déterminer l'ordre d'importance des critères de décision à chaque instant de prise de décision.

Dans cette phase, allons donc reclasser les colonnes de critère de la table d'évaluation en fonction de la valeur de l'entropie. L'ordre d'importance des critères est défini par les valeurs d'entropie décroissante. Pour en arriver à ce résultat, nous normalisons les valeurs des critères, pour que l'on puisse les comparer. Pour chaque valeur A_{ij} de la Table 4.1 on obtient sa valeur normalisée N_{ij} comme suit :

$$N_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_i^I A_{ij}} \quad (4.1)$$

Ensuite, nous calculons l'entropie de chaque valeur normalisée, et additionnons les valeurs d'entropie dans la même colonne pour obtenir une entropie par critère. Les formules appliquées sont les suivantes :

$$H_{ij} = -N_{ij} \times \ln N_{ij}$$

On calcule l'entropie H_j de chaque critère j comme suit :

$$H_j = \sum_{i=1}^I h_{ij}$$

De cette manière, on obtient la table 4.2 des entropies pour chaque critère à un instant donnée.

Opération	Tr	Pr	ZC	ZD	<i>critre</i> ₁	...	<i>critre</i> _{<i>j</i>}	...	<i>critre</i> _{<i>J</i>}
1	$Tr_{\sigma(1)}$	$Pr_{\lambda(1)}$	$ZC_{\mu(1)}$	$ZD_{\phi(1)}$	h_{11}	...	h_{1j}	...	h_{1J}
2	$Tr_{\sigma(2)}$	$Pr_{\lambda(2)}$	$ZC_{\mu(2)}$	$ZD_{\phi(2)}$	h_{21}	...	h_{2j}	...	h_{2J}
3	$Tr_{\sigma(3)}$	$Pr_{\lambda(3)}$	$ZC_{\mu(3)}$	$ZD_{\phi(3)}$	h_{31}	...	h_{3j}	...	h_{3J}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
<i>i</i>	$Tr_{\sigma(i)}$	$Pr_{\lambda(i)}$	$ZC_{\mu(i)}$	$ZD_{\phi(i)}$	h_{i1}	...	h_{ij}	...	h_{iJ}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
<i>I</i>	$Tr_{\sigma(I)}$	$Pr_{\lambda(I)}$	$ZC_{\mu(I)}$	$ZD_{\phi(I)}$	h_{I1}	...	h_{Ij}	...	h_{IJ}
					H_1	...	H_j	...	H_J

TABLE 4.2 – Table d'évaluation normalisée de l'activité de transport

Flexibilité de routage Nous pouvons, à ce stade, définir un moyen de mesure de la flexibilité du routage déduite à partir des entropies H_j de chaque critère j . Nous avons proposé plusieurs formulations durant la thèse de Dr. Eloundou mais la plus représentative consiste à une somme pondérée avec le classement des critères

$$H = \sum_{j=0}^{j=J-1} \lim_{j=0} (J-j) \times H_j$$

H_j permet de mesurer la dispersion des valeurs du critère j des opérations de transport. Plus l'entropie d'une colonne est importante, plus les valeurs des opérations de transport suivants ce critère sont similaires, et moins il sera évident de faire un choix pour ce critère. Inversement, plus cette entropie est faible, plus il est facile de faire le choix d'une opération puisque les valeurs sont distinguées. Il faut noter que la valeur de l'entropie de chaque critère dépendra de l'instant de décision,

par conséquent de l'évolution du système dans le temps. La Table des entropies est exploitée afin de reclasser les colonnes de critère de la table d'évaluation des activités de transport. Après reclassement, le critère ayant l'entropie la plus élevée sera en première colonne, et celui qui possède l'entropie minimale sera positionné sur la dernière colonne. Par la suite, on applique une filtration des opérations par critère, en suivant l'ordre généré dans l'étape précédente.

La Figure 4.1 est un algorithme de l'algorithme de gestion dynamique du transport.

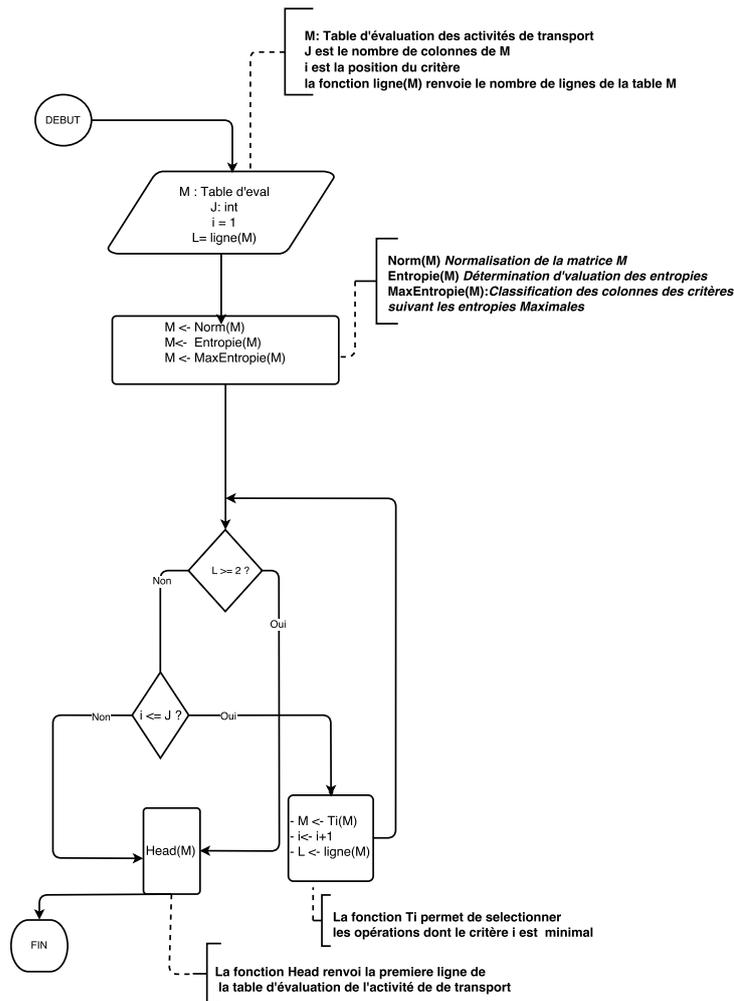


FIGURE 4.1 – Algorithme de gestion dynamique des opérations de transport

Expérimentation numérique

Afin d'étudier les performances de l'algorithme dynamique de gestion du transport, nous avons défini un cas d'étude d'un atelier de type JOB SHOP flexible, constitué de quatre machines et d'une ressource de transport des produits entre les zones de chargement et de déchargement (c.f. Figure 4.2). La complexité de cet exemple est suffisante pour tester les limites des algorithmes proposés. Nous proposons aussi un algorithme pour mesurer la flexibilité de routage dans le dit atelier de production. Nous allons évaluer les performances de l'atelier de production à travers les indicateurs suivants :

- Le Makespan;
- La distance parcourue par la ressource de transport;
- La charge des stocks des machines : c'est la valeur moyenne du nombre de produits dans l'ensemble des stocks au cours de la production. Nous avons calculé deux moyennes pour cet indicateur, à savoir la moyenne des stocks d'entrées et la moyenne des stocks de sorties.
- La flexibilité de routage moyenne.

Les critères d'évaluation des opérations de production sont :

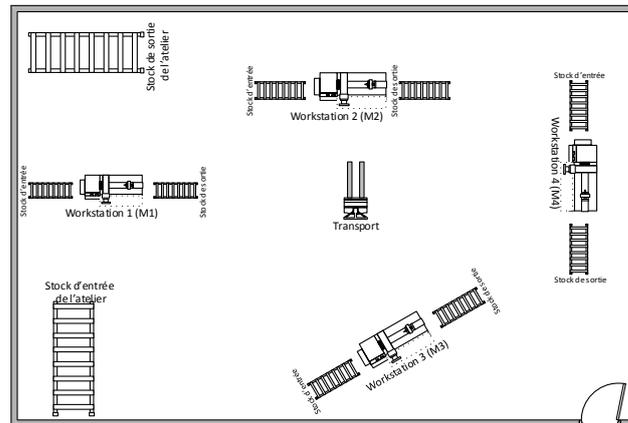


FIGURE 4.2 – atelier de production simulé

- La distance parcourue par la ressource de transport ;
- Le temps total d'écoulement des produits (Makespan)
- Les stocks moyens en sortie des machines (stock sortie)
- Les stocks moyens en entrée des machines (stock entrée)

Les expérimentations ont été conduites sur le simulateur basé sur les réseaux de pétri hiérarchiques, développé sur CPN tool. Nous comparons cinq scénarios statiques (ou l'ordre de priorité des critères est fixe) avec l'algorithme dynamique. Les ordres statiques sont choisis aléatoirement parmi les 120 configurations possibles comme suit :

- $Od_1 = (dist, Temps\ Attente\ StockSortie, Temps\ Attente\ StockEntree, TRD, TRC)$
- $Od_2 = (TRC, dist, Temps\ Attente\ StockSortie, Temps\ Attente\ StockEntree, TRD)$
- $Od_3 = (TRD, TRC, dist, Temps\ Attente\ Stock\ Sortie, Temps\ Attente\ StockEntree)$
- $Od_4 = (Temps\ Attente\ Stock\ Entree, TRD, TRC, dist, Temps\ Attente\ Stock\ Sortie)$
- $Od_5 = (Temps\ Attente\ Stock\ Sortie, Temps\ Attente\ Stock\ Entree, TRD, TRC, dist)$

Le transporteur a une flexibilité totale sur le choix des produits dans les stocks de sorties de chaque machine et aussi sur le choix des machines de la prochaine opération (parmi les machines capables d'effectuer l'opération)

La stratégie d'ordonnancement dynamique a permis de proposer une solution avec un bon compromis pour les différents indicateurs de performance considérés. La stratégie de classement des critères H_{max} , propose une solution proche de la stratégie Od_1 , sauf pour la charge sur la machine qui est nettement améliorée avec la stratégie dynamique H_{max} . En effet l'observation des classements instantanés des critères d'évaluation d'une opération de transport lors de l'exécution de l'algorithme dynamique, montre que le critère Distance parcourue est souvent prioritaire. Ceci est dû à la forme symétrique de la disposition des machines dans l'atelier du cas d'étude. On imagine que le changement de disposition des machines ne vas pas permettre à l'ordonnancement Od_1 , qui donne une priorité 1 à la distance parcourue) d'aboutir à d'aussi bons résultats que ceux présentés par notre cas d'étude. Il faut noté que la simulation n'a introduit aucune perturbation où normalement l'algorithme dynamique peut donner des résultats plus performants.

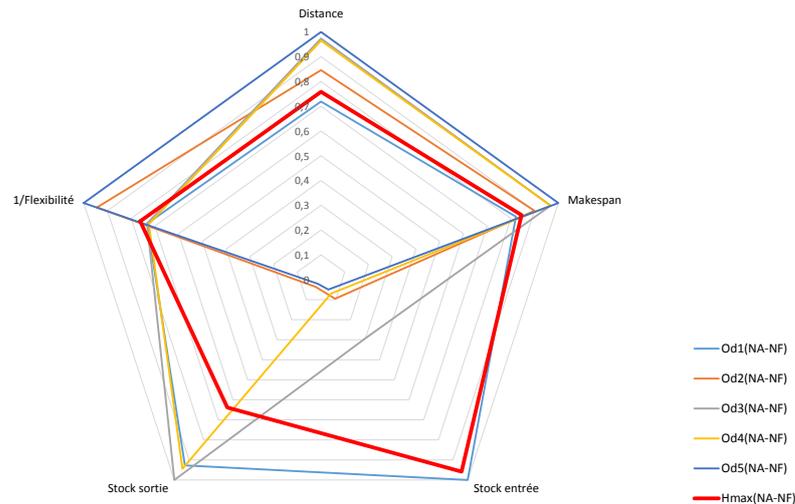


FIGURE 4.3 – Comparaison graphique des différentes stratégies d'ordonnement

Les résultats ont montré clairement que la classification des critères pour permettre instantanément de considérer le plus de critères possibles, donne de bons résultats par rapport à des indicateurs globaux tels que le makespan ou la distance totale parcourue par le transporteur. Ce travail a été complété par d'autres travaux de simulation et d'optimisation permettant de comparer la solution proposée par rapport d'autres solutions d'optimisation multi-objective.

4.2.2 Algorithme génétique pour l'optimisation de la tâche de transport

Dans le premier travail dans la thèse de Dr. Eloundou, nous avons proposé une méthode intéressante qui permet d'assigner dynamiquement des tâches à un transporteur. Plusieurs questions sont restées sans réponse, notamment concernant l'optimalité de la solution qui est basée sur l'augmentation de la flexibilité des critères. Certes la flexibilité contribue à ce que le transporteur puisse avoir plusieurs choix et réduise les chances de blocage du système, mais son lien avec les critères de performance du système de production n'est pas évidente.

Nous avons choisi d'utiliser la modélisation multi-agents pour représenter le système de production, vu (1) la facilité qu'elle procure pour représenter des systèmes complexes, (2) le fait qu'elle donne la possibilité d'explorer comment un changement dans le niveau micro entre les différents agents affecte les schémas au niveau macro ou dans l'ensemble du système et (3) parce que nous avons acquis de l'expérience dans la manipulation des systèmes multi-agents au sein de l'équipe de recherche de LINEACT

Modèle de simulation

Pour simuler différents scénarios d'un système de production flexible sur Netlogo, nous avons développé un modèle multi-agents composé de quatre agents interdépendants : produit, transporteur, machine et stock (c.f. Figure 4.4). Tous les agents sont interdépendants les uns des autres, directement ou indirectement. Dans la plupart des études antérieures (XING, CHEN et YANG, 2009) (FATTAHI, MEHRABAD et JOLAI, 2007) (SHEN et YAO, 2015), supposaient toujours qu'un modèle de job shop flexible comporte trois éléments clés : la machine, le produit et le job/opération. Le

dernier élément, l'opération, n'est pas modélisé comme un agent dans notre modèle, mais défini comme une propriété du produit et de la machine (plus de détails dans les parties suivantes). Les agents sont définis comme suit :

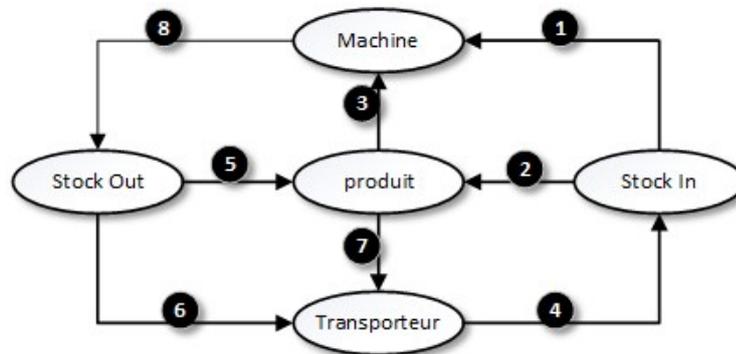


FIGURE 4.4 – Le modèle multi-agents de système de production flexible

- **Produit** : C'est l'un des éléments les plus importants du modèle. Nous avons introduit cet agent sur la base de la définition d'un job dans le modèle. Afin de considérer la possibilité d'une production itérative, nous définissons trois types de produits avec trois séquences d'opérations dans l'étape de configuration. Il est possible de fabriquer plus de types de produits et d'ajouter plus d'opérations si nécessaire. L'exemple de données de produits et d'opérations est présenté dans le tableau 4.3.

TABLE 4.3 – Produits et opérations

Produit	Opérations
P_1	O_0, O_1
P_2	O_1, O_2
P_3	O_0, O_3

- **Machine**. FJSP permet qu'une opération puisse être effectuée sur plus d'une machine. Dans le FJSP, "plus d'une machine" signifie une liste donnée de machines. Pour chaque opération, le temps de fabrication dépend de la machine. Les curseurs de l'interface du modèle peuvent aider à régler la durée et l'étape de configuration.
- **Stock**. En raison de l'ajout de tâches de transport dans le problème, le produit doit avoir un endroit pour rester après le transfert par transporteur. Par conséquent, nous définissons deux types de stocks, le stock machine et le stock atelier. Pour chaque machine, le stock d'entrée est utilisé pour stocker les produits en attente d'exécution et le stock de sortie est utilisé pour stocker les produits déjà exécutés et en attente de transfert. Pour l'atelier, le stock d'entrée contient la matière brute relative à chaque produit et le stock de sortie contient les produits finis avant livraison. Les stocks ont une capacité limitée. Lorsqu'un stock d'entrée de machine est rempli, le transporteur ne peut plus déposer de produits, et lorsqu'un stock de sortie de machine est rempli, alors la machine ne peut plus produire.

- **Transporter.** Il est le seul agent à exécuter les tâches de transport. Chaque fois qu'un transporteur est disponible pour exécuter des tâches de transport, il utilisera une matrice de décision pour faire son choix de produits ou exécute un plan déjà défini au préalable. Le nombre de transporteurs est également défini à l'étape de configuration du système puisqu'il relève d'une décision tactique. Le produit est assigné au transporteur dès la prise de décision même si le transporteur met du retard pour le prélever. On évite ainsi qu'un autre transporteur ne le prenne entre la décision et l'action.

Algorithme génétique

Afin de tester les performances de l'algorithme dynamique nous allons le comparer à un algorithme génétique multi-objectif. En fait, nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'autres travaux qui s'intéressent à l'optimisation de la tâche de transport par des algorithmes génériques multi-objectifs, notamment pour un job shop flexible.

codage du chromosome : D'autres travaux (ZANDIEH, MAHDAVI et BAGHERI, 2008) ont codé leur chromosome composé de trois éléments clés : opération, job et machine (Figure 4.5). Sur la base de ce type de construction, il n'est pas possible d'insérer des tâches de transport dans le système et de terminer la production itérative. Nous présentons donc les chromosomes comme une longue suite de triples, où chacun donne la possibilité de choisir un produit, une machine ou un transporteur (Figure 4.6). La taille du chromosome est égale à trois fois le nombre d'opérations nécessaires au transfert d'un produit fois le nombre de produits à transférer. Sur la base de l'exemple que nous avons simulé, pour chaque produit, il doit être transféré trois fois : deux fois pour les opérations qu'il va subir sur les machines et une fois pour le transfert final au stock de produits finis.



FIGURE 4.5 – Chromosomes pour l'ordonnancement de la production

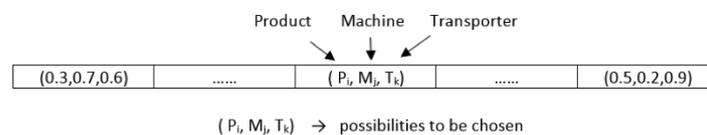


FIGURE 4.6 – Chromosome proposé

La raison pour laquelle il est préférable d'utiliser un codage décimal des gènes, plutôt que d'utiliser des nombres entiers pour lister les machines ou les opérations, est qu'il est plus simple d'exécuter des opérations de croisement et de mutation pour la production itérative. Les possibilités peuvent être traduites par la formule suivante :

$$n = \lfloor \text{gene} \times \text{la longueur de la correspondant liste} + 1 \rfloor \quad (4.2)$$

Où n présente la position de l'élément dans la liste correspondante, la fonction $\lfloor x \rfloor$ est de trouver le plus grand nombre entier inférieur ou égal à x . La liste correspondante pour le produit est la liste des produits réalisables à transférer. Pour la machine, c'est le sous-ensemble de toutes les machines qui sont capables d'exécuter la prochaine opération du produit, et pour le transporteur, ce sont tous les transporteurs dans le système. Par ces étapes, l'élément que nous obtenons est le n^{me} élément de la liste correspondante.

Fonction d'évaluation : Dans la méthode NSGA-II, aucun objectif n'est considéré comme prioritaire par rapport aux autres. Vu la complexité du système, il n'est pas évident de calculer les fonctions analytiques pour les objectifs que nous avons proposé. Nous nous sommes basés sur le simulateur pour évaluer chaque chromosome. C'est le critère distance qui pose plus de problème parce qu'il dépend de la dernière position du transporteur. L'estimation de la distance ne donne pas de résultats précis, surtout si l'on prend en compte les phénomènes de ralentissement dûs à l'encombrement.

Les cinq objectifs utilisés pour l'évaluation des résultats sont : le Makespan, la distance, la taille moyenne des stocks, le temps d'attente des produits et la différence avec les temps de livraison. Le NSGA-II représenté génère un ensemble de solutions optimales (non dominées) qui constituent le premier front de Pareto. La proposition d'un ensemble de solutions demande au décideur de prendre une décision de choix de la meilleure solution. Nous avons testé plusieurs propositions pour réduire le nombre de solutions du premier front de Pareto. Dans cette application, nous avons préféré garder toutes les solutions pour les comparer avec les résultats de la méthode basée sur l'algorithme d'ordonnancement dynamique.

Opérateurs génétiques : La méthode NSGA-II utilise des opérateurs de croisement et de mutation pour générer la nouvelle population. Nous supposons qu'il est possible de générer de bons enfants même si les parents sont relativement mauvais. Par conséquent, à chaque itération, nous générons des enfants en choisissant au hasard des parents dans l'ancienne population. L'opérateur de mutation simule la mutation observée dans la nature. Avec un taux de mutation donné, chaque point d'un gène peut être modifié de façon aléatoire.

Les populations d'enfants et de parents sont combinées et triées ensembles en fonction de la non-dominance. La nouvelle génération est remplie par la suite par chaque front, jusqu'à ce qu'elle atteigne la taille de la population. Si l'on doit choisir des individus à partir d'un front, les individus sont sélectionnés en fonction de la distance d'encombrement (crowding distance) dans l'ordre décroissant. Ces processus se répètent jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint.

Expérimentation numériques

Pour illustrer l'efficacité de l'approche que nous proposons, nous avons défini deux instances de tests avec les 5 objectifs que nous avons mentionné ci-dessus. Tous les problèmes incluent trois types de produits, quatre machines et deux transporteurs. Les opérations de chaque type de produits sont déjà indiquées dans le Tableau 4.3. Les temps de chaque opération sur chaque machine sont donnés dans le Tableau 4.4. L'environnement de la simulation (c.f. Figure 4.7) permet d'exécuter plusieurs méthodes (Algorithme génétique, algorithme dynamique, algorithme statique, etc), et de modifier les caractéristiques de l'atelier de production tels que les

TABLE 4.4 – temps de processus pour chaque machine pour chaque opération possible

Operation	O_0	O_1	O_2
M_0	240	-	240
M_1	60	300	-
M_2	-	60	180
M_3	180	-	240

temps de processus des machines, le nombre de transporteurs, les caractéristiques des algorithmes, etc.

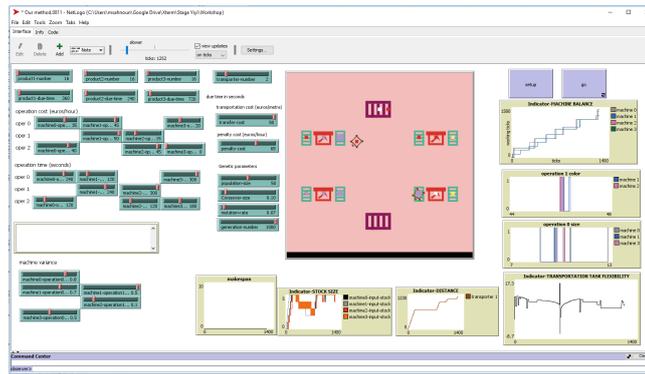


FIGURE 4.7 – Environnement de simulation sur NetLogo

Les résultats de la comparaison des deux instances de test sont présentés au tableau 4.5. Pour plus de clarté, nous utilisons le premier problème à titre d'exemple. $2 \times 2 \times 2 \times 2$ dans le tableau 4.5 signifie 2 produits 1, 2 produits 2, 2 produits 3 et 2 transporteurs dans le système. Les temps d'exécution des instances est aussi donné sur le même tableau.

TABLE 4.5 – Comparison Results of Proposed Algorithm with GA method

Problems	Objectives	Our Method	Genetic Algorithm														
			GA1	GA2	GA3	GA4	GA5	GA6	GA7	GA8	GA9	GA10	GA11	GA12	GA13	GA14	GA15
$2 \times 2 \times 2 \times 2$	Makespan [s]	581	582	751	775	620	748	878	821	639	862	694	879	675	808	879	-
	Distance [m]	438	428	390	434	441	396	435	413	436	376	397	417	421	401	406	-
	Stock size	2	3	2	2	2	3	3	3	2	3	2	2	2	4	1	-
	Waiting time [s]	283	178	484	235	254	485	303	303	179	430	363	489	294	310	312	-
	Due time [s]	232	57	412	345	331	201	463	463	309	505	293	291	161	233	595	-
	CPU time [s]	0.76	971.96														
$15 \times 20 \times 17 \times 2$	Makespan [s]	4873	5054	5360	6658	6794	6021	5814	5680	6143	6117	6203	5489	5724	5522	6571	6343
	Distance [m]	3972	3967	3929	3909	4041	4082	3829	3965	3930	4159	3936	3905	3862	3959	3834	4012
	Stock size	28	18	20	20	15	16	21	17	18	16	16	21	23	19	19	15
	Waiting time [s]	1185	4470	4025	4995	5186	5010	5102	4634	5423	4970	5588	5067	5079	5007	5614	5636
	Due time [s]	3964	6437	7203	10834	10922	8527	8603	7531	8680	9316	9287	8022	8921	7742	10130	9065
	CPU time [s]	5.43	22155.36														

A partir du tableau 4.5, nous pouvons voir qu'à chaque fois, GA offre un ensemble de solutions efficaces. Dans notre algorithme dynamique, nous essayons de faire le meilleur choix à chaque fois que nous prenons une décision, ce qui signifie que nous utilisons différentes priorités de critères d'évaluation pour rechercher des solutions dynamiques efficaces.

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que la solution donnée par l'algorithme dynamique est toujours aussi efficace que les solutions de GA. De plus, comme l'AG doit prendre en compte cinq objectifs dans la recherche de solutions efficaces, il pourrait parfois donner une solution manifestement indésirable. Par exemple, la dernière solution de l'AG dans le premier instant, a le minimum de la

taille maximale du stock. Nous pensons que le décideur ne choisirait pas cette solution puisque la valeur du *makepan* n'est pas du tout pratique. Cela montre un des avantages majeurs de l'algorithme dynamique, qui offre non seulement une solution dominée par aucune autre du premier front de Pareto, mais aussi sur l'efficacité dynamique qui garantie en quelque sorte des solutions équilibrées. De plus, nous offrons aux décideurs une solution unique, ce qui fait qu'il n'est pas nécessaire de prendre le temps d'en choisir une parmi plusieurs, efficaces, mais déroutantes. Le dernier avantage de l'algorithme proposé, mais non le moindre, est de faire gagner du temps de calcul. Pour obtenir des solutions relativement bonnes, la méthode GA nécessite souvent 500 générations, ce qui demande beaucoup de temps pour converger.

4.3 Robotisation de la tâche de transport

Une grande partie de mes travaux dans le domaine du transport interne dans les ateliers de production flexible concerne l'utilisation des robots mobiles et collaboratifs, pour assurer cette tâche pénible et répétitive. En effet, les robots sont largement utilisés dans l'industrie et représentent une composante importante de la colonne vertébrale de l'industrie Européenne (BISCHOFF et GUHL, 2010). Malgré la présence des robots dans l'industrie, ils sont souvent utilisés pour des tâches bien spécifiques, et leur adaptation à de nouvelles tâches n'est pas immédiate. Souvent, l'adaptation d'un robot pour qu'il puisse effectuer une autre tâche demande une adaptation de la programmation mais aussi de la structure, pour qu'il puisse atteindre plus d'espace ou pour pouvoir assurer la préhension de nouvelles pièces. En réalité, malgré toute la promotion des robots, ils restent des outils de production à faible flexibilité et avec un champ limité d'utilisation (BØGH et al., 2011). Plusieurs améliorations peuvent être apportées au système robotique afin de surmonter ces limitations telles que la facilitation de la programmation robotique, l'introduction des robots collaboratifs et l'utilisation de la modularité. Ces concepts attirent beaucoup de groupes de recherche en ce moment. En effet, ils touchent à des axes de recherche tels que la collaboration homme-robot, la sécurité de robots, la commande et la conception de nouvelles générations de robots (KINUGAWA, SUGAHARA et KOSUGE, 2016).

Comme la tâche de transport comporte trois types d'opérations : le chargement, le transport et le déchargement ; une nouvelle génération de robots est en train de se développer, à savoir les manipulateurs mobiles. En effet, les manipulateurs mobiles représentent une solution intéressante pour augmenter la flexibilité et le champ d'utilisation des robots, et peut assurer la tâche de transport complètement. Le concept de manipulateur mobile date de 1984 avec le robot allemand MORO (HVILSHØJ et al., 2012), qui était très coûteux et peu fiable. Aujourd'hui, il existe plusieurs manipulateurs mobiles. (SCHNEIER, SCHNEIER et BOSTELMAN, 2015) présente une liste chronologique non exhaustive des manipulateurs mobiles existants. Malgré les avantages des manipulateurs mobiles, on remarque aussi que pendant le déplacement du robot mobile, le bras ne fonctionne pas. Ceci représente une sous-exploitation du bras. Cette situation peut être pénalisante surtout si le bras peut être utilisé ailleurs. Afin de donner plus d'utilité à chaque composant du manipulateur mobile, nous avons proposé un manipulateur mobile modulaire permettant l'exploitation de chaque partie séparément, comme il peut les exploiter en mode manipulateur mobile.

Mes travaux dans ce domaine concernent les propositions faites pour le montage du projet Corot, mes travaux sur la supervision distribuée dans le cadre de la thèse de Mr. MOUSSA et enfin, quelques travaux sur l'interopérabilité des robots dans un atelier de production flexible.

4.3.1 Robot mobile modulaire et collaboratif

La modularité des moyens de production veut dire que chaque outil de production est composé de plusieurs modules capables d'effectuer des opérations différentes. L'outil de production utilise les modules dont il a besoin (KOREN et al., 1999). Les manipulateurs mobiles sont composés de deux organes principaux qui sont le robot mobile et le bras manipulateur, ainsi que d'autres organes tels que la pince, le système de vision et le système de localisation. Dans le cadre du projet CoRoT,

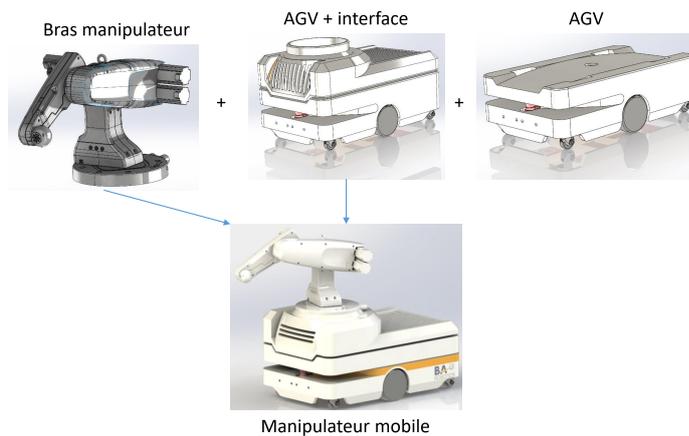


FIGURE 4.8 – Modèle 3D du bras manipulateur développé dans le cadre du projet CoRoT

nous visons à proposer des solutions permettant l'implémentation des manipulateurs mobiles modulaires dans les PME françaises et anglaises. Ce type d'innovation est devenu une nécessité pour les PME si elles veulent rester compétitives.

Depuis 2008, la productivité moyenne des PME a baissé de 2% en France et 12% au Royaume-Uni, notamment en raison de la concurrence importante sur les coûts des économies émergentes. De récents rapports sur les tendances de la fabrication en Europe montrent que les outils numériques et les systèmes de fabrication flexibles impliquant des robots autonomes, sont des technologies clés pour des usines reconfigurables et réactives, et pour accroître la productivité (jusqu'à 30% attendu). Le projet CoRoT développe ces solutions suivant les objectifs suivants :

- Développer des briques logicielles pour des bras robotisés et manipulateurs mobiles.
- Intégrer ces briques logicielles dans 2 plateformes mobiles (plateforme industrielle et plateforme ouverte bas coût).
- Développer une plateforme logicielle de supervision et de simulation de système de production flexible avec ou sans robotisation.
- Tester et valider ces technologies à travers des cas d'usages industriels.

Le manipulateur mobile proposé est représenté sur la Figure 4.8 où l'on peut observer le robot mobile (AGV) qui peut se transformer en manipulateur mobile en ajoutant une interface au bas, et un bras manipulateur.

L'architecture modulaire proposée et validée par l'ensemble des partenaires est présentée sur la Figure 4.9. Elle est composée de six sous-ensembles :

- L'AGV : il représente le robot mobile, avec son système de sécurité et son intelligence embarquée. Cette intelligence permet de contrôler les actions du robot, d'assurer la communication avec les autres éléments externes et d'exécuter d'une manière autonome l'évitement d'obstacles et de planification locale de trajectoires. Il contient aussi la batterie qui alimente l'ensemble.
- Le bras manipulateur : Ce sous-ensemble contient aussi les éléments nécessaires à son fonctionnement en autonomie, notamment son intelligence, qui assure la communication et le fonctionnement autonome de planification de trajectoire.

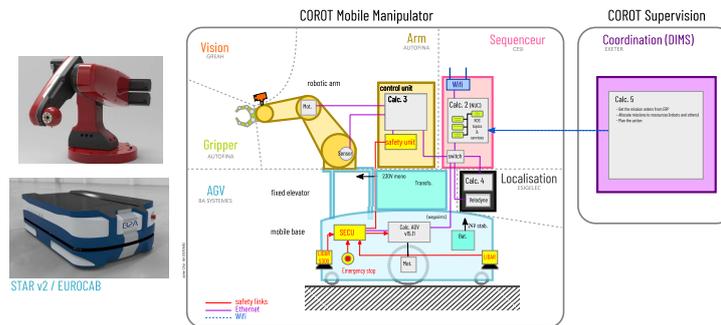


FIGURE 4.9 – Architecture modulaire de la solution proposée dans le projet CoRoT

- Le système de vision : il est utilisé par le bras manipulateur pour pouvoir faire des prises précises et éviter les chocs avec l'environnement. Ce système peut être collé au bas (comme sur la Figure 4.9) et placé dans l'environnement de travail du robot.
- Le Préhenseur (gripper) : c'est un élément contrôlé par le bras manipulateur, il doit être remplaçable rapidement pour permettre l'adaptation du système à différents types de préhension.
- système de localisation : Nous avons préféré utiliser ce système de localisation indépendant des autres éléments pour qu'il puisse alimenter le robot mobile et le bras manipulateur d'une information 3D précise. Vu le coût de ce module, il peut être mutualisé entre plusieurs ressources selon la précision demandée.
- Le séquenceur : il permet de synchroniser les actions du bras et du robot mobile et d'assurer la communication avec le système de supervision. Il joue le rôle du planificateur local quand le bas et l'AGV sont liés, et il fait le rôle d'une passerelle quand l'AGV est tout seul.

Sur la Figure 4.9 on peut aussi observer un bloc appelé "coordination", qui doit contenir le système de supervision de l'ensemble de l'atelier de production.

En plus de mon travail sur la coordination des actions des différents partenaires, je concentre mes travaux de recherche sur la supervision distribuée des ateliers de production où je veux montrer deux points :

4.3.2 Architecture de supervision

Il est important de trouver des architectures de supervision qui s'adaptent à la nouvelle génération d'ateliers de production contenant de plus en plus d'organes intelligents. Un superviseur est défini comme étant le responsable de la coordination et de l'optimisation des tâches des différents composants de l'atelier de production (VAN BRUSSEL et al., 1998). D'autres définitions ont été données plus tard pour détailler la surveillance, la téléopération, et la planification des différentes tâches (CLODIC, 2007). Des notions de communication entre les organes aussi ont été impliquées dans la définition d'un superviseur. Il existe deux extrémités pour établir une

supervision. D'une part, la supervision centralisée, qui a été utilisée jusqu'à maintenant par les entreprises mais qui arrive à ses limites avec la grande quantité de données échangées et la complexité des systèmes de production (TRENTESAUX, 2009). D'autre part, la supervision distribuée totale, qui consiste à donner une distribution totale de la décision, mais qui, souvent, perd en efficacité à cause des problèmes de perte d'objectif globale (problème de myopie) (MÜLLER et FISCHER, 2014). Entre les deux, on peut trouver différentes formes d'architecture qui combinent les caractéristiques des deux et essaient de trouver des solutions pour éviter leurs inconvénients. En effet, la centralisation permet d'avoir plus de contrôle sur le système, mais il devient rigide et perd en flexibilité. Alors que la distribution donne plus d'autonomie aux organes et donc plus de flexibilité, mais on perd le contrôle du système global. On appelle supervision distribuée toute autre architecture qui n'est pas centralisée. On trouve là aussi trois architectures :

- Hiérarchique : qui est une architecture à plusieurs niveaux tels que RAS (ELFES, 1997) développé par NASA et AARIA (BARBOSA, 2015). Les relations dans ce genre d'architecture sont verticales.
- Hétérarchique : c'est une architecture qui donne plus de liberté dans les interactions entre les composantes du système. Quelques méthodes ont été développées telles que PROSA (PUJO et OUNNAR, 2007) ou PROSIS (PUJO, BROISSIN et OUNNAR, 2009).
- Hybrides : utilisant les deux concepts en même temps (hiérarchique et hétérarchique) pour en tirer les avantages des deux. Plusieurs architectures ont été développées telles que ORCA (PACH, 2013), ADACOR (LEITÃO et RESTIVO, 2006) et DIMS (HE, 2011) que nous allons utiliser dans cette étude.

4.3.3 L'approche utilisée

Le Dynamically Integrated Manufacturing System (DIMS), est une architecture hybride développée par XMEC (Exeter Manufacturing Enterprise Center), un des partenaires du projet CoRoT. L'architecture DIMS propose une structure fractale pour ses agents. Tous les agents ont la même composition, donc le même code peut facilement être intégré dans les différents agents, facilitant ainsi son implémentation sur un système de production réel. Cette architecture propose également un algorithme d'allocation des ressources, basé sur un système d'enchères et optimisé par un algorithme génétique (GA). Les ressources enchérissent sur les opérations présentées en proposant à chacun le coût (Energie dans notre cas) auquel ils peuvent réaliser l'opération (ANOSIKE, 2005). Ce coût est ensuite comparé à un prix virtuel défini par l'AG, ce qui permet de voir si le robot, en effectuant la tâche, peut générer un profit ou non. Tous les robots générant des profits seront donc candidats à des opérations, et le gagnant de l'opération parmi ces candidats sera le robot qui minimise le temps d'exécution de l'opération. L'AG sert ensuite à minimiser le coût total des opérations.

Le codage du chromosome

Le chromosome utilisé pour représenter la solution optimale générée par l'AG, est représenté par des prix pour chaque opération à effectuer et un profit minimal pour chaque ressource du système. Pour un atelier pouvant exécuter N opérations et disposant de J ressources : le chromosome est codé comme suit :

$$ch = \{P_1, P_2, \dots, P_n, \dots, P_N, F_{min1}, \dots, F_{minj}, \dots, F_{minJ}\}$$

P_n : Le prix virtuel pour chaque opération, il représente une sorte de priorité entre les opérations.

F_{minj} : Le profit virtuel minimal pour les ressources disponibles pour maximiser l'utilité des ressources

La population initiale est générée de façon aléatoire, où les prix et les profits virtuels minimaux devraient se situer dans la fourchette $(0, N)$; N pourrait être une valeur supérieure au coût total de toute opération traitée par toute ressource admissible. L'avantage de ce type de codage de solution est que le processus d'optimisation ne génère pas directement un ordonnancement pour les différentes ressources, mais plutôt un système de règles spécifiques pour chaque ressource et chaque opération. Ainsi, il peut optimiser le déroulement de l'allocation des ressources et les opérations.

Processus d'enchères

Le système soumet une opération aux ressources disponibles. Chaque ressource calcule un profit en se basant sur le prix donné à l'opération soumise. Aucune ressource ne peut enchérir si elle n'a pas un profit supérieur à son profit minimal. Quand plusieurs ressources enchérissent, on prend celle qui termine en moins de temps. Chaque chromosome est soumis à des contraintes de temps de livraison de la tâche, et à un coût maximal qu'il ne faut pas dépasser. Tous les chromosomes qui ne satisfont pas ces contraintes ne sont pas considérés. Ce processus de l'AG génère un chromosome représentant une solution optimisée au coût de production le plus bas et qui satisfait aux délais de production. Le plan d'allocation final sera celui trouvé lors de l'appel d'offres avec les paramètres chromosomiques optimisés.

Application sur un cas réel

Deux bras robotisés (UR5 et UR10) sont utilisés pour l'exécution d'une tâche composée de huit opérations de transport de produits entre différentes machines et stocks.

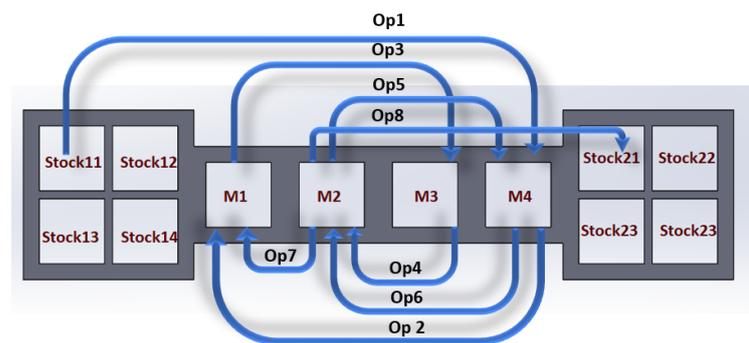


FIGURE 4.10 – Séquences des opérations du cas d'usage

La figure 4.10, représente la structure du cas d'usage considéré, qui est composé de quatre machines et de deux zones de stockage. Chacune d'elles comprenant quatre positions (stock11, stock22, ...). Seuls les paramètres (temps, énergie) qui concernent les opérations seront pris en compte. Notez que l'ordre des opérations doit être respecté (contrainte de précédence), donc l'opération op_2 , par exemple, ne

peut pas être traitée avant l'opération Op_1 . Elles ne peuvent pas être exécutées simultanément parce que c'est un seul produit qui est transporté. Chaque opération prend un temps de transport différent selon le robot qui l'opère. Le Tableau 4.6 donne les temps de transport de chaque opération.

TABLE 4.6 – Transportation time in second for operation per resource

Resources	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Op6	Op7	Op8
UR10	21.19	19.15	18.97	18.00	18.58	18.59	18.35	20.57
UR5	23.00	19.36	18.57	17.78	18.77	18.76	17.56	19.82

L'énergie consommée par opération pour chaque Robot est calculée à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$E_n^R = \int_0^{t_{op_n}^R} P dt \quad (4.3)$$

Où :

P : la puissance moyenne (avec $P = 41watt$ pour l'UR5 et $P = 45watt$ pour l'UR10)

$t_{op_n}^R$: le temps d'exécution de l'opération op_n par le robot R

E_n^R : l'énergie consommée par le robot R pour exécuter l'opération op_n

l'ensemble des opérations doivent être exécutées dans une intervalle inférieure à 180s ($Duedate = 180s$).

Une fois le plan d'allocation final trouvé, le superviseur doit établir une communication avec les robots pour l'envoi et la réception des données, par le biais d'une programmation ROS multi-machine. Nous avons utilisé les protocoles de communication de ROS (topics et services) pour assurer la communication entre les robots et le superviseur. Les données à envoyer sont le numéro de l'opération, et le numéro de la ressource (0 pour l'UR10 et 1 pour l'UR5) ayant remporté l'enchère sur cette opération. Ces données sont transmises par le superviseur au robot qui a déjà gagné l'enchère. Une fois que le robot a terminé cette opération, il doit envoyer un feedback au superviseur pour qu'il puisse envoyer la prochaine opération au robot gagnant, et ainsi de suite. Nous avons utilisé une communication type Topic pour envoyer les informations du superviseur vers les robots. Ces derniers s'inscrivent à ce Topic pour recevoir les informations provenant du superviseur. En ce qui concerne l'envoi d'informations par les robots, nous avons utilisé un protocole de communication de type service, mieux adapté car que le robot envoie une seule réponse quand sa tâche est terminée. Le superviseur demande à connaître l'état de l'opération en cours, et dès qu'il reçoit une réponse indiquant que l'opération est terminée, il passe à l'opération suivante.

Résultats et analyses

Le tableau 4.7 montre le plan d'allocation prévisionnel obtenu par l'exécution de l'AG, connaissant la capacité et la consommation énergétique de chaque robot. Dans des conditions idéales en atelier, cette solution garantit la satisfaction des besoins de production. Mais comme dans la vraie vie, les perturbations surviennent. Le système ne peut pas les surmonter et peut arrêter l'exécution en raison d'une défaillance d'un robot ou d'une variation de la demande par exemple, puisque l'affectation ne prend en compte que les performances des ressources dans leur état initial. Une autre limite de cette configuration concerne le temps de calcul nécessaire pour générer un nouveau plan d'allocation.

TABLE 4.7 – Résultat d'allocation d'opération aux robots

Plan d'allocation optimisé	
Op1	UR10
Op2	UR5
Op3	UR5
Op4	UR10
Op5	UR5
Op5	UR10
Op7	UR5
Op8	UR5
Total energy (joule)	6457.36
Total time (second)	151.86

Plan d'allocation dynamique

Afin de surmonter les limites mentionnées précédemment, nous proposons une solution qui se base sur l'allocation des opérations à la dernière minute. L'algorithme d'optimisation génère toujours un chromosome de prix et de profit minimaux que nous allons garder tout au long de l'exécution de la tâche. Par contre, le processus d'enchère va se faire en ligne. En effet, le superviseur reçoit pour chaque enchère un ensemble de ressources qui veulent exécuter l'opération. L'allocation optimale a été faite par rapport à la ressource qui exécute cette opération le plus rapidement possible. Sauf que la perturbation peut faire que cette ressource n'est plus la plus performante. Dans ce cas, si l'on prend la ressource qui exécute le plus rapidement possible, on ne sera pas loin de la performance du plan prévisionnel.

L'idée, d'une manière générale, est que l'on prenne les actions qui n'éloignent pas de la solution initiale. Il est possible que cette solution ne respecte pas les contraintes sur le temps global de la tâche, mais on la prend avec pénalité.

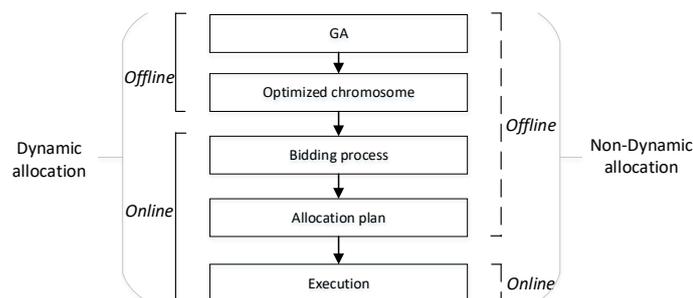


FIGURE 4.11 – processus d'allocation dynamique et d'allocation prévisionnel

La Fig 4.11, montre le processus qui donne le plan d'allocation et l'exécution de Le résultat de cette enchère est le plan d'allocation constitué par les robots gagnants. Dans le processus non-dynamique, toutes les étapes, sauf l'exécution, se font hors ligne, ce qui signifie que l'allocation ne prend pas en compte l'état actuel de l'atelier. Cependant, pour l'allocation dynamique, il n'y a que le processus GA qui génère le

chromosome optimisé qui se fait hors ligne. Le processus d'enchère, le plan d'allocation et l'exécution sont tous exécutés en ligne. Avec cette configuration, la flexibilité de l'atelier et le contrôle exercé par les ressources sont améliorés et les décisions prises par le superviseur sont restés à un niveau haut. Les changements sur l'implémentation sous ROS est dans le fait que le robot doit communiquer ses performances à chaque enchère. Cela va permettre au superviseur de faire une allocation dynamique.

Implémentation du plan dynamique

Afin de comparer les deux solutions, nous avons introduit une perturbation sur l'UR5 qui va changer au cours de l'exécution les temps des opérations.

TABLE 4.8 – Résultats de l'allocation dynamique

Operations	Optimized plan	Dynamic plan
Op1	UR10	UR10
Op2	UR5	UR10
Op3	UR5	UR10
Op4	UR10	UR10
Op5	UR5	UR10
Op6	UR10	UR10
Op7	UR5	UR5
Op8	UR5	UR5
Total energy (joule)	6457.36	6684
Total time (second)	151.86	151,86

Avec cette nouvelle configuration d'enchères, le système essaie de garder ou de suivre la solution optimale. Ainsi, dans la zone de perturbation de l'UR5, le processus d'appel d'offres réaffecte l'opération initialement affectée à l'UR5. Le figure 4.12 montre la consommation énergétique dans les deux cas.

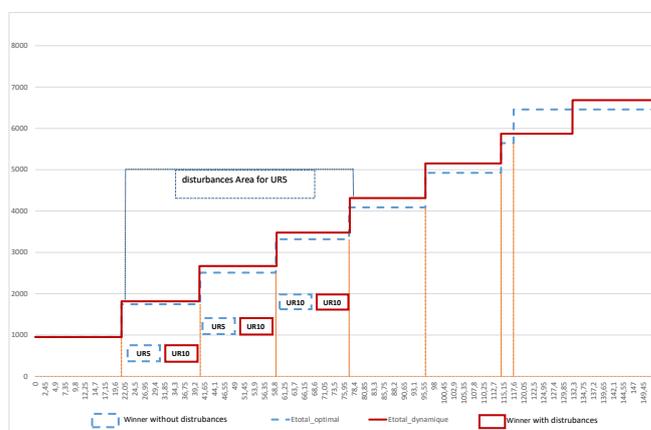


FIGURE 4.12 – Énergie totale consommée

Dans la figure 4.12, nous voyons clairement que les opérations (*op2* et *op3*) affectées à l'UR5 dans le plan prévisionnel, sont réattribuées à l'UR10 car l'UR5 a subi une perte de puissance (temps plus élevé pour exécuter les tâches). Ainsi, le système global peut maintenir l'énergie totale près de l'énergie optimale. Cette configuration dynamique peut donc nous permettre de réaffecter une opération initialement prévue à une ressource *Ra*, à une autre ressource *Rb*, si la ressource *Ra* a un échec ou un retard dans la production. Dans cette situation, la seule communication qui existe entre les deux robots passe par le superviseur. L'établissement d'une communication directe entre les robots avec des systèmes d'exploitation différents n'est pas possible avec la version actuel de ROS. Nous avons introduits d'autres protocoles de communication pour établir des communications horizontales dans le système. Je présente quelques développements que j'ai encadré lors d'un stage de Master (Mr Chelli Kalb eddine), dans le cadre du projet CoRoT pour alimenter les autres développements sur le système de supervision et la définition du séquenceur embarqué dans le manipulateur mobile.

4.3.4 Interopérabilité des Robots

L'utilisation de plusieurs outils de production intelligents tels que les robots mobiles, manipulateurs ou autre, demandent une interopérabilité et une intercommunication efficace entre les différentes organes de l'atelier de fabrication afin d'assurer un haut niveau de flexibilité (ajouter des opérations, des machines, mettre à jour des logiciels, ...) (SATURNO et al., 2017). L'interopérabilité représente une caractéristique d'un système de production dans lequel les composants sont capables d'échanger des informations (LIAO et al., 2017). Elle représente une conception clé pour les systèmes de fabrication intelligents (ANDERSEN et al., 2017). Les robots accumulent des informations sur leur fonctionnement et doivent les communiquer pour permettre aux autres organes de prendre des décisions plus intelligentes. La diversité des systèmes d'exploitation, des formats de données, et des fabricants, font de cette communication une problématique difficile à résoudre, et rendant les systèmes de production peu interopérables. De nouvelles solutions facilitant la standardisation des interfaces de machines et autres organes de l'atelier tels que les robots et les capteurs, doivent être développées afin d'apporter une forte intégration et permettre l'interopérabilité totale (information et fonction) (VIJAYARAGHAVAN et al., 2008).

Parmi les standards développés dans ce sens, MTConnect est l'un des de ceux dont l'objectif est de fournir un moyen commun de communication entre les différents appareils sans nécessiter une infrastructure matérielle ou logicielle spécifique pour les relier. Il représente un standard de communication ouvert pour l'interconnexion, qui permet aux périphériques, équipements et systèmes, de communiquer des données dans un format compréhensible qui peut être lu par n'importe quel autre périphérique (VIJAYARAGHAVAN et al., 2008). Ce standard est caractérisé par son aspect "read only". Certes il ne permet pas d'envoyer des commandes aux organes de l'usine, mais il assure une grande sécurité, et permet de mettre en place des organisations basées sur l'intelligence embarquée des organes de productions d'une manière générale, et des robots dans notre cas précis (ATLURU et DESHPANDE, 2009).

Composants de MTconnect

MTConnect est un standard d'échange de données et d'informations basé sur un dictionnaire de données (data dictionary) des termes décrivant les informations

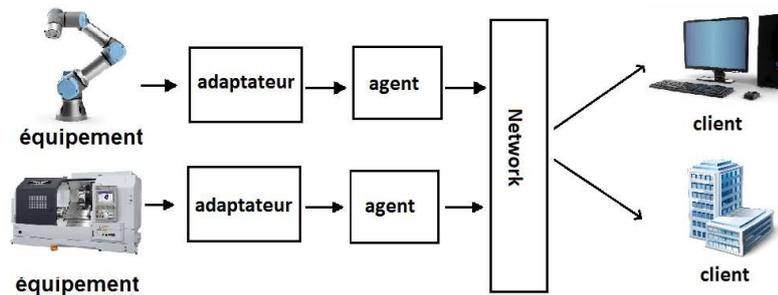


FIGURE 4.13 – Composants et architecture générale du standard MT-Connect

associées aux opérations de fabrication. Le standard définit également une série de modèles de données sémantiques – (semantic data models) qui fournit une représentation claire et sans ambiguïté des données générées par une machine de production. Le standard MTConnect permet aux applications logicielles et équipements de fabrication d’interagir dans un environnement Plug-and-play, pour réduire le coût de l’intégration des systèmes et logiciels de fabrication. MTConnect est basé sur les technologies réseau, internet, standard ethernet, protocole http et format xml (extensible mark-up language - langage sous-jacent de la plupart des sites web) (SOBEL, 2015). MTConnect est constitué de cinq composants fondamentaux (JASPERNEITE, NEUMANN et PETHIG, 2015) qui sont : le Device, Adapter, l’Agent, le Network et enfin le Client qui sont représentés sur la Figure 4.13 .

L’agent MTConnect reçoit des demandes d’informations provenant d’une ou de plusieurs applications logicielles clientes, puis répond à ces demandes en publiant un document de réponse contenant les informations demandées. Les types d’informations qu’un agent MTConnect peut envoyer sont : la description des données (MTConnectDevices), les informations elles-mêmes (MTConnectStreams), les atouts (MTConnectAssets) et les erreurs (MTConnectError)

Architecture du système

Le système sur lequel on souhaite implémenter et tester MTConnect est constitué de deux universal robots (UR5 et UR10), qui effectueront une tâche collaborative sur le transport d’un produit. Ils sont contrôlés à partir de deux ordinateurs équipés chacun de ROS avec un package (ur_driver) permettant de contrôler le robot associé. Une connexion Ethernet est utilisée pour connecter chaque ordinateur à internet ce qui permettra la transmission de donnée via MTConnect.

Par ailleurs, nous avons installé et adapté le package ros-bridge pour notre application. Ce package fournit un adaptateur afin de créer un noeud subscriber pour traduire les informations du robot UR vers un agent MTConnect, sur un format SHDR (Simple Hierarchical Data Representation). L’agent MTConnect fait la collection des données qu’il envoie quand il reçoit une demande par un client. Chaque équipement (ROBOT) doit être décrit dans un fichier XML par le standard MTConnect. Chaque client envoie une demande (Probe, Current, Sample, Asset) afin d’obtenir un type d’information donnée.

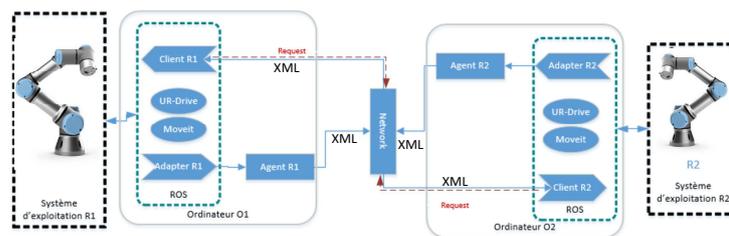


FIGURE 4.14 – Interopérabilité entre deux robots

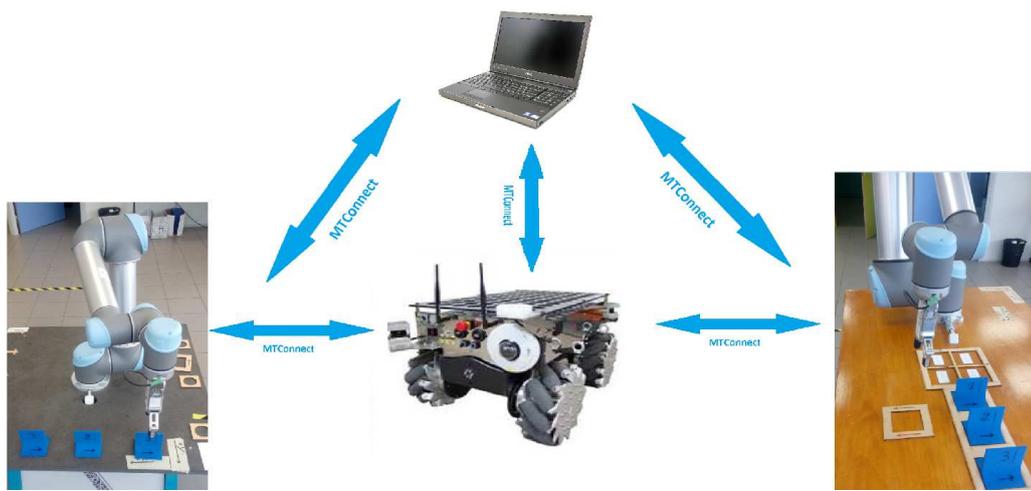


FIGURE 4.15 – Les communication pour le cas d'usage avec deux bras et un robot mobile

Implémentation sur le système réel

Nous avons fait les programmes ROS sur chaque robot qui écoute son environnement (dans ce cas on observe uniquement les positions de l'autre robot). Chaque agent MTconnect renvoie les informations demandées. Chaque robot dispose d'une intelligence lui permettant de définir ses actions en fonction de son environnement. Chacun observe la position de l'autre robot et l'état de sa pince. L'application consiste à ce qu'un UR10 ramasse une boîte sur la table et se déplace jusqu'au point de rencontre avec l'UR5, puis il envoie une demande Current à l'agent MTConnect de UR5 pour voir son état. De l'autre côté, le robot UR5 se déplace aussi jusqu'au point de rencontre où il fait aussi une demande Current à l'agent MTConnect de UR10 pour voir si ce dernier est dans la bonne position. Si cette condition est vérifiée, l'UR5 s'avance pour prendre la boîte et UR10 peut savoir que l'UR5 est arrivé et va prendre la boîte. Par cette méthode, le changement, les états des pinces et les positions des deux robots, ils peuvent échanger la boîte de UR10 vers UR5. UR5 va ensuite mettre la boîte sur sa table. l'UR10 continue le cycle et va chercher une autre boîte sur sa table.

La même stratégie a été utilisée pour accomplir une tâche de transport composée de deux bras UR et un robot mobile Robotnik.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, j'ai exposé mes travaux en lien avec le transport interne au sein des ateliers flexibles. J'ai travaillé principalement sur des problèmes d'ordonnancement dynamiques et d'allocation de tâches. La réflexion autour de la pénibilité de cette tâche et l'utilisation des robots pour l'assurer a conduit au montage du projet CoRoT. Ce projet est au cœur des développements du démonstrateur du futur du laboratoire LINEACT. J'ai exposé ainsi quelques travaux qui entrent dans le cadre de ce projet. Ces travaux mettent en avant l'aspect pratique qui fait révéler de nouvelles problématiques liées aux types et quantités de données utilisées ainsi qu'au matériel déployé. Les travaux sur ce sujet sont à leur début, au sein du laboratoire, et je compte continuer à développer des solutions pour augmenter la flexibilité et la reconfigurabilité des ateliers de production que je vais détailler un peu plus dans le chapitre sur mon projet de recherche. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'encadrement de deux thèses (une soutenue et une en cours) et trois stagiaires en Master recherche. Cela a permis la publication d'un papier dans une revue internationale et l'acceptation d'un autre, ainsi que la publication dans cinq conférences internationales et trois conférences nationales.

5

Collecte, traitement et exploitation des données industrielles

Précédée par trois révolutions majeures et basée sur le progrès technologique rapide, l'industrie 4.0 est en train de voir le jour pour résoudre le phénomène de complexité croissante (principalement la complexité des données (ZANDER et MÄHÖNEN, 2013)). Les gouvernements et les entreprises manifestent un grand intérêt pour la quatrième révolution industrielle. Son émergence renforce la position concurrentielle des pays développés, en intégrant le système cyberphysique (CPS) dans la chaîne de production, la logistique et les services des pratiques industrielles (LEE, BAGHERI et KAO, 2015).

Par conséquent, les systèmes d'information industriels intègrent les technologies numériques émergentes, comme le paradigme de l'Internet des objets (IoT), considéré comme l'un des impacts potentiels de la technologie (INTELLIGENCE, 2008) et un facteur important pour le progrès des processus industriels (GAZIS et al., 2015).

Cette intégration est un facteur majeur de la complexité croissante en terme de méthodologies adoptées, de données générées et d'opérations exécutées.

En outre, la demande croissante de l'automatisation dans tous les domaines engendre une augmentation du nombre des dispositifs IoT. Cela augmentera le nombre de machines connectées et de capteurs ce qui se traduit par une quantité énorme de données échangées. Par exemple, durant l'année 2012, 20 ménages ont généré plus de trafic Internet que toute la planète en 2008 (CHIANG et ZHANG, 2016). Cisco prévoit que 50 milliards d'appareils seront connectés à Internet d'ici 2020 (MARKAKIS et al., 2017). Ce nombre devrait atteindre 500 milliards d'ici 2025 (EVANS, 2011). Par conséquent, un nouveau phénomène problématique pour les centres de données appelé "Data Tsunami", peut diminuer la qualité de service (QoS) et faire apparaître des problèmes de stockage (ZANDER et MÄHÖNEN, 2013). Naturellement, elle affectera la performance industrielle si les solutions adéquates ne sont pas conçues et mises en œuvre.

La collecte et le traitement des données dans les ateliers de production rencontre plusieurs challenges concernant la consommation énergétique croissante et la qualité des traitements effectués. Tout cela est bien sûr relié à des coûts de fonctionnement de plus en plus élevés. La première partie de mes travaux dans le domaine d'amélioration et d'exploitation des flux d'information dans les ateliers de production concerne le placement de capteurs dans les bâtiments. J'ai travaillé avec le Dr. Mohammed-Amin BENATIA sur l'optimisation multi-objective des capteurs dans un bâtiment (usine). Influencés par l'efficacité des systèmes distribués, nous avons lancé une thèse sur le traitement distribué de données dans l'industrie 4.0. Mlle. Imen BOUZARKOUNA travaille sur l'implémentation du Fog computing dans l'industrie

4.0. J'ai aussi participé dans le montage d'un projet régional qui s'intéresse à l'exploitation de la localisation des opérateurs dans l'atelier de production afin de prédire des dérives potentielles. Les informations issues des capteurs installés dans le bâtiment seront utilisées pour l'obtention de l'information de localisation. Cette information peut être utilisée pour la détection de dérive possible et la planification d'actions préventives ou correctives. Dans ce chapitre je vais détailler les contributions suivantes

- Optimisation de placements de capteurs pour dans le bâtiment/ l'usine intelligent
- Amélioration des traitements des données dans l'atelier de production par le fog computing
- Plan de production dynamique basé sur la localisation dynamique des personnes et des outils

5.1 Optimisation de placement de capteurs dans le bâtiment ou l'atelier

5.1.1 Introduction

Ce travail a été réalisé dans la thèse de Dr. Mohammed Amin BENATIA qui s'intéresse à la problématique de déploiement et de planification, à priori, des réseaux de capteurs sans-fil (RCSF) dans un environnement obstrué (indoor). Avec l'avènement des nouvelles technologies et la baisse drastique des coûts de production de ce type d'équipement (de composantes), de nouvelles applications innovantes ont vu le jour telles que : le véhicule autonome, le smart-grid ou le smart-building (bâtiment intelligent).

Les bâtiments "intelligents" (pour l'habitat ou pour le travail) sont la nouvelle révolution du bâtiment qui fait référence à l'application de la technologie, à la planification des tâches, à la gestion et à la prise de décision dans les bâtiments (CHING et FERREIRA, 2015). Ceci conduit à l'optimisation des performances énergétiques et l'augmentation de la sensation de confort de l'occupant. Afin d'assurer cette tâche de supervision, les bâtiments doivent intégrer une infrastructure de détection/captage pour obtenir des données environnementales (p. ex. humidité, température, présence, etc.). Les réseaux de capteurs sans fils (RCSF) ont reçu beaucoup d'attention au cours des dernières années, alors que nous observons de grands progrès dans leur conception et leurs algorithmes de communication. Leur petite taille et leur capacité de mesurer, de rapporter et de transmettre des informations sur l'aspect physique de leur environnement les ont rendu largement utilisés dans les applications de surveillance militaires et civiles ou industriels et, par conséquent, ils ont été largement adoptés dans les applications de bâtiment intelligent (ZAFER, SENOUCI et AISSANI, 2018). Cependant, le déploiement de ces capteurs nécessite une intervention humaine et des matériaux de mesure coûteux. Dans certains domaines, comme dans les situations militaires, le déploiement doit être assuré avec le moins de capteurs possibles. Ce dernier vise en général à atteindre de nombreux objectifs en même temps, comme par exemple, maximiser la couverture totale du réseau, et minimiser le nombre de capteurs. Maximiser la couverture conduit à déployer de plus en plus de capteurs, ce qui dégrade la valeur du deuxième objectif (coût). Inversement, l'utilisation de peu de capteurs donne généralement une faible couverture totale. Dans ce cas, les objectifs sont contradictoires et l'utilisateur doit déterminer le compromis à faire entre ces deux buts. Partant de ce contexte, Ce travail propose une stratégie

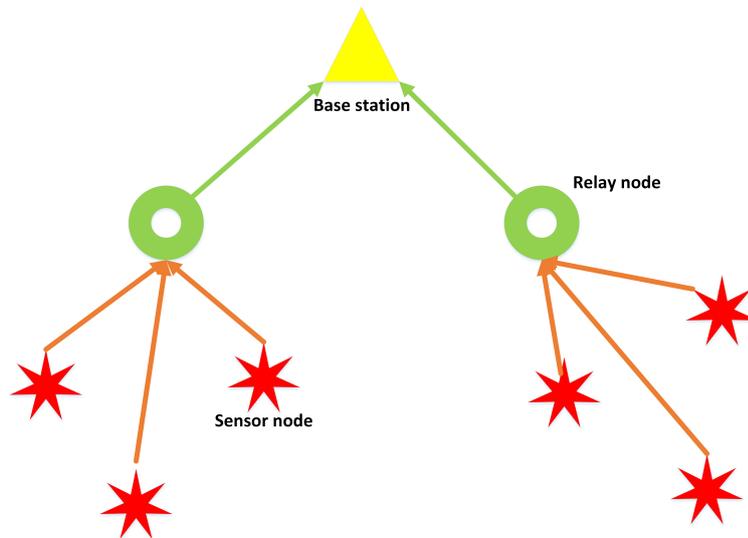


FIGURE 5.1 – Architecture générique d'un RCSF

globale de déploiement des SRCF basée sur des algorithmes d'optimisation évolutifs multi-objectifs. La méthode proposée répond aux contraintes du déploiement et de la planification d'un SRCF, y compris les questions de coût, de connectivité, de couverture et de durée de vie dans les bâtiments. En particulier, un algorithme évolutionnaire multiobjectif (MOEA) est utilisé pour générer l'ensemble des solutions optimisés selon le sens de Pareto (i.e. : topologie du réseau). L'objectif principal de ce travail est de proposer un outil capable d'aider les concepteurs de RCSF lors de la phase de déploiement. Pour pouvoir développer un tel outil, une bonne modélisation du système est nécessaire. Aussi, une phase d'optimisation multi-objectifs doit être considérée. À l'issue de cette étape, l'utilisateur peut choisir l'une des solutions proposées. L'un des inconvénients de l'optimisation multi-objectifs est le grand nombre de solutions proposées. Pour remédier à ce problème nous avons fait une proposition permettant d'aider l'utilisateur à traduire ses désirs en un choix parmi ceux proposés par la phase de l'optimisation.

L'approche proposée consiste à combiner des notions de communication sans-fil, de réseau, de modèles fonctionnels et d'optimisation multi-objectifs afin d'avoir une topologie optimale du réseau. Malgré que ce travail a été réalisé dans le cadre du bâtiment intelligent, il est applicable sans modification à l'atelier de production, où on cherche à contrôler des paramètres sur l'environnement.

5.1.2 Modèle proposé

Dans notre modèle, nous considérons trois types de nœuds de réseau : les nœuds capteurs, les nœuds de relais et la station de base, comme le montre la figure 5.1. Les nœuds capteurs sont responsables de la collecte des données environnementales et de la transmission des rapports au nœud de relais le plus proche. Par la suite, les nœuds relais sont chargés de recueillir les données générées par plusieurs capteurs voisins et de les envoyer sous forme de rapports agrégés à la station de base. Les données recueillies sont ensuite traitées afin d'en tirer des connaissances sur l'état environnemental du bâtiment dans le but d'améliorer le processus décisionnel. L'aspect le plus important d'un RCSF est la communication, ou communément appelée "connectivité réseau".

Connectivité du réseau

La contrainte de communication est généralement modélisée par une équation de propagation des ondes. Nous considérons dans notre modèle un "log-normal shadowing model", où le RSSI (Received Signal Strength Indicator) perçu en un point spécifique, séparé par une distance d de l'émetteur, suit une distribution "log-normale", avec une valeur moyenne égale à la puissance détectée en ce point. Ce modèle est calculé suivant l'équation :

$$P_{rec}(d) = P_{tr} - PL(d_0) - 10 \times n \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (5.1)$$

où P_{rec} représente l'intensité du signal reçu, P_{tr} est la puissance d'émission, d_0 est la distance de référence (généralement 1 mètre), $PL(d_0)$ est l'affaiblissement sur le trajet à la distance de référence, n est l'exposant d'affaiblissement sur le trajet qui dépend de l'environnement et finalement, χ_σ est une variable aléatoire gaussienne distribuée (exprimée en dB), à moyenne nulle, à variance σ (aussi en dB). Les paramètres χ_σ et σ modélisent l'effet de shadowing.

Nous rajoutons à l'équation 5.1 précédente l'affaiblissement sur le trajet impliqué par les environnements intérieurs tels que : murs, portes, fenêtres, etc. Le modèle d'affaiblissement sur le trajet de l'onde considéré est ensuite donné par l'équation 5.2 et représenté par la figure 5.2 :

$$P_{rec}(d) = P_{tr} - PL(d_0) - 10 \times n \times \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma - L_{obs} \quad (5.2)$$

Où L_{obs} (en dB), exprime les pertes dû au matériaux de constructions et aux obstacles présents dans le bâtiment.

Chaque capteur a une valeur de seuil de réception qui décrit le RSS (intensité du signal reçu) minimum nécessaire pour établir une bonne communication. Ainsi, la probabilité qu'un RSS soit supérieur au seuil mentionné est donnée par l'équation suivante :

$$\rho(s, d = 1) = P_r[P_r(d) \geq \lambda] = Q\left[\frac{\lambda - P_r(d)}{\sigma}\right] \quad (5.3)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (5.4)$$

Pour une puissance d'émission (P_{tr}) et des valeurs seuils de réception (λ), on peut alors calculer la probabilité de recevoir un signal au-dessus de la valeur seuil de réception, à une distance donnée, en utilisant ces équations, qui deviennent des contraintes de connectivité entre les nœuds.

Afin de transmettre les informations collectées sur l'environnement physique, les capteurs doivent être connectés à au moins un nœud relais. Ainsi, nous incluons une contrainte de communication qui est donnée comme suit :

$$\sum_{i=1}^v \alpha_i^{SN} \times \alpha_j^{RN} \geq 1, \forall i \in V \ \& \ j \in v(i) \quad (5.5)$$

Où $v(i)$ représente les nœuds du voisinage du nœud capteur i . C'est l'ensemble d'indices qui regroupe tous les nœuds relais connectés au capteur i (i.e. voisinage du nœud i). Un indice j est un membre de $v(i)$ ($j \in v(i)$), si et seulement si la position (cellule) j satisfait la contrainte expliquée par l'équation 5.3 ($\rho(s, d = 1)$). D'autre

part, les nœuds relais doivent transmettre les informations collectées à une station de base qui agrège toutes les données générées par le réseau et qui est responsable de la fusion des données et de la génération des rapports. Cette contrainte est donnée par l'équation suivante :

$$\alpha_j^{RN} \times \left(\sum_{i \in N(BS), M(N(BS))} \alpha_i^{RN} \right) \geq 1, \forall j \notin N(BS) \quad (5.6)$$

où $j \in M(v(BS))$ signifie qu'un nœud j peut transmettre ses données à une station de base directement ou indirectement (saut simple ou multiple). Dans ce contexte et au meilleur de notre connaissance, ainsi on couvre tous les types existants de transmission de données dans les RCSFs.

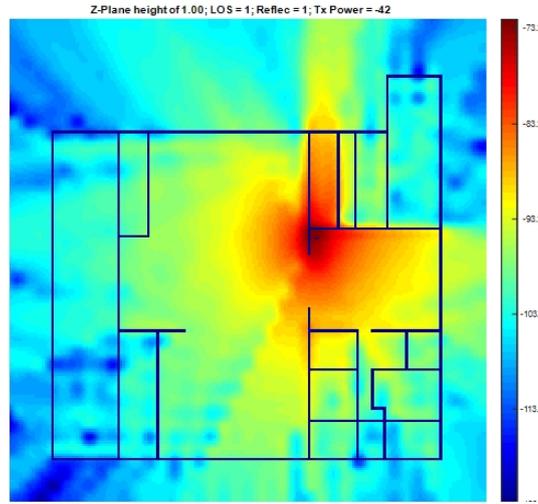


FIGURE 5.2 – Résultat obtenu par le simulateur de propagation d'ondes (avec un seul nœud déployé)

Couverture des phénomènes

Comme le montre la figure 5.3, chaque nœud capteur peut couvrir une région spécifique de la zone de déploiement. Selon ce modèle, chaque capteur peut détecter des événements se produisant à une distance inférieure à sa portée de détection. Afin d'inclure les contraintes dû aux obstacles, nous supposons qu'un événement se produisant dans une région séparée par un obstacle (mur, porte, etc.) d'un capteur n'est jamais détecté. Selon cette définition, nous adoptons la contrainte de couverture suivante :

$$\beta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if node } i \text{ detects the phenomenon producing in cell } j \\ 0 & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$Cov = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^v \alpha_i^{SN} \beta_{ij} \geq Cov_{Tsh}, \forall j \in EC \quad (5.8)$$

Où N désigne le nombre total de cellule obtenues après discrétisation de la zone d'intérêt (bâtiment).

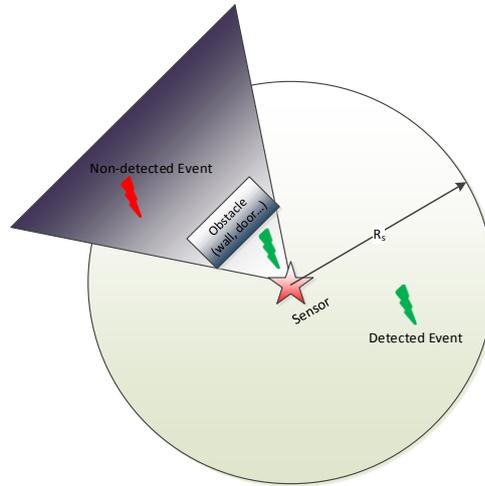


FIGURE 5.3 – Modèle de couverture des capteurs considéré dans notre étude

Durée de vie

L'un des principaux défis des réseaux RCSF est leur durée de vie, c'est-à-dire le temps qu'il reste avant que le réseau ne cesse de remplir ses fonctions. Cela peut se produire lorsqu'un nœud spécifique consomme toute son énergie (par exemple, une batterie) ou lorsqu'un ensemble de nœuds consomment la totalité de leurs batteries. Pour cela, nous incluons dans notre modèle d'optimisation une contrainte de consommation d'énergie donnée par l'équation suivante :

$$E_{tot} = \sum_{i=1}^v \alpha_i^{RN} \left(\sum_{j \in N(i)} E_{rec} f_{ij} + \sum_{j \in N(i)} E_{tr} f_{ij} \right) + \sum_{i=1}^v \alpha_i^{SN} \left(\sum_{j \in N(i)} E_{tr} f_{ij} \right) \quad (5.9)$$

Où f_{ij} représente la densité du trafic du nœud i au nœud j mesuré en bits par seconde (bps), $E_{tr,rec}$ représente la consommation d'énergie lors de la transmission d'un paquet de données de longueur L (de réception). Afin de simplifier le calcul de la consommation de ces énergies (ex. : émission et réception) on considère une longueur de paquet constante pour tous les nœuds du réseau. Ainsi, les énergies E_{rec} et E_{tr} sont données comme suit :

$$E_{tr} = L(\epsilon_1 + \epsilon_2 d^n) \quad (5.10)$$

$$E_{rec} = L\beta \quad (5.11)$$

Où la variable L représente la longueur du paquet (constante) et ϵ_1 ; ϵ_2 et sont spécifiques au matériel des émetteurs-récepteurs utilisés et représentent la consommation d'énergie de l'électronique (antenne, traitement, etc.), d est la distance séparant l'émetteur et le récepteur. Enfin, n est l'exposant d'affaiblissement sur le trajet qui dépend principalement de l'environnement de déploiement (espace libre ou intérieur). Cette variable est généralement comprise entre 1 et 3.

Coût

Nous considérons deux phases de déploiement : la phase capteur et la phase nœud relais. Afin de simplifier la complexité du calcul, nous supposons que les emplacements des stations de base sont connus a priori. Ainsi, le réseau peut être représenté par un graphe $G = (V; E)$ avec, $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ représentant l'ensemble des nœuds du réseau à déployer (capteurs et relais) et $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ représentant l'ensemble des liens qui existent entre ces différents nœuds (ex : un lien existe si, et seulement si l'équation 5.3 est satisfaite). Le coût de déploiement du réseau est donc donné par les équations suivantes :

$$C_{SN} = \sum_{i=1}^v \alpha_i^{SN} \times c_i^{SN} \quad (5.12)$$

$$C_{RN} = \sum_{i=1}^v \alpha_i^{RN} \times c_i^{RN} \quad (5.13)$$

$$C_{tot} = C_{SN} + C_{RN} \quad (5.14)$$

où C_{SN} ; C_{RN} représentent le nombre total de capteurs et de relais déployés. α_i^{RN} et α_i^{SN} sont des variables binaires qui sont initialisés à 1 si un capteur (ou un relais) est déployé dans la cellule i .

A partir des sous-sections précédentes, le problème de déploiement RCSF peut être formulé comme un problème d'optimisation multi-objectifs comme suit :

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } Cost_{tot} = C_{SN} + C_{RN} \\ & \text{Maximize } Cov \\ & \text{Subject to } (5.3, 5.5, 5.6, 5.9) \end{aligned}$$

Ce problème est prouvé pour être NP-difficile comme indiqué dans les travaux. Pour résoudre ce problème d'optimisation multi-objectifs, nous utilisons un algorithme génétique multi-objectifs (MO) afin d'approcher la solution optimale, c'est-à-dire une méthode évolutive bien connue qui permet d'approximer la solution optimale en donnant un compromis entre tous les objectifs d'un ensemble d'objectifs.

5.1.3 Architecture proposée

La phase de conception d'un RCSF consiste à déterminer la topologie du réseau (nombre de nœuds nécessaires et leurs positions respectives), en respectant des valeurs optimales des différents objectifs précédemment cités. Cette tâche peut être exprimée par un problème d'optimisation multi-objectifs qui a été prouvé comme étant NP-Difficile (HE et al., 2015). Afin de résoudre un tel problème nous allons utiliser un algorithme génétique multi-objectives NSGS-II qui sera exécuté en deux niveaux suivant l'architecture présentée dans la Figure 5.4

- *Déploiement de routeurs (sinks)* : dans ce niveau, seuls les deux objectifs coût et connectivité sont pris en compte. L'objectif est d'avoir un nombre minimal de nœuds routeurs à déployer, tout en satisfaisant un RSSI supérieur ou égale à RX_{Tsh} . Dans cette partie seuls les nœuds routeurs sont déployés.
- *Déploiement de nœuds capteurs* : En se basant sur la solution obtenue dans la première phase, l'algorithme est ré-exécuté pour définir les positions, ainsi que le nombre optimal des nœuds capteurs. Dans cette partie de l'algorithme,

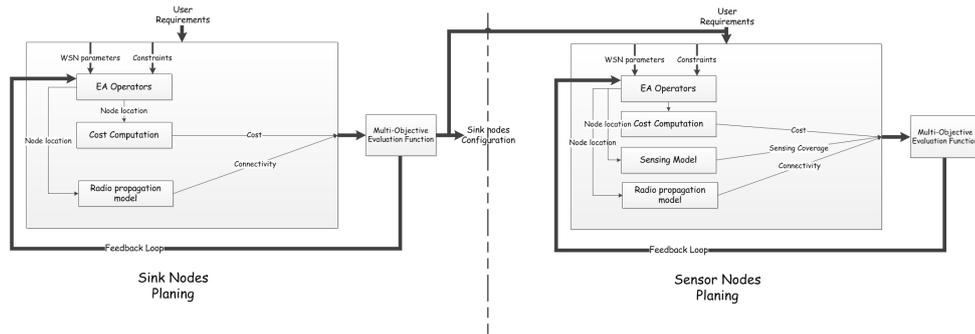


FIGURE 5.4 – Architecture du système de déploiement du RCSF

on considère quatre fonctions objectifs : Le coût; la connectivité; la durée de vie et la couverture des évènements.

Codage du chromosome

Nous avons utilisé des variables de décision binaires codées en vecteur de taille fixe résultant de la translation de la grille de déploiement, ou chaque position notifie la présence ou pas d'un nœud. Un exemple d'individu est représenté dans la Figure 5.5.

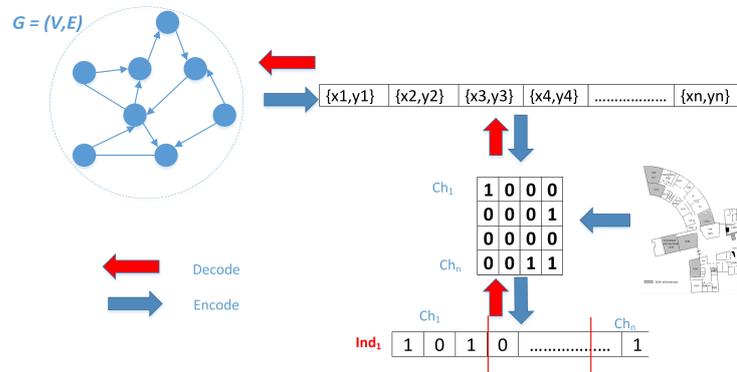


FIGURE 5.5 – Codage du chromosome

Croisement

Nous adoptons, dans notre méthode d'optimisation, une technique de croisement en un point. Cette technique consiste à découper le chromosome en plusieurs parties, puis à les assembler en prélevant le même nombre de parties sur chaque individu. Ce processus est représenté dans Figure 5.6.

Mutation

Afin d'améliorer la diversité de la population, nous utilisons un processus de mutation multi points. Ce processus est appliqué à une partie de la population avec

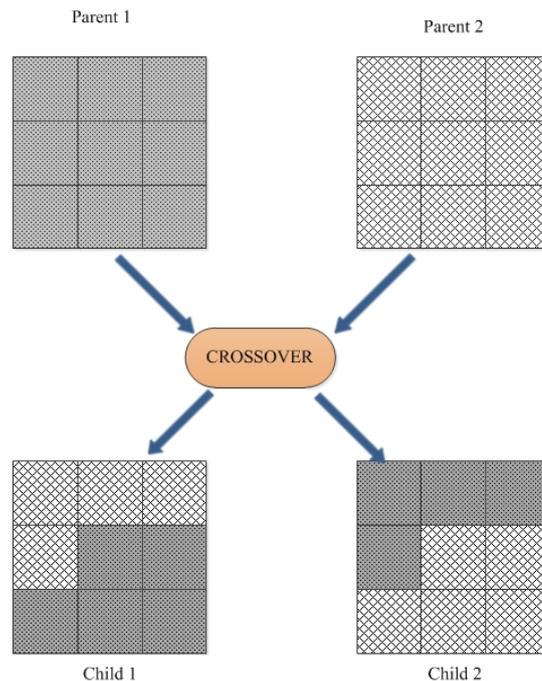


FIGURE 5.6 – Technique de croisement utilisée : Premièrement, les parents sont choisis aléatoirement. Les chromosomes des parents sont ensuite découpés en plusieurs parties. Les parties des deux parents sont réassemblées pour former deux individus (i.e. $Child_1$ et $Child_2$) avec 50% des chromosomes provenant de $Parent_1$ et le reste provenant du deuxième parent

une probabilité de mutation P_m . Le chromosome est divisé en quatre parties différentes représentant quatre zones du bâtiments différentes. Chaque zone est ensuite évaluée en fonction des objectifs de connectivité et de couverture. Enfin, nous ajoutons aux pires zones, si elles existent, un nœud de capteur à une cellule sélectionnée au hasard. Ce processus est expliqué dans la Fig 5.7.

5.1.4 Résultat et discussions

Afin d'obtenir l'ensemble des solutions optimales selon le sens de Pareto, nous utilisons les deux méthodes d'optimisation proposées (NSGA-II). La taille initiale de la population Pop_{Taille} a été fixée à 50 individus et les P_m , P_c (probabilités de mutation & croisement) à 0,1 et 0,8 respectivement. Ces valeurs ont été obtenus après plusieurs essais. Enfin, pour arrêter l'exécution de l'algorithme au bon moment, nous choisissons comme critère d'arrêt la variation des valeurs de fitness. Pour ce faire, nous vérifions la variation moyenne de la valeur de la fitness toutes les 10 itérations. Si cette moyenne est supérieure à un certain seuil prédéfini (Avg_{Ths}), l'algorithme continue de fonctionner. Sinon, l'algorithme arrête son exécution et trace le résultat obtenu (c'est-à-dire l'ensemble optimal de Pareto).

L'algorithme fournit de nombreuses solutions regroupées dans le Front de Pareto. Nous sélectionnons les plus significatives du front de Pareto et les présentons dans le tableau 5.1, (en fonction d'un coût minimal qui assure une couverture et une connectivité complètes). Les solutions varient d'un nœud déployé (avec une couverture de 58 %) à quatre nœuds déployés assurant une couverture complète de la zone, avec une sur-couverture d'environ 40 %.

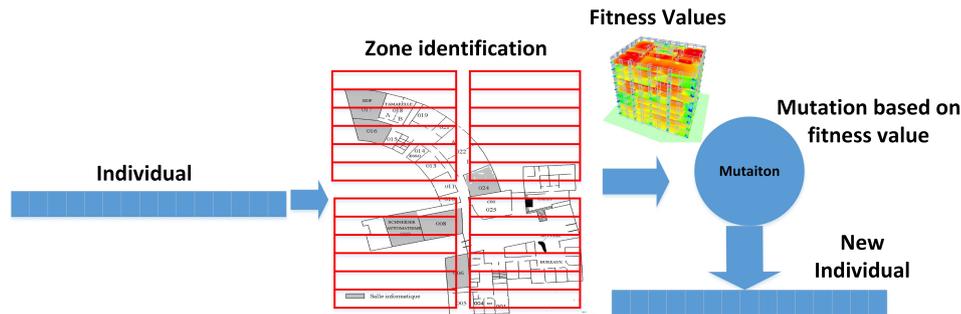


FIGURE 5.7 – Technique de mutation utilisée : D’abord, les individus sont sélectionnés dans la population actuelle selon une probabilité de mutation P_m . Ces chromosomes sont ensuite découpés en quatre parties représentant les quatre zones d’intérêts respectées. Ces parties sont ensuite modifiées (c.-à-d. l’ajout d’un nœud dans une position choisie au hasard) afin de former les nouveaux individus mutés.

Nombre de nœuds déployés	Connectivité(%)	sur-couverture (%)
1	58	0
2	82	0
3	94	20
4	100	40

TABLE 5.1 – quelques solutions représentatif du front de Pareto

En nous basant sur les coordonnées des nœuds relais fournies précédemment, nous avons lancé un nouveau NSGA-II pour nous approcher l’emplacement optimal des capteurs. Les meilleures valeurs de fitness les plus significatives sont présentées dans la Figure 5.8. Ces valeurs sont extraites du front Pareto des solutions proposées par NSGA-II. Les topologies presque optimales proposées varient de 4 nœuds déployés (avec $CnC_A = 51\%$ et $Cov_A = 37\%$) à 16 nœuds déployés (avec $CnC_A = 100\%$, $Cov_A = 100\%$ et $ov - Cov_A = 51\%$). Le choix de la meilleure solution est laissé à l’utilisateur et dépend de ses besoins. Si l’utilisateur a des contraintes financières et peut accepter une solution qui n’assure pas une couverture complète, il choisira des solutions de 7 ou 8 nœuds. Si l’utilisateur souhaite assurer une couverture complète de la zone, une topologie comprenant 13 nœuds est possible. Une topologie comprenant 4 nœuds relais et 10 nœuds de capteurs assurant une connectivité et une couverture complètes avec une surcouverture égale à 5 % est représentée à la Figure 5.9.

Métriques de comparaison

Afin de calculer les différentes pondérations des fonctions objectives, nous avons développé un questionnaire dont l’interface est représentée sur la Figure 5.10. Ce questionnaire nous permettra d’établir un ordre de priorité des différents objectifs fixés et nous donnera les valeurs des différentes pondérations de chaque objectif. Le questionnaire a été développé sous MATLAB et déployé auprès de quelques personnes considérées comme des futurs utilisateurs de notre outil pour la phase test et validation. Comme on peut le voir sur l’interface (Figure 5.10), le questionnaire est divisé en deux phases. La première phase nous permet d’établir un ordre de priorité

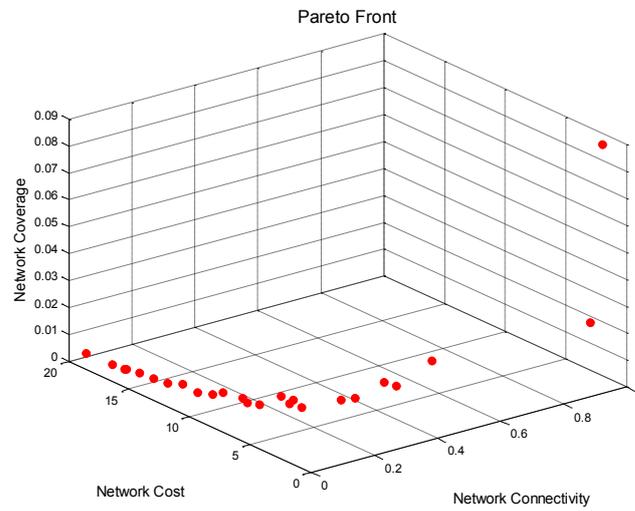


FIGURE 5.8 – Front de Pareto obtenu par l'algorithme NSGA-II

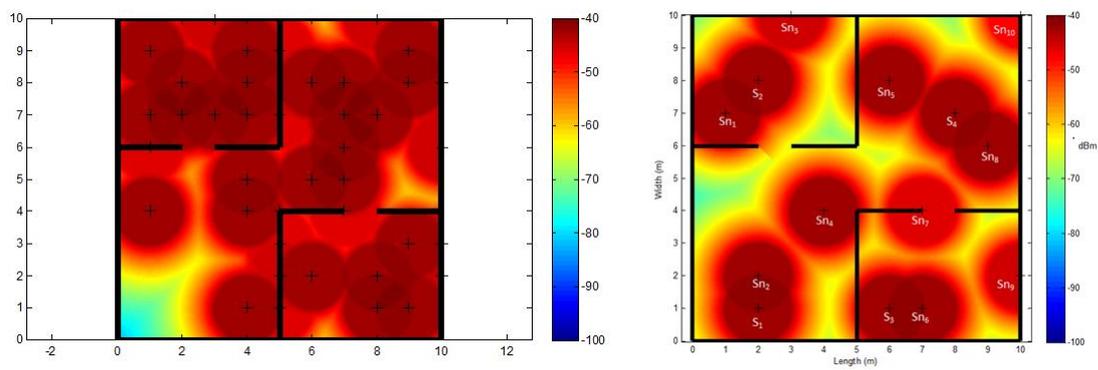


FIGURE 5.9 – une solution de la première génération (Gauche), and une solution retenue du premier front (droite)

Questionnaire

Veillez Choisir un objectif à la fois selon l'ordre d'importance

<input type="radio"/> Coût	<input type="radio"/> Coût	<input checked="" type="radio"/> Coût
<input type="radio"/> Couverture	<input type="radio"/> Connectivité	<input type="radio"/> Durée de vie
<input type="radio"/> Couverture	<input checked="" type="radio"/> Couverture	<input type="radio"/> Connectivité
<input type="radio"/> Connectivité	<input type="radio"/> Durée de vie	<input checked="" type="radio"/> Durée de vie

Veillez sélectionner une valeur grâce au curseur

Coût

Couverture

Connectivité

Durée de vie

Réinitialiser Valider

FIGURE 5.10 – Interface graphique du questionnaire

des différents objectifs. La seconde, permet de déterminer les pondérations affectées à chaque objectif. Ces pondérations sont calculées selon l'équation 5.15. Cette équation nous permet de s'assurer que la contrainte $\sum_i \omega_i = 1$.

$$\begin{aligned} \omega_1 &\in [1/N_{Obj}, 1] \\ \omega_{i+1} &\in [(1 - \omega_i)/(N_{Obj} - i), \omega_i] \end{aligned} \quad (5.15)$$

Ce travail à été consacré au bâtiments intelligents, il permet d'aider à installer des capteurs sans file dans un bâtiment ou un atelier de production. Cela contribue directement dans le processus de collecte de données dans l'industrie 4.0.

5.2 Traitement de données distribué et proche des utilisateurs

Le système de production industriel a connu quatre grandes révolutions depuis le début du siècle dernier (BILL, 2016). Chaque nouvelle révolution vient satisfaire les exigences spécifiques du marché, en utilisant les technologies existantes. Comme le montre la Figure 5.11, la première s'appelle la révolution mécanique (1784) où des machines mécaniques sont introduites pour accélérer la production et proposer de nouveaux types de produits qui ne peuvent pas être fabriqués manuellement. Ces systèmes de production arrivent à leurs limites, avec une demande croissante de produits. Dans ce contexte, la deuxième révolution, appelée révolution électrique (1870), était nécessaire pour satisfaire plusieurs exigences en termes de quantité de produits et de rapidité d'exécution. La croissance continue de la demande et la répétabilité des opérations pénibles, conduisent à une nouvelle révolution appelée révolution électronique (1969) (WAN, CAI et ZHOU, 2015) (SHAFIQ et al., 2015). Cette génération de

Les systèmes de production utilisent des dispositifs électroniques pour exécuter des opérations complexes et des systèmes robotiques pour exécuter des opérations matures.

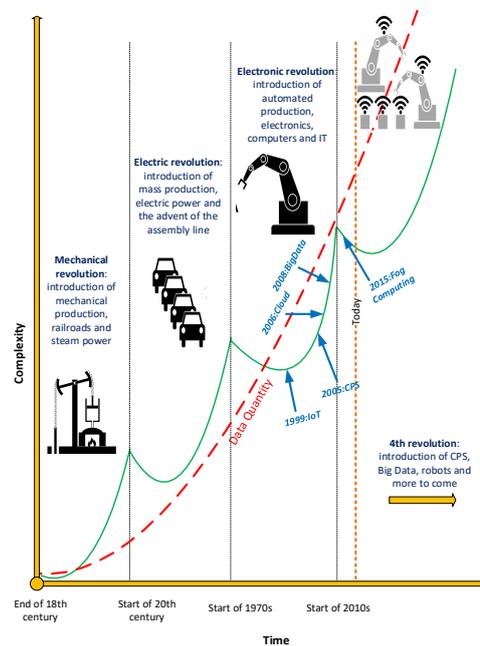


FIGURE 5.11 – Évolutions industrielles et complexité de données

Les deux dernières décennies ont connu des changements radicaux dans le comportement des utilisateurs, où la demande devient imprévisible et la durée de vie des produits devient de plus en plus courte (HERMANN, PENTEK et OTTO, 2016). Les systèmes de production deviennent incapables de suivre les changements du marché, en particulier face à de nombreuses exigences telles que des délais de développement courts, la personnalisation à la demande, la flexibilité, la décentralisation et l'efficacité des ressources. Par conséquent, le développement d'une nouvelle génération de systèmes de production capables de répondre à ces nouvelles exigences est une nécessité (LASI et al., 2014). Aujourd'hui, la quatrième révolution industrielle est introduite par l'introduction de plus d'intelligence dans les outils de production, plus de réactivité, et une meilleure maîtrise des systèmes de production.

5.2.1 Évolution de la complexité :

On observe que chaque révolution industrielle est lancée pour réduire la complexité des données, mais l'évolution du contexte génère de nouveaux défis concernant les coûts, la productivité et la complexité (en terme de données). Ainsi, ces systèmes de production arrivent à leurs limites et une nouvelle révolution est nécessaire. Deux phases d'un système de production peuvent être identifiées. Au cours de la première phase, de nouvelles technologies sont introduites et une réduction de la complexité est observée. A la fin, ces technologies arrivent à leur maturité maximale. Dans la deuxième phase, les systèmes de production commencent à montrer leur insuffisance jusqu'à la prochaine révolution (cf. continuer ligne verte sur Figure 5.11). La quantité de données générées par les systèmes de fabrication depuis la première révolution suit la courbe rouge pointillée. Ce phénomène montre que

le problème le plus important à l'avenir sera celui des données. Comment les collecter et les préparer? Comment les traiter et les exploiter? Plusieurs outils ont été introduits pour exploiter les données, tels que le Big data et le cloud computing. Ce dernier a été développé afin de permettre le traitement d'une grande quantité de données. Toutes les études sur l'efficacité du Cloud computing dans les systèmes industriels, démontrent qu'il ne va plus pouvoir traiter toutes les données générées par les systèmes de production. Ceci est dû principalement aux temps grandissant de traitement et de transmission. Le fog computing est une solution intéressante à cause de son aspect proche de l'utilisateur. Logiquement, elle permet de réduire les temps de traitement de données et les échanges d'informations. Nous avons exploré le potentiel de cette méthode et les challenges qui font qu'elle n'est pas largement implémentée. Nous avons aussi donné un indicateur permettant de mesurer l'applicabilité du fog pour des applications industrielles données.

5.2.2 Le fog computing

Selon la littérature, le Fog computing peut être défini de plusieurs façons. Du point de vue de Cisco, il est considéré comme une extension du noyau Cloud Computing à la périphérie du réseau (COMPUTING, 2016). Il permet aux applications sur des milliards d'appareils IoT connectés, de fonctionner directement en périphérie du réseau (STOJMENOVIC et WEN, 2014) (DASTJERDI et al., 2016).

Caractéristiques :

- **Distribution** : According to (AAZAM et HUH, 2015), le fog computing se caractérise par une architecture géographique dense et distribuée. Cette distribution permet de transmettre rapidement les données de flux et de traitement sur l'ensemble du réseau.
- **Mobilité** : La mobilité du fog est définie comme la capacité d'échanger des informations avec des applications mobiles omniprésentes. Il est basé sur le fait d'éviter de renvoyer les mêmes informations plusieurs fois à plusieurs nœuds fog. Ceci améliore la QoS et offre une connectivité continue des appareils mobiles.
- **Aspect temps réel, faible latence** : la proximité de l'utilisateur offre un aspect temps réel au Fog. Ceci améliore directement les performances en terme de latence et de qualité de service (STOJMENOVIC et WEN, 2014).
- **Heterogeneity** : Le Fog se caractérise par la prise en charge de l'hétérogénéité des nœuds et des environnements. (MUKHERJEE et al., 2017) (OSANAIYE et al., 2017).
- **Interopérabilité** : Le Fog offre une architecture intéressante pour assurer une communication sûre et rapide dans le réseau. Il constitue une plateforme commune accessible à plusieurs applications, ce qui les rend interopérables (BONOMI et al., 2012)
- **Sécurité** : En outre, ce nouveau paradigme peut assurer la sécurité des données, même la confidentialité et le contrôle sont garantis lors de la mise en œuvre de la solution Fog (AAZAM et HUH, 2015).

architecture

Comme le montre la Figure 5.12, il est formé de trois couches. La couche inférieure, qui déploie différents types de dispositifs intelligents capables de communiquer avec la couche intermédiaire, pour assurer un traitement rapide des données. La couche intermédiaire, ou couche de Fog, regroupe différents nœuds de Fog tels que les serveurs, les routeurs, les passerelles, les commutateurs et les points d'accès, qui sont capables d'extraire les connaissances des données, puis de les transmettre aux serveurs cloud MUKHERJEE et al., 2017. la dernière couche est la couche Cloud.

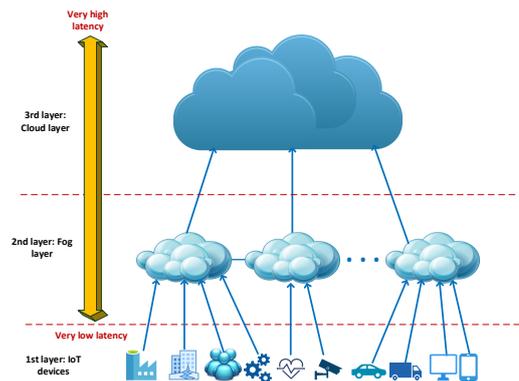


FIGURE 5.12 – l'architecture globale du Fog computing

5.2.3 Implémentation du Fog dans l'industrie

Très peu d'applications du Fog ont été renseignées dans la littérature. On trouve une implémentation du Fog proposée dans (GAZIS et al., 2015). Il introduit une plateforme d'exploitation adaptative pour fournir une solution de maintenance prédictive basée sur le Fog. (CHEN, 2017) propose un système intelligent de traçabilité alimentaire. (DE BRITO et al., 2016) propose un modèle basé sur le Fog pour créer des systèmes de fabrication plus dynamiques, plus flexibles et plus autonomes. Pour pouvoir s'intégrer facilement dans des systèmes industriels, le Fog doit relever les défis représentés dans la Figure 5.13. Ils sont classés en deux grands groupes : les Input (ceux sur les quels on peut réagir) et les Output (ceux qui sont la conséquence du premier groupe). Des liens peuvent être déduits entre ces différents défis, et ont été développés dans (BOUZARKOUNA et al., 2018).

Afin d'expliquer l'absence de mise en œuvre du Fog dans le contexte d'Industrie 4.0, nous avons passé en revue les quelques recherches existantes, et extrait leurs

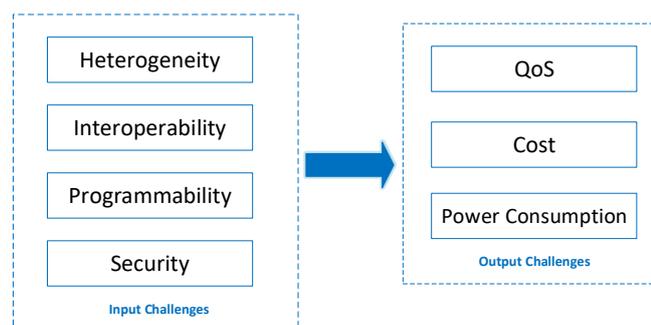


FIGURE 5.13 – les défis du Fog classé en entrée sortie

facteurs communs. Ces facteurs sont considérés comme les caractéristiques du Fog qui ont de l'importance pour les industriels. Ces caractéristiques du Fog sont :

- temps réel
- capacité de calcul
- quantité de donnée
- la mobilité
- la distribution
- hétérogénéité

On peut imaginer que le besoin d'implémenter le fog computing dépend du nombre de caractéristiques exploités dans l'application.

Ce travail continue avec le développement d'une application de transport interne dans l'atelier flexible, en utilisant le Fog computing. Après implémentation, on va faire plusieurs tests pour prouver l'apport du fog dans l'atelier flexible. Ces développements entrent dans le cadre de la thèse d'Imen Bouzarkouna dans le cadre de la chaire CISCO avec le CESI.

5.3 Exploitation des données de localisation pour la planification dynamique

L'amélioration de la performance et le renforcement des conditions de sécurité de personnes et de biens sur les sites de production, représentent des enjeux majeurs pour les entreprises industrielles. Le site de production est un environnement dans lequel différentes ressources (personnes, machines, ...) sont coordonnées, pour interagir et accomplir des tâches diverses. Ces derniers s'inscrivent dans des processus aboutissant à la réalisation de différents cycles de production ou de support. Cependant, certaines interactions fortuites entre ces ressources peuvent aller à l'encontre des objectifs de productivité, de sécurité et/ou de sûreté de l'entreprise. Par exemple, certains objets et/ou zones peuvent représenter un danger pour certains opérateurs. D'autres objets, pouvant avoir un caractère confidentiel, ne doivent pas être exposés à tous les opérateurs et ne sont accessibles que pour une partie restreinte des intervenants sur le site. D'autre part, la planification des tâches de production suppose la disponibilité des ressources dans une position donnée au moment de leur exécution. Cependant, le comportement imprévisible des opérateurs dans l'atelier de production, les aléas sur l'état des ressources et les flux physiques et informationnels, font que cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée (MACCARTHY, WILSON et CRAWFORD, 2001)(BILLAUT, MOUKRIM et SANLAVILLE, 2013). En effet, cela perturbe la planification initiale en retardant des tâches, voire en menant à leur annulation si une solution alternative n'est pas identifiée. Dans une telle situation, la localisation des ressources peut être d'une grande utilité afin de prendre rapidement une décision optimisée pour remédier à ce genre de perturbations (KACEM, HAMMADI et BORNE, 2002). Traditionnellement, il est impossible de connaître en temps réel et avec certitude les positions des ressources mobiles dans un atelier de production. Avec l'émergence de l'industrie 4.0 et ses composantes, notamment l'IdO (Internet des Objets ou 'IoT'), les capteurs et les SCP (Systèmes Cyber-Physiques 'CPS'), la déduction de l'information de localisation en temps réel devient possible comme le montre la Figure 5.14. Plusieurs chercheurs et industriels ont développé des solutions techniques pour la localisation temps réel qui peuvent être installées sur les personnes et les objets, ou dans les bâtiments. Cependant, la

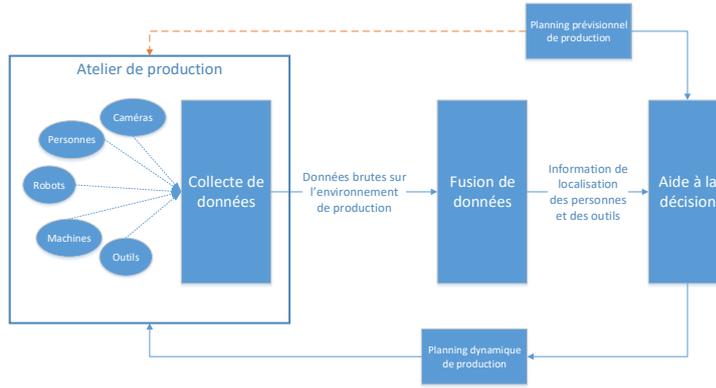


FIGURE 5.14

prédiction/détection des dérives sur la localisation des ressources peut générer un nombre important d'alertes, rendant leur gestion impossible, ce qui empêche l'utilisation de certaines d'entre elles pour améliorer la performance opérationnelle et réduire certains risques.

Il est donc primordial de calculer la probabilité d'apparition d'un événement redouté en se basant sur ces alertes. Dans cet article, nous proposons de développer une méthode basée sur la localisation pour définir une stratégie de prise de décision concernant les actions à entreprendre afin de réduire les effets des événements redoutés détectés ou les éviter. Ce travail entre dans le cadre du projet LOCADYN. Les développements, dans ce sujet, font appel à des compétences dans l'apprentissage artificiel et la modélisation statistique.

5.4 Formalisation du problème

Supposons qu'un planning prévisionnel de production ($PPP(t)$) est en cours d'exécution, il contient le planning courant des tâches affectées aux différentes ressources de l'instant t jusqu'à la fin de l'horizon de planification H . Grâce à la remontée des informations apportées par les données des capteurs ($\mathcal{D}(t)$), une situation de risque élevée, résultant de l'arrivée d'un événement redouté e , est prédite à l'instant courant t pour arriver après un délai τ , avec un degré de confiance de prédiction $\gamma_e(\mathcal{D}(t), \tau)$:

$$\begin{aligned} P_e(t + \tau) &= \Pr(\text{l'évènement redouté } e \text{ arrive à } t + \tau) \\ &= \hat{P}_e(\mathcal{D}(t), \tau) \pm \gamma_e(\mathcal{D}(t), \tau) \end{aligned}$$

Où $\hat{P}_e(\mathcal{D}(t), \tau)$ représente la probabilité estimée que l'évènement redouté arrive après un temps τ , et $\mathcal{D}(t)$ représente l'ensemble de données actualisées à l'instant t , y compris celles de la localisation des ressources. Si l'évènement est déjà avéré à t , alors $P_e(t + \tau) = 1 \forall \tau \geq 0$ et le système continue de subir les effets de l'évènement jusqu'à ce qu'une action corrective soit mise en place pour y remédier. Supposons qu'il existe une action préventive pour mitiger le risque associé à tout évènement redouté e et que l'action est enclenchée à chaque fois que la condition suivante est vérifiée :

$$\left(\hat{P}_e - \gamma_e \geq P_e^{\min} \right) \vee \left(\left(\hat{P}_e + \gamma_e \geq P_e^{\min} \right) \wedge \left(\gamma_e \leq \gamma_e^{\max} \right) \right)$$

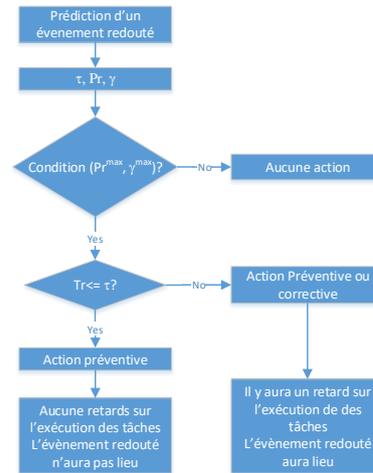


FIGURE 5.15 – Processus de sélection d'action en se basant sur la qualité de l'information de localisation

Où P_e^{\min} et γ_e^{\max} sont des seuils de décision qui reflètent l'attitude du décideur face aux risques (aversion, tolérance, addiction). La Figure 5.15 représente le processus que l'on vient de décrire.

Un évènement redouté e est défini par deux attributs qui sont le type $type_e$ et la durée μ_e . Les types d'évènements redoutés qui peuvent venir perturber l'exécution de $PPP(t)$ sont : (i) indisponibilité d'une ressource r pendant un temps μ entraînant un retard sur l'exécution d'une ou plusieurs tâches (ii) arrivée de nouvelles tâches à intégrer dans le planning courant (iii) annulation de tâche(s) dans le planning courant (iv) variation de durée de tâche(s) (v) variation de date d'échéance de livraison de tâche(s) (vi) accès d'une ressource à une zone interdite. Seul le premier et le dernier type de risque peuvent être évalués en utilisant les informations de localisation de ressources. Nous allons nous limiter à ces deux types de risque dans le cadre de cette étude.

Exemple Prenons le cas le plus basique : à l'instant t l'opérateur r est localisé à la position $L_{r,t}(x_{r,t}, y_{r,t})$. Il doit exécuter une tâche j sur une machine m localisée à la position $L_m(x_m, y_m)$ à l'instant t_j postérieur à t . Sachant que la distance qui sépare la position de l'opérateur de la machine m est $\Delta d_{r,m,t}$, le temps nécessaire pour parcourir cette distance est $\Delta t_{r,m,t}$. Il y aura du retard sur la tâche j si $\Delta t_{r,m,t} > t_j - t - \epsilon_{r,t}$. Dans ce cas, le retard sera de $T_j = t + \Delta t_{r,m,t} + \epsilon_{r,t} - t_j$, où $\epsilon_{r,t}$ est la latence intrinsèque de l'opérateur avant qu'il commence à partir vers la machine m . L'évènement redouté associé à cette situation pourrait être défini comme $e : T_j \geq T_j^{\max}$, avec T_j^{\max} le retard maximum toléré pour la tâche j .

Soit t_s le temps nécessaire pour définir une action corrective (si $\tau = 0$) ou préventive (si $\tau > 0$) optimisée, t_a le temps nécessaire pour la mise en place de cette action et $t_r = t_s + t_a$ le temps de réactivité. Nous distinguons deux cas possibles :
 Cas $t_r \leq \tau$: possibilité de planification et mise place de l'action avant l'occurrence de l'évènement redouté associé au risque. Dans ce cas $0 \leq P_e(t + t_r) < P_e(t + \tau)$
 Il n'y aura pas de perturbation apparente sur l'exécution des tâches dans le PPP, même si le planning dynamique peut présenter une différence par rapport au planning prévisionnel (rajout d'une tâche, remplacement d'une ressource, etc.)

Cas $t_r > \tau$: l'évènement redouté peut arriver avant la mise en place de l'action. Dans ce cas $P_e(t + t_r) > P_e(t + \tau)$ En fonction du type d'évènement redouté, l'action adéquate pour le mitiger et/ou l'éliminer doit être intégrée dans le planning existant à moindre coût. On distingue deux types d'actions possibles : (i) remplacer une ressource indisponible et (ii) réaffectation de tâches à d'autres ressources. Chaque type d'action ayant un coût différent, le coût total des actions choisies doit être minimisé

La suite de ce travail consistera à développer des algorithmes de planification dynamique à l'issue des actions décidées et testés par simulation, puis sur un cas d'étude expérimental.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre j'ai exposé mes travaux sur l'exploitation des données industriel. En effet, pour pouvoir exploiter ces données il faut avoir une infrastructure de capteurs, de réseau et de calcul adaptée au type et à la quantité de données générée. Je me suis intéressé à l'installation de réseau de capteurs sans fil et à l'introduction de Fog pour augmenter la réactivité du système. à la fin du chapitre, j'ai présenté une application de l'exploitation des données de localisation des personnes et des outils dans l'atelier flexibles. l'ensemble de ces travaux a permis la publication d'un article journal et de soumettre un autre ainsi que la publication de plusieurs conférences internationales.

Deuxième partie

Projet de Recherche

Cette dernière partie expose quelques études en cours et fournit des pistes de recherche pour mes futurs travaux. Elle ouvre quelques perspectives sur lesquelles je compte orienter mes recherches sur le court et le moyen termes. Plusieurs perspectives sont la continuité des travaux actuels puisqu'elles font partie de projets déjà en cours. D'autres ouvrent des pistes d'explorations pour de nouvelles thématiques de recherches.

6

Perspectives de recherche

6.1 Introduction

Les sociétés modernes connaissent continuellement des changements touchant tous les domaines dont une grande partie est la conséquence du développement technologique. Elles doivent faire face à des défis majeurs dans plusieurs sphères : économique, politique, culturelle, etc. Pour relever ces défis, il faut se préparer à l'avenir et réussir différentes transitions : énergétique, écologique, numérique, organisationnelle et sociétale.

L'Usine Du Futur (UDF) est au cœur de ces transformations vu qu'elle est censée répondre aux exigences du contexte économique et social de son environnement. La politique de recherche Européenne vise à mettre en place une économie intelligente, sobre en carbone et inclusive. Afin de contribuer à ces objectifs, l'UDF doit avoir un impact positif sur l'environnement ou à minima ne pas contribuer à sa détérioration. Cela signifie que l'usine doit utiliser une énergie propre et renouvelable, avec des quantités réduites et des matières premières respectueuses de l'environnement. Aussi, elle doit être intégrée dans un processus d'économie circulaire.

Une étude (EY, 2019) sur l'intégration de l'industrie 4.0 au sein des entreprises françaises et allemandes a montré que l'intérêt que portent ces derniers sur l'industrie de futur est très grand (78% et 79% des dirigeants Français et Allemands se disent vouloir aller vers l'usine 4.0), par contre les résultats obtenus à travers les projets pilotes montrent que les gains sont inférieurs aux espérances. Ces résultats montrent l'importance de la simulation et de l'optimisation du fonctionnement des solutions basées sur le concept de l'industrie de futur. L'une des plus importantes solutions apportées par l'industrie du futur est la robotisation des processus, notamment l'introduction des robots collaboratifs. Ces robots sont utilisés pour assurer les actions pénibles ou trop dangereuses pour être exécutées par des opérateurs humains.

D'après mes travaux de recherche, les perspectives de court et moyen terme vont dans le sens du pilotage de l'Usine Du Futur et des systèmes de production d'énergies renouvelables en se basant sur des techniques de simulation et d'optimisation, et se déclinent à travers les trois défis suivants :

- *Le défi technologique* : consiste au développement et à l'exploitation de nouvelles technologies pour des applications industrielles, pour offrir plus de flexibilité aux ateliers de production. En particulier, cela concerne le développement de nouveaux systèmes robotiques industriels et l'exploitation de l'internet industriel des objets. Une question importante demeure posée pour moi, elle concerne l'exploitation de ces nouvelles technologies (ex. systèmes de localisation, Internet des objets, Fog computing, ...) pour améliorer les performances des ateliers de production.

- *Le défi environnemental* : la question du changement climatique est de plus en plus présente dans les sphères politiques, sociétales et scientifiques. Plusieurs questions préoccupent la communauté scientifique telles que le développement de systèmes de production sobre en carbone, le développement des énergies renouvelables et propres, la réutilisation des ressources, la valorisation des déchets, ... Des pratiques favorisant l'utilisation des énergies renouvelables avec leurs variations, la réutilisation de la connaissance cumulée et sa remise à jour, et la réduction de l'extraction de matières premières doivent être développées.
- *Le défi organisationnel* : les systèmes de production modernes représentent des systèmes complexes. De plus, le contexte économique actuel oblige les entreprises à s'adapter rapidement et à moindre coût aux marchés et aux comportements des clients, afin de rester compétitives. Il s'agit par exemple de développer des aptitudes d'auto-organisation, de collaboration et de coopération dans les ateliers de production. La prise de décision devient une tâche complexe et nécessite le déploiement de méthodes d'aide à la décision voire de la décision automatique.

Mon projet de recherche vise des travaux pouvant répondre à ces défis. Il sera axé sur deux volets :

6.2 Le pilotage des systèmes de production flexibles

L'introduction de l'intelligence dans les outils de production a rendu possible le fait de donner plus d'autonomie aux différents organes des ateliers de production. Le développement de nouvelles politiques de pilotage et de supervision de ces systèmes reste une question de recherche ouverte. D'un côté, la décision centralisée dans un système offre une vision plus globale et plus de contrôle sur les activités du système, mais cela est considéré comme une politique rigide qui peut être mise en difficulté à la moindre perturbation des activités du système. De l'autre côté, la distribution de la décision à travers l'augmentation de l'autonomie des composantes intelligentes offre plus de flexibilité, mais rend le contrôle des systèmes plus difficile. Ce sujet peut être abordé de plusieurs manières telles que, l'augmentation de l'intelligence et du comportement collaboratif des organes de production, la définition dynamique du niveau d'autonomie des composants, le développement de solutions optimales robustes, le développement d'architectures hybrides pour le contrôle et la supervision du système de production. Des solutions techniques apportées par l'introduction du principe de l'industrie 4.0 aide à la mise en place de ces architectures, telles que l'augmentation de la communication entre les organes, le calcul distribué et la reconfigurabilité rapide des moyens de production.

6.2.1 Travaux en cours et perspectives court terme

Actuellement nous avons des actions sur l'optimisation d'allocation et d'ordonancement des tâches dans les ateliers de production flexibles pour différentes situations, à travers les projets CoRoT, Locadyn et Xterm.

La problématique commune entre ces trois projets est l'établissement d'un plan de production ou de transport dynamique et résilient face aux divers perturbations.

Par ailleurs, l'introduction de la robotique, et, notamment la robotique collaborative dans les systèmes de production, a montré beaucoup d'avantages mais doit faire

face aussi à de nombreux défis. En plus de mon implication dans le projet CoRoT, qui a une grande composante robotique, je suis aussi chef du projet UV-Robot, qui s'intéresse au développement de robots agricoles pour appliquer un traitement UV-c contre la maladie du mildew. Je m'intéresse principalement à la supervision de ce robot et l'optimisation de l'ordonnancement des tâches de traitement pour réduire le temps total du traitement de toute une serre.

- Dans le projet CoRoT on s'intéresse à la mise en place d'architecture de supervision distribuée pour la gestion des tâches de transport dans les ateliers flexibles. Cette architecture doit assurer en même temps un haut niveau de contrôle et de flexibilité. La méthode DIMS développée par l'un des partenaires du projet (HE, 2011) utilise une approche intéressante qui consiste à établir une sorte de configuration de l'environnement (des prix pour les opérations et des profits minimaux pour les ressources) pour exécuter les tâches. Malgré que le principe de cette méthode est intéressant, son utilisation pour une production itérative reste impossible. Nous travaillons maintenant sur le développement d'une alternative basée sur cette approche de contrôle indirecte. Le but étant de pouvoir proposer un ordonnancement optimal, et de pouvoir faire un réordonnancement dans le cas de perturbations.
- Les travaux menés dans le cadre du projet Xterm consistent au développement d'ordonnancement dynamique de la tâche de transport et de vérifier son optimalité par simulation. La prochaine étape de ce travail consiste à améliorer l'algorithme d'ordonnancement dynamique pour intégrer des indicateurs sur les performances globales du système. D'un autre côté, on travaille aussi sur le développement de la simulation pour l'utiliser dans des décisions opérationnelles.
- Dans le projet Locadyn, on s'intéresse à l'exploitation de l'information de localisation pour prédire l'arrivée d'une dérive par rapport au plan initial. On essaie par la suite de mettre en place un plan d'action pour empêcher l'arrivée de cet évènement, ou réduire son impact sur le plan global. Nos efforts vont se concentrer à l'avenir sur la définition de ces actions qui consistent à faire du réordonnancement et de la réaffectation des tâches aux ressources. Ce travail s'attaque à la problématique d'exploitation de données pour l'amélioration des indicateurs de performance de l'atelier de production.
- Mes travaux sur le projet UV-Robot se concentrent sur le développement d'un simulateur représentant le système (serre, plantes, robot, station de charge,...) et l'optimisation des tâches de traitement. En effet, le robot ne peut traiter qu'un nombre limité de rangées à cause des limites de sa batterie. Notre but est d'optimiser l'ordonnancement des missions de traitement (une mission est composée de plusieurs tâches) afin de minimiser le temps total de traitement. Une difficulté supplémentaire s'ajoute, avec le problème d'évolution de la maladie. Nous allons traiter ce problème dans un mode statique, puis dans un mode dynamique. Des méthodes basées sur l'observation et la prédiction seront développées pour faire des traitements optimaux.

6.2.2 Projets de recherche

La mise en place de systèmes de production plus performants passe par la convergence de plusieurs facteurs et l'exploitation de techniques différentes en même temps. Je pense que les données peuvent être interprétées de manière plus approfondie. On peut en tirer de l'expérience et de l'intelligence exploitable dans l'interprétation de

l'existant et la prédiction de l'avenir, afin de prendre des décisions optimales et robustes. Plusieurs pistes se dessinent dans le domaine de pilotage des systèmes de production :

1. *Outils de production intelligents et visionnaires* : Prochainement, je compte pousser la réflexion sur l'augmentation de l'intelligence des moyens de production à travers l'apprentissage artificiel ou la négociation. Cela va permettre de proposer des systèmes de supervision distribués et dynamiques pouvant trouver rapidement des alternatives optimisées aux différentes perturbations du système. Il s'agit de donner de la sagesse au système cyber physique industriel (CPPS) pour que les éléments intelligents autonomes aient une vision à long terme leur permettant d'éviter des actions myopes. Plusieurs défis organisationnels et technologiques se posent face à ce but. Mon intérêt sera concentré plus tard non seulement sur le développement d'architectures de systèmes d'information, mais aussi sur leur implémentation. En effet, la question de la prise de décision distribuée touche à d'autres problématiques tels que la puissance de calcul, le big data, la gestion de la connaissance, etc.
2. *Optimisation de la reconfiguration* : le robot développé dans le cadre du projet CoRoT sera un robot modulaire. Dans le cas d'une flotte de robots modulaires il n'est pas évident de savoir quel est la meilleure configuration de toute la flotte : est-ce que les robots doivent être séparés, ou une partie assemblée et l'autre partie séparée? Quel robot mobile avec quel bras? etc. Le cas du robot CoRoT est un cas minimal de modularité (deux modules). On peut étendre la question à un atelier reconfigurable où les machines sont tout simplement un ensemble de modules. Je serai tenté d'explorer des techniques de théorie de jeux pour résoudre ce problème.

6.3 La gestion et l'amélioration des énergies renouvelables et les systèmes sobres en carbone

Le développement de systèmes respectueux de l'environnement nécessite la production d'énergies renouvelables et propres, l'optimisation de l'exploitation des outils de production vis à vis de la consommation énergétique, et aussi la réduction des résidus de ces systèmes et de leurs effets néfastes sur l'environnement.

La transition énergétique se traduit par l'utilisation croissante des énergies renouvelables qui ont beaucoup d'avantages ,mais présente aussi des fluctuations importantes du réseau électrique. Les usines doivent trouver des solutions pour continuer à produire dans ce nouveau contexte. Elles doivent aussi s'inscrire dans des démarches d'économie circulaire en appliquant des techniques de remanufacturing, recyclage ou réutilisation. Je porte un intérêt particulier à ce genre de système à cause de la dimension éthique qu'il porte vis à vis de la planète. Je continue à alimenter mes travaux par rapport à l'amélioration des systèmes de production d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne et l'énergie de biomasse.

6.3.1 Travaux en cours et perspectives à court terme

- Je commence l'encadrement d'une thèse - en collaboration entre le laboratoire LINEACT et Néoma Business school de Rouen - sur la réduction des coûts de valorisation par méthanisation des bio-déchets à travers la logistique multimodale pour la collecte et la distribution des bio-déchets. Ce travail contribue à la considération de plusieurs types de bio-déchets sur la Normandie, et à la

focalisation sur l'optimisation du processus de négociation et coalition entre producteurs de déchets et centre de traitement.

- Je continue mes travaux sur l'optimisation de la maintenance des éoliennes en introduisant des maintenances opportunistes. L'idée étant de maintenir une éolienne, et profiter pour maintenir d'autres machines dans la limite du temps réglementaire. On optimisera le choix des éoliennes à inclure dans la tournée de maintenance. Le système sera résolu par des techniques de sim-optimisation. Ce travail entre dans le cadre d'une thèse que je co-encadre avec l'université de Sidi Bel-Abbes.
- Afin de considérer des maintenances proactives, il faut être capable de remonter à la cause principale de la panne. Pour cela, il faut des modèles de dégradation assez précis capables de représenter la propagation de panne. Je participe dans l'encadrement d'une thèse Algérienne avec ESI de Sidi Bel-Abbes, qui vise à diviser l'éolienne en plusieurs sous-ensembles affectés par les mêmes phénomènes, et qui seront représentés par des agents autonomes afin de représenter ce phénomène de propagation de panne. Le modèle sera injecté dans le simulateur déjà développé pour appliquer de nouvelles politiques de maintenance.

Ces travaux sur les énergies renouvelables vont être renforcés à l'avenir, notamment pour répondre à des problématiques de fiabilité et de propreté des énergies renouvelables.

6.3.2 Projets de recherche

Les travaux sur les énergies renouvelables vont être renforcés dans l'avenir, notamment pour répondre à des problématiques de fiabilité et de propreté et rentabilité. Je donne ici deux pistes que je compte développer dans ce sens :

1. *Maintenance propre des hydroliennes* : Malgré l'aspect renouvelable de l'énergie hydrolienne, son installation et sa maintenance reste compliquées et coûteuses, vu les moyens importants déployés. Il serait intéressant de proposer des solutions pour réduire l'empreinte carbone de ces tâches.
2. *Micro systèmes de production* : Je pense que les petits systèmes de production énergétiques (panneaux solaires, mini éoliennes, pompes à chaleur, etc) peuvent faire des bâtiments ou quartiers actifs qui produisent leur énergie. Il est important d'explorer cette piste et évaluer son réel potentiel.
3. *Vente d'énergie de personne à personne* : l'idée serait de trouver un moyen pour pouvoir effectuer des transactions entre particuliers ou entreprises, pour vendre leur production d'électricité qu'ils ne peuvent ni utiliser ni stocker. Il serait intéressant de définir à l'issue de cette étude l'impact de cette pratique sur le prix de l'électricité et le taux d'énergie renouvelable dans le réseau.

6.4 Le développement de méthodes et d'outils pour l'optimisation des systèmes complexes dynamiques

Il faut noter que les systèmes que je traite dans mes travaux sont considérés comme systèmes complexes composés de plusieurs sous-ensembles, ce qui rend leur modélisation peu aisée. Dans mes travaux actuels, je me base sur les systèmes multi-agents pour le développement de ces modèles. Des pistes d'amélioration de cette

modélisation sont envisageables à l'avenir. Afin d'améliorer les performances de ces systèmes, on procède souvent par optimisation ou par simulation. Vu la complexité des systèmes que l'on considère, il est souvent difficile de trouver une solution optimale qui prend en compte le comportement dynamique et incertain du système. De plus, les méthodes d'optimisation n'ont pas une vue dans le temps sur le comportement du système, mais ils explorent l'espace de solution possible. La simulation, quant à elle, représente une exploration dans le temps du comportement du système, mais ne permet pas une bonne exploration de l'espace de solution surtout quand le système est complexe.

De nouvelles techniques dites "sim-optimisation", mixant l'optimisation et la simulation pour trouver des solutions robustes, sont en train de voir le jour.

6.4.1 Travaux en cours et perspectives à court terme

J'ai initié quelques travaux sur ce sujet que je compte approfondir à l'avenir tels que :

- L'optimisation par simulation de la valorisation de déchets organiques : en optimisant la collecte de déchets chaque jour dans la simulation, et en établissant aussi une forme de négociation entre les agents pour pouvoir proposer des solutions à des situations possibles dans l'avenir. La thèse de Mlle XU explore le système de développement de ces méthodes. Nous allons étudier quelques techniques issues de la théorie de jeu pour optimiser le comportement des agents dans le système.
- Optimisation et simulation du traitement robotisé d'horticulture : le but est de réduire le temps total de traitement en prenant en compte la dynamique de l'évolution des maladies. La sim-optimisation permet de trouver des solutions même avec un comportement dynamique ; alors que les autres méthodes d'optimisation ne convergent jamais.

À moyen et long terme, mes recherches vont se focaliser sur l'exploitation de la sim-optimisation pour des fins opérationnels, et pas seulement pour la planification. Des notions de simulation et optimisation distribuée dans le contexte d'un système à plusieurs centres de décisions seront aussi étudiées.

6.5 Plan d'action

Après l'habilitation, j'envisage d'entreprendre plusieurs actions dans l'objectif d'élargir mes champs de compétences, parmi lesquelles je peux citer :

6.5.1 Montage de projets

J'ai participé dans le montage de plusieurs projets ANR, Interreg et H2020. Je participe dans le montage d'un projet sur la mise en place des transactions lors de vente d'énergie entre particuliers. Ce projet sera proposé à un appel H2020. Je compte explorer la piste des projets ERC pour le prochain appel. Je penche pour un projet sur l'économie circulaire dont je profiterai pour développer les techniques sim-optimisation et proposerai deux sujets de thèses sur les systèmes de production équitables et les processus de coalition entre agents intelligents dans les ateliers de production.

6.5.2 Participation dans des groupes recherche

Je compte m'impliquer plus dans les groupes de réflexion dont je fais partie, notamment un groupe sur la robotique émotionnelle et un le groupe CESIR/ AFCET (<https://www.afscet.asso.fr/cesir/grpe-cesir.html>).

7

Conclusion Générale

J'ai présenté dans ce document une synthèse de mes plus importantes contributions scientifiques durant mon poste d'ingénieur de recherche au laboratoire G-SCOP de Grenoble-inp et mon poste d'enseignant chercheur au CESI. J'ai donné un aperçu sur mes perspectives de recherche à court et moyen termes.

Mes recherches ont été consacrées à trouver des solutions face à des défis économiques et environnementaux auxquels le secteur industriel doit répondre, à savoir le développement d'une économie intelligente basée sur des systèmes de production résilients et efficaces, et le développement de systèmes sobres en carbone.

J'ai tout d'abord exposé un Curriculum vitae exhaustif qui a détaillé mes différentes activités de recherche, d'enseignement et d'encadrement.

Par la suite, j'ai exposé mes contributions scientifiques en quatre catégories. La première partie concerne mes travaux sur les plans dynamiques d'inspection, que j'ai mené principalement avec le laboratoire G-SCOP. La deuxième partie concerne mes travaux sur les systèmes de production des énergies renouvelables et sur l'économie circulaire. Ce chapitre concerne les développements que j'ai menés dans le cadre des projets PcBiod et MerInnovate, lors de mon poste d'enseignant chercheur au CESI. Un troisième chapitre s'est focalisé sur les travaux concernant l'ordonnancement de la tâche de transport dans les ateliers de production flexibles. La tendance à utiliser des robots pour accomplir cette tâche, et mon expérience de thèse sur la robotique mobile, m'ont beaucoup aidé pour le montage du projet CoRoT. Ce dernier constitue, pour moi, un projet structurant pour mes recherches autour de l'Usine Du Futur. Le projet contenant des démonstrateurs académiques et industriels, je dois suivre, en qualité de chef de projet, tous les développements matériels, scientifiques et logiciels qui y sont effectués. La quatrième partie de mes travaux concerne des problématiques liées aux données dans l'industrie 4.0. J'ai présenté dans ce chapitre des contributions liées à la problématique de collecte, de traitement et d'exploitation des données circulant dans un système cyber physique industriel.

Je pense que le secteur agricole doit profiter des développements technologiques que connaît le monde industriel dans le domaine de la robotique, surtout qu'il souffre d'un manque de main d'œuvre considérable. Dans ce sens, nous participons au projet Interreg, dont le but est le traitement robotisé des maladies dans le domaine de l'horticulture et où l'on rencontre des problématiques de gestion de flotte robotique. Je classe ce projet avec la troisième catégorie de mes travaux sur l'ordonnancement des tâches.

Il ressort de l'observation de mes contributions dans différents domaines, une constante principale de mes travaux qui est la simulation et l'optimisation des systèmes complexes, avec une préférence pour la modélisation et la simulation basée sur des systèmes multi-agents.

La réflexion sur l'exploration de l'espace de solutions revient systématiquement lorsque l'on veut appliquer une solution optimale. Le processus décisionnel dans

les systèmes complexes est multi-objectif, et les choix sont la plupart du temps subjectifs. Si l'on ajoute le fait que, dans la vraie vie, le monde est non linéaire, on observe qu'une très grande partie des solutions optimales que l'on propose ne sont plus d'actualité dans des systèmes dynamiques. Je pense que nous avons réussi à apporter quelques réponses à ce genre de problématique, avec la démarche de sim-optimisation que l'on essaie de mettre en place.

Cette multitude d'applications a été très bénéfique pour moi, car elle me permet de vérifier que les approches proposées peuvent fonctionner dans divers environnements, et me met face à de nouveaux challenges. la dernière partie du manuscrit présente mes perspectives de recherche qui sont divisées en trois axes concernant la planification des ateliers de production, les énergies renouvelables et l'exploitation des données. La principale direction à suivre à l'avenir sera celle des méthodes d'apprentissage artificiel et de cumul de connaissance.

Je suis conscient que l'HdR n'est pas une fin en soit, bien au contraire. C'est une nouvelle étape pour démontrer les capacités à mener des axes de recherche par rapport aux différents problèmes rencontrés, ainsi que les aptitudes de partage mais aussi d'adaptation dans un environnement complexe et dynamique.

Bibliographie

- AAZAM, Mohammad et Eui-Nam HUH (2015). « Dynamic resource provisioning through Fog micro datacenter ». In : *Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, p. 105-110.
- AL SEADI, Teodorita et Clare LUKEHURST (2012). « Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser ». In : *IEA Bioenergy 37*, p. 40.
- ANDERSEN, Rasmus Eckholdt et al. (2017). « Integration of a skill-based collaborative mobile robot in a smart cyber-physical environment ». In : *Procedia Manufacturing* 11, p. 114-123.
- ANOSIKE, Anthony Ikechukwu (2005). « Agent-based modelling simulation and control of dynamically integrated manufacturing systems ». Thèse de doct. University of Exeter.
- ARIUNBAATAR, Javkhlan et al. (2014). « Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste ». In : *Applied energy* 123, p. 143-156.
- ARNOLD, T et al. (2017). « Detection and identification of foreign bodies in polymer parts for use in semiconductor manufacturing ». In : *Image Sensing Technologies : Materials, Devices, Systems, and Applications IV*. T. 10209. International Society for Optics et Photonics, 102090U.
- ATLURU, Sri et Amit DESHPANDE (2009). « Data to information : can MTConnect deliver the promise ». In : *Transactions of NAMRI/SME 37.2009*, p. 197-204.
- BAR-YAM, Yaneer (1997). *Dynamics of complex systems*. T. 213. Addison-Wesley Reading, MA.
- BARBOSA, José (2015). « Self-organized and evolvable holonic architecture for manufacturing control ». Thèse de doct. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- BAUD-LAVIGNE, Bertrand, Samuel BASSETTO et Bernard PENZ (2010). « A broader view of the economic design of the X-bar chart in the semiconductor industry ». In : *International Journal of Production Research* 48.19, p. 5843-5857.
- BEAN, John Wellard (1997). « Variation reduction in a wafer fabrication line through inspection optimization ». Thèse de doct. Massachusetts Institute of Technology.
- BETTAYEB, Belgacem (2012). « Conception et évaluation des plans de surveillance basés sur le risque. Limitation des incertitudes qualité avec des ressources limitées de maîtrise ». Thèse de doct. Grenoble.
- BILL, Lydon (2016). « ORGIndustry 4.0 : Intelligent and flexible productionDigitization ». In.
- BILLAUT, Jean-Charles, Aziz MOUKRIM et Eric SANLAVILLE (2013). *Flexibility and robustness in scheduling*. John Wiley & Sons.
- BISCHOFF, Rainer et Tim GUHL (2010). « The strategic research agenda for robotics in europe [industrial activities] ». In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 17.1, p. 15-16.
- BØGH, Simon et al. (2011). « Autonomous industrial mobile manipulation (AIMM) : from research to industry ». In : *Proceedings of the 42nd International Symposium on Robotics*. VDE Verlag GMBH, p. 1-9.

- BONOMI, Flavio et al. (2012). « Fog computing and its role in the internet of things ». In : *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*. ACM, p. 13-16.
- BOUAZIZ, Mohammed Farouk (2012). « Contribution à la modélisation Bayésienne de l'état de santé d'un système complexe : application à l'industrie du semi-conducteur ». Thèse de doct. Grenoble.
- BOUDHAR, Hamza, Mohammed DAHANE et Nidhal REZG (2014). « New dynamic heuristic for the optimization of opportunities to use new and remanufactured spare part in stochastic degradation context ». In : *Journal of Intelligent Manufacturing*, p. 1-18.
- BOUSETTA, Ali et Andrew J CROSS (2005). « Adaptive sampling methodology for in-line defect inspection ». In : *Advanced semiconductor manufacturing conference and workshop, 2005 IEEE/SEMI*. IEEE, p. 25-31.
- BOUZARKOUNA, Imen et al. (2018). « Challenges facing the industrial implementation of Fog Computing ». In : *2018 IEEE 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*. IEEE, p. 341-348.
- BRAAM, H et T W VERBRUGGEN (2000). « R & D NEEDS FOR O & M OF WIND TURBINES ». In.
- BRAUN, Rudolf et Arthur WELLINGER (2003). « Potential of co-digestion ». In : *IEA Bioenergy, Task. T. 37*.
- BRENNAN, Feargal (2013). « Risk based maintenance for offshore wind structures ». In : *Procedia CIRP 11*, p. 296-300.
- BUNDAY, B. et al. (2007). « Value-Added Metrology ». In : *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on 20.3*, p. 266 -277.
- BURTON, Tony et al. (2011a). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- (2011b). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- BYON, Eunshin et al. (2011a). « Simulation of wind farm operations and maintenance using discrete event system specification ». In : *Simulation 87.12*, p. 1093-1117.
- (2011b). « Simulation of wind farm operations and maintenance using discrete event system specification ». In : *Simulation 87.12*, p. 1093-1117.
- CHEN, Rui-Yang (2017). « An intelligent value stream-based approach to collaboration of food traceability cyber physical system by fog computing ». In : *Food Control 71*, p. 124-136.
- CHESHMEHGAZ, H.R. et al. (2012). « Accumulated Risk of Body Postures in Assembly Line Balancing Problem and Modeling through a Multi-Criteria Fuzzy-Genetic Algorithm ». In : *Computers & Industrial Engineering 62.2*, p. 503-512.
- CHIANG, Mung et Tao ZHANG (2016). « Fog and IoT : An overview of research opportunities ». In : *IEEE Internet of Things Journal 3.6*, p. 854-864.
- CHING, Tuan-Yee et Joseph FERREIRA (2015). « Smart cities : Concepts, perceptions and lessons for planners ». In : *Planning support systems and smart cities*. Springer, p. 145-168.
- CHRISTOPHER, Martin (2016). *Logistics & supply chain management*. Pearson UK.
- CIDRÁS, J, JLG DORNELAS et al. (1999). « Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems ». In : *Energy conversion, iee transactions on 14.4*, p. 1582-1588.
- CLODIC, Aurelie (2007). « Supervision pour un robot interactif : Action et Interaction pour un robot autonome en environnement humain ». Thèse de doct. Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- COLLEDANI, Marcello (2008). « Integrated analysis of quality and production logistics performance in asynchronous manufacturing lines ». In : *IFAC Proceedings Volumes 41.2*, p. 8368-8374.

- COLLEDANI, Marcello et Tullio TOLIO (2009). « Performance evaluation of production systems monitored by statistical process control and off-line inspections ». In : *International Journal of Production Economics* 120.2, p. 348-367.
- COMPUTING, Fog (2016). *the Internet of Things : Extend the Cloud to Where the Things Are*.
- CONSTANT-MENEY, Vincent et al. (2017). « VALORISATION DES BIODECHETS CONDITIONNES : PROGRAMMATION LINEAIRE POUR L'OPTIMISATION DES FLUX DE MATIERE ORGANIQUE HYGIENISEE ». In : *Confere 2017 ; 24ème colloque des Sciences de la conception et de l'innovation*.
- DASTJERDI, Amir Vahid et al. (2016). « Fog computing : Principles, architectures, and applications ». In : *arXiv preprint arXiv :1601.02752*.
- DAVIDSSON, Simon, Mikael HÖÖK et Göran WALL (2012). « A review of life cycle assessments on wind energy systems ». In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17.6, p. 729-742.
- DE BRITO, Mathias Santos et al. (2016). « Towards programmable fog nodes in smart factories ». In : *Foundations and Applications of Self* Systems, IEEE International Workshops on*. IEEE, p. 236-241.
- DEVISE, Olivier (1995). « Modélisation orientée objet de la transitique dans un environnement FMS ». In : *Revue d'automatique et de productique appliquées* 8.2-3, p. 479-484.
- DIMEAS, Aris L et Nikos D HATZIARGYRIOU (2005). « Operation of a multiagent system for microgrid control ». In : *IEEE Transactions on Power systems* 20.3, p. 1447-1455.
- ELFES, Alberto (1997). « Incorporating spatial representations at multiple levels of abstraction in a replicated multilayered architecture for robot control ». In : *Intelligent Robots—Sensing, Modeling And Planning*. World Scientific, p. 249-266.
- EVANS, Dave (2011). « The internet of things : How the next evolution of the internet is changing everything ». In : *CISCO white paper* 1.2011, p. 1-11.
- EY (2019). *Les Cinq Défis De L'industrie Du Futur*. URL : <https://www.smart-industries.fr/fr/les-cinq-defis-de-lindustrie-du-futur>.
- FATTAHI, Parviz, Mohammad Saidi MEHRABAD et Fariborz JOLAI (2007). « Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems ». In : *Journal of intelligent manufacturing* 18.3, p. 331-342.
- GATTORNA, John (2015). *Dynamic supply chains*. Pearson Education Limited.
- GAZIS, Vangelis et al. (2015). « Components of fog computing in an industrial internet of things context ». In : *Sensing, Communication, and Networking-Workshops (SECON Workshops), 2015 12th Annual IEEE International Conference on*. IEEE, p. 1-6.
- HAU, Erich et Horst VON RENOARD (2013). *Wind turbines : fundamentals, technologies, application, economics*. Springer.
- HE, Danping et al. (2015). « Modelling and planning reliable wireless sensor networks based on multi-objective optimization genetic algorithm with changeable length ». In : *Journal of Heuristics* 21.2, p. 257-300.
- HE, Naihui (2011). « Agent-based Hierarchical Planning and Scheduling Control in Dynamically Integrated Manufacturing System ». In.
- HENDERSON, Andrew R et al. (2003). « Offshore wind energy in Europe—a review of the state-of-the-art ». In : *Wind Energy : An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology* 6.1, p. 35-52.
- HERMANN, Mario, Tobias PENTEK et Boris OTTO (2016). « Design principles for industrie 4.0 scenarios ». In : *System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on*. IEEE, p. 3928-3937.

- HIGHTOWER, Mike et Suzanne A PIERCE (2008). « The energy challenge ». In : *Nature* 452.7185, p. 285.
- HOLMBERG, Kenneth et al. (2010). *E-maintenance*. Springer Science & Business Media.
- HORIZON-2020 (2018). « Work Programme 2018–2020, Secure, Clean and Efficient Energy ». In : (*European Commission Decision C(2018)4708 of 24 July 2018*).
- HSU, Lie-Fern et Charles S TAPIERO (1989). « Quality control of the M/G/1 queue ». In : *European journal of operational research* 42.1, p. 88-100.
- HVILSHØJ, Mads et al. (2012). « Multiple part feeding–real-world application for mobile manipulators ». In : *Assembly Automation* 32.1, p. 62-71.
- HYERS, RW et al. (2006). « Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines ». In : *Energy Materials* 1.3, p. 187-203.
- INTELLIGENCE, SRI Consulting Business (2008). « Disruptive civil technologies ». In : *Six technologies with potential impacts on US interests out to 2025*.
- JASPERNEITE, Jürgen, Arne NEUMANN et Florian PETHIG (2015). « OPC UA versus MTConnect ». In : *Computer&Automation (Sonderheft S2 2015 Control&Drives) S*, p. 16-21.
- KACEM, Imed, Slim HAMMADI et Pierre BORNE (2002). « Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 32.1, p. 1-13.
- KALLEN, Maarten-Jan et Jan M van NOORTWIJK (2005). « Optimal maintenance decisions under imperfect inspection ». In : *Reliability engineering & system safety* 90.2-3, p. 177-185.
- KALOGIROU, Soteris A (2003). « Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes : a review ». In : *Progress in Energy and Combustion Science* 29.6, p. 515-566.
- KARKI, R et J PATEL (2009). « Reliability assessment of a wind power delivery system ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 223.1, p. 51-58.
- KIM, Jongyoon et Stanley B GERSHWIN (2005). « Integrated quality and quantity modeling of a production line ». In : *OR spectrum* 27.2-3, p. 287-314.
- KINUGAWA, Jun, Yusuke SUGAHARA et Kazuhiro KOSUGE (2016). « Co-worker robot "PaDY" ». In : *Acta Polytechnica Hungarica* 13.1, p. 209-221.
- KOOIJMAN, HJT et al. (2003). « DOWEC 6 MW pre-design ». In : *Energy Research Center of the Netherlands (ECN)*.
- KOREN, Yoram et al. (1999). « Reconfigurable manufacturing systems ». In : *CIRP annals* 48.2, p. 527-540.
- KUMAR, N et al. (2006). « A review of yield modelling techniques for semiconductor manufacturing ». In : *International Journal of Production Research* 44.23, p. 5019-5036.
- LARABI, Mohand (déc. 2010). « Job-shop with transport : its modelling and optimisation ». Theses. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00625528>.
- LASI, Heiner et al. (2014). « Industry 4.0 ». In : *Business & Information Systems Engineering* 6.4, p. 239-242.
- LASOTA, Przemyslaw A, Gregory F ROSSANO et Julie A SHAH (2014). « Toward safe close-proximity human-robot interaction with standard industrial robots ». In.
- LEE, Jay, Behrad BAGHERI et Hung-An KAO (2015). « A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems ». In : *Manufacturing Letters* 3, p. 18-23.

- LEITÃO, Paulo et Francisco RESTIVO (2006). « ADACOR : A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control ». In : *Computers in industry* 57.2, p. 121-130.
- LIAO, Shu-Hsien (2005). « Expert system methodologies and applications—a decade review from 1995 to 2004 ». In : *Expert systems with applications* 28.1, p. 93-103.
- LIAO, Yongxin et al. (2017). « The role of interoperability in the fourth industrial revolution era ». In : *IFAC-PapersOnLine* 50.1, p. 12434-12439.
- LINDSAY, Glenn F et Albert B BISHOP (1964). « Allocation of screening inspection effort—a dynamic-programming approach ». In : *Management Science* 10.2, p. 342-352.
- LIYANAGE, Jayantha P (2008). « Integrated e-operations-e-maintenance : Applications in north sea offshore assets ». In : *Complex system maintenance handbook*. Springer, p. 585-609.
- MACCARTHY, Bart L, John R WILSON et S CRAWFORD (2001). « Human performance in industrial scheduling : a framework for understanding ». In : *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries* 11.4, p. 299-320.
- MARKAKIS, Evangelos K et al. (2017). « EXEGESIS : Extreme Edge Resource Harvesting for a Virtualized Fog Environment ». In : *IEEE Communications Magazine* 55.7, p. 173-179.
- MARTINEZ, E et al. (2009). « Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine ». In : *Renewable Energy* 34.3, p. 667-673.
- MAZAR, Merouane et al. (2017). « Simulation et optimisation de la tournée des véhicules pour la collecte de biodéchets conditionnés ». In : *Confere 2017 ; 24ème colloque des Sciences de la conception et de l'innovation*.
- MENA, S Ben (2000). « Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision ». In : *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 4.2, p. 83-93.
- MILI, Aymen et al. (2009). « Dynamic risk management unveils productivity improvements ». In : *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22.1, p. 25-34.
- MOLETTA, René (2008). *La méthanisation*. Tec et Doc.
- MOULI, Chandra et Michael J SCOTT (2007). « Adaptive metrology sampling techniques enabling higher precision in variability detection and control ». In : *Advanced semiconductor manufacturing conference, 2007. ASMC 2007. IEEE/SEMI*. IEEE, p. 12-17.
- MUKHERJEE, Mithun et al. (2017). « Security and Privacy in Fog Computing : Challenges ». In : *IEEE Access*.
- MÜLLER, Jörg P et Klaus FISCHER (2014). « Application impact of multi-agent systems and technologies : a survey ». In : *Agent-oriented software engineering*. Springer, p. 27-53.
- NIELSEN, Jannie Jessen et John Dalsgaard SØRENSEN (2011). « On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components ». In : *Reliability Engineering & System Safety* 96.1, p. 218-229.
- NILSSON, J. et L. BERTLING (2007). « Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems ; Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies ». In : *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 22.1, p. 223-229. ISSN : 0885-8969. DOI : [10.1109/TEC.2006.889623](https://doi.org/10.1109/TEC.2006.889623).
- OSANAIYE, Opeyemi et al. (2017). « From cloud to fog computing : A review and a conceptual live VM migration framework ». In : *IEEE Access*.
- OWEE, CA et Garrad HASSAN (2001). « Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe ». In : *Delft University of Technology, Tractebel Energy Engineering, Risoe National Laboratory, Netherlands*.

- PACH, Cyrille (2013). « ORCA : Architecture hybride pour le contrôle de la myopie dans le cadre du pilotage des Systèmes Flexibles de Production ». Thèse de doct. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis.
- PAN, J.C.H. et D.H.E. TAI (2011). « A new strategy for defect inspection by the virtual inspection in semiconductor wafer fabrication ». In : *Computers & Industrial Engineering* 60.1, p. 16-24.
- PÉREZ, M et al. (2010). « Optimal maintenance system for offshore wind turbines ». In : *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10). Granada (Spain), 23th to 25th March*.
- PERVEEN, Rehana, Nand KISHOR et Soumya R MOHANTY (2014). « Off-shore wind farm development : Present status and challenges ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, p. 780-792.
- PIETERMAN, RP Van de et al. (2011). « Optimisation of maintenance strategies for offshore wind farms ». In : *The offshore 2011 conference*.
- PILLET, Maurice (1995). « Appliquer la maîtrise statistique des processus ». In : *Éditions d'Organi*.
- PILLET, Maurice et al. (2007). « La matrice d'impact pour construire un plan de surveillance avec les contraintes de l'ingénierie simultanée. » In : *5th International Seminar Integrated Design and Production, NC*.
- PINEDA, Iván et al. (2014). « Wind in power : 2013 European statistics ». In : *The European Wind Energy Association, Last accessed Jan 8, p. 2015*.
- PUJO, Patrick, Nicolas BROISSIN et Fouzia OUNNAR (2009). « PROSIS : An isoarchic structure for HMS control ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.7, p. 1034-1045.
- PUJO, Patrick et Fouzia OUNNAR (2007). « Vers une approche holonique des Systèmes Mécatroniques Complexes : proposition d'un système de pilotage auto organisé et isoarchique ». In : *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)* 41.6, p. 673-706.
- PURDY, Matthew (2007). « Dynamic, weight-based sampling algorithm ». In : *Semiconductor Manufacturing, 2007. ISSM 2007. International Symposium on*. IEEE, p. 1-4.
- RADEMAKERS, LWMM et al. (2003). « Assessment and optimisation of operation and maintenance of offshore wind turbines ». In : *Proc. EWEC*.
- RAVINDRAN, Rajeev et Amit Kumar JAISWAL (2016). « A comprehensive review on pre-treatment strategy for lignocellulosic food industry waste : challenges and opportunities ». In : *Bioresource technology* 199, p. 92-102.
- SAHNOUN, M. et al. (2012). « Smart sampling for risk reduction and delay optimisation ». In : *International System Conference (SYSCON), 2012*. IEEE, p. 1-6.
- SAHNOUN, M et al. (2014a). « Modelisation d'un plan de maintenance basee sur les systemes multi-agents pour leseoliennes offshore ». In.
- SAHNOUN, M'hammed et al. (2014b). « MODELLING OF MAINTENANCE STRATEGY OF OFFSHORE WIND FARMS BASED MULTI-AGENT SYSTEM ». In : *CIE44 & ISSM14 (44th International Conference On Computers & Industrial Engineering & 9th International Symposium On Intelligent Manufacturing And Service Systems)*. 591, p. 2406-2420.
- SATURNO, Maicon et al. (2017). « Evaluation of interoperability between automation systems using multi-criteria methods ». In : *Procedia Manufacturing* 11, p. 1837-1845.
- SCHNEIER, Michael, Michael SCHNEIER et Roger BOSTELMAN (2015). *Literature review of mobile robots for manufacturing*. US Department of Commerce, National Institute of Standards et Technology.

- SHAFIQ, Syed Imran et al. (2015). « Virtual engineering object/virtual engineering process : a specialized form of cyber physical system for Industrie 4.0 ». In : *Procedia Computer Science* 60, p. 1146-1155.
- SHANOUN, M. et al. (2011). « Optimisation of the process control in a semiconductor company : model and case study of defectivity sampling ». In : *International Journal of Production Research* 49.13, p. 3873-3890.
- SHEN, Xiao-Ning et Xin YAO (2015). « Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems ». In : *Information Sciences* 298, p. 198-224.
- SHERWIN, David (2000). « A review of overall models for maintenance management ». In : *Journal of quality in maintenance engineering* 6.3, p. 138-164.
- SIMARIA, A.S. et P.M. VILARINHO (2004). « A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II ». In : *Computers & Industrial Engineering* 47.4, p. 391-407.
- SOBEL, William (2015). « MTConnect standard. Part 1—overview and protocol ». In : *Standard—MTConnect*. <http://www.mtconnect.org/standard>. Accessed 10.
- SOURISSE, C (1995). « L'élaboration des cahiers des charges des équipements de production industriels : La transitique : automatiser flux et procédés ». In : *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique* 6, p. 18-22.
- STOJIMENOVIC, Ivan et Sheng WEN (2014). « The fog computing paradigm : Scenarios and security issues ». In : *Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2014 Federated Conference on*. IEEE, p. 1-8.
- SU, A.J., C.C. YU et B.A. OGUNNAIKE (2008). « On the interaction between measurement strategy and control performance in semiconductor manufacturing ». In : *Journal of Process Control* 18.3, p. 266-276.
- TAKAHARA, S. et S. MIYAMOTO (1999). « Adaptive algorithms of metaheuristics with application to optimal allocation problems ». In : *Systems, Man, and Cybernetics, 1999. IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*. T. 3. IEEE, p. 545-550.
- TAVNER, Peter (2012). « Offshore Wind Turbine Reliability ». In.
- TAYLOR, James H et Atalla F SAYDA (2008). « Prototype design of a multi-agent system for integrated control and asset management of petroleum production facilities ». In : *2008 American Control Conference*. IEEE, p. 4350-4357.
- THORNTON, Edward B et RT GUZA (1983). « Transformation of wave height distribution ». In : *Journal of Geophysical Research : Oceans (1978–2012)* 88.C10, p. 5925-5938.
- TISUE, Seth et Uri WILENSKY (2004). « Netlogo : A simple environment for modeling complexity ». In : *International Conference on Complex Systems*, p. 16-21.
- TIXIER, Jerome et al. (2002). « Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants ». In : *Journal of Loss Prevention in the process industries* 15.4, p. 291-303.
- TONY, Burton (2001). *Wind energy handbook*.
- TRACHT, Kirsten, Jan WESTERHOLT et Peter SCHUH (2013). « Spare Parts Planning for Offshore Wind Turbines Subject to Restrictive Maintenance Conditions ». In : *Procedia CIRP* 7, p. 563-568.
- TRENTESAUX, Damien (2009). « Distributed control of production systems ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22.7, p. 971-978.
- VAN BRUSSEL, Hendrik et al. (1998). « Reference architecture for holonic manufacturing systems : PROSA ». In : *Computers in industry* 37.3, p. 255-274.
- VERDUZCO, Adan, J Rene VILLALOBOS et Benjamin VEGA (2001). « Information-based inspection allocation for real-time inspection systems ». In : *Journal of Manufacturing Systems* 20.1, p. 13.

- VERNIER, Philippe THAUVIN Antoine (2013). « RÉDUIRE, TRIER ET VALORISER LES BIODÉCHETS DES GROS PRODUCTEURS : guide pratique ». In : ADEME.
- VIJAYARAGHAVAN, Athulan et al. (2008). « Improving machine tool interoperability using standardized interface protocols : MT connect ». In.
- VILLALOBOS, J Rene, Joseph W FOSTER et Ralph L DISNEY (1993). « Flexible inspection systems for serial multi-stage production systems ». In : *IIE transactions* 25.3, p. 16-26.
- WAN, Jiafu, Hu CAI et Keliang ZHOU (2015). « Industrie 4.0 : enabling technologies ». In : *Intelligent Computing and Internet of Things (ICIT), 2014 International Conference on*. IEEE, p. 135-140.
- WANG, Kesheng (2003). *Intelligent condition monitoring and diagnosis systems : a computational intelligence approach*. T. 93. IOS press.
- XING, Li-Ning, Ying-Wu CHEN et Ke-Wei YANG (2009). « Multi-objective flexible job shop schedule : Design and evaluation by simulation modeling ». In : *Applied Soft Computing* 9.1, p. 362-376.
- ZAFER, Mostefa, Mustapha Reda SENOUCI et Mohamed AISSANI (2018). « Terrain Partitioning Based Approach for Realistic Deployment of Wireless Sensor Networks ». In : *Computational Intelligence and Its Applications : 6th IFIP TC 5 International Conference, CIIA 2018, Oran, Algeria, May 8-10, 2018, Proceedings* 6. Springer, p. 423-435.
- ZANDER, Jens et Petri MÄHÖNEN (2013). « Riding the data tsunami in the cloud : myths and challenges in future wireless access ». In : *IEEE Communications Magazine* 51.3, p. 145-151.
- ZANDIEH, M, I MAHDAVI et A BAGHERI (2008). « Solving the flexible job-shop scheduling problem by a genetic algorithm ». In.
- ZHOU, Wei, Hongxing YANG et Zhaohong FANG (2006). « Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China ». In : *Renewable Energy* 31.6, p. 739 -753. ISSN : 0960-1481. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.006>.