

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique et Électronique

Filière Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la production



Projet de Fin d'Étude de Master

Intitulé :

**Simulation d'un système de Production dans un
contexte industrie 4.0 avec des contraintes écologiques**

Présenté par :

MECHAACHA Abdelkader

Soutenue, le 30/09/2020, devant le jury composé de :

KHEDIM Amaria	Université de Tlemcen	MCB	Présidente
BELKAID Fayçal	Université de Tlemcen	MCA	Encadrant
BENSMACHINE Nardjes	Université de Tlemcen	MCB	Co-Encadrant
MEGHELLI Nihed	Université de Tlemcen	MCB	Examinatrice

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement :

Remerciement :

Je remercie tout d'abord «ALLAH» de m'avoir donné le courage d'entamer et de finir ce travail dans de bonnes conditions.

Je remercie vivement les membres de jury. Mme KHEDIM Amaria et Mme MEGHELLI Nihed. D'avoir accepté de rapporter et d'examiner mon travail. Merci pour vos questions et commentaires.

Je remercie également mon encadreur Mr. BELKAID Fayçal et ma Co-encadreur Mme BENSMAINE Nardjess pour votre qualité scientifique et humaine, pour votre indéfectible disponibilité et la confiance que vous m'avez accordée au cours de l'élaboration de ce mémoire. Merci pour votre suivi constant malgré l'endiguement et les problèmes liés à la pandémie de covid19.

Je souhaite également remercier tous les enseignants qui ont bien voulu répondre à mes différentes questions, dans le but de permettre la facilité de l'élaboration de ce travail.

Enfin, mes remerciements les plus sincères à tous mes parents et amis, qui m'ont toujours encouragé, soutenu et aidé au cours des cinq dernières années du programme de maîtrise.

Merci à vous tous et à tous ceux qui m'ont encouragé à aller jusqu'au bout de ce travail.

Table des Matières	
Remerciement :	2
Table des Matières	3
Table des figures	6
Table des tableaux	7
Introduction Générale	8
1 Chapitre 01 : Industrie 4.0	11
1.1 Introduction	12
1.2 Historique	12
1.3 Définition	13
1.4 Internet industriel et L'industrie 4.0.....	14
1.4.1 Définition d'Internet industriel.....	14
1.5 Les composantes de l'industrie 4.0	15
1.5.1 Système cyber-Physique (CPS)	15
1.5.2 Internet des Objets (IoT).....	16
1.5.3 Internet des Services (IoS).....	16
1.5.4 Usine intelligente	17
1.6 Les piliers de l'industrie 4.0	19
1.6.1 Pourquoi maintenant ?	20
1.6.2 Miniaturisation.....	20
1.6.3 Big Data et l'analyse avancée	21
1.6.3 Le nuage et le brouillard	22
1.6.4 Les smartphones.....	24
1.6.5 Simulation.....	24
1.6.6 Réalité augmentée (RA).....	25
1.6.7 Technologie sans fil	26
1.6.8 L'apprentissage machine à machine (M2M) et l'intelligence artificielle (IA)	30
1.6.9 Impression 3D.....	31
1.7 L'architecture de communication.....	31
1.8 Exemples Réel d'industrie 4.0	33
1.9 L'Algérie et l'industrie 4.0.....	35
1.9.1 L'industrie de pétrole et du gaz	35
1.9.2 Les PME.....	36
1.10 Conclusion	37

2	Chapitre 02 : Les Méta-heuristiques.....	39
2.1	Introduction	40
2.2	Les problèmes d’optimisations.....	40
2.2.1	Classification des problèmes d’optimisation	40
2.2.2	Optimisation mono-objectif et Multi-objectif.....	41
2.3	Les Méta-heuristiques	44
2.3.1	Les algorithmes génétiques (AG)	44
2.3.2	Recherche tabou.....	46
2.3.3	Colonies de fourmis	47
2.3.4	Essaims particuliers.....	48
2.3.5	Recuit simulé (RS).....	49
2.4	Conclusion.....	51
3	Chapitre 03 : Le dimensionnement des lots.....	53
3.1	Introduction	54
3.2	Problème de dimensionnement des lots d’une seule gamme de produit (SILSP)	55
3.2.1	Modèle Mathématique	55
3.3	Caractéristiques des modèles de dimensionnement des lots	58
3.3.1	Horizon de planification	58
3.3.2	Nombre de niveaux	58
3.3.3	Nombre d’établissements (usines).....	59
3.3.4	Contraintes de capacité ou de ressources.....	59
3.3.5	Détérioration des produits.....	59
3.3.6	Demande	59
3.3.7	Structure de lancement de la production.....	60
3.3.8	Rupture de stock	60
3.3.9	Remise à neuf (re-fabrication)	60
3.4	Méthodes de résolution	60
3.5	Conclusion.....	61
4	Chapitre 04 : Partie prédictive	62
4.1	Introduction	63
4.2	Description du problème	64
4.2.1	Modèle Mathématique	65
4.3	Résolution de problème.....	73
4.3.1	Solveur (CPLEX).....	73

4.3.2	Résultat	74
4.3.3	Méta-heuristique (Recuit Simulé)	74
4.3.4	Résultat	75
4.3.5	Comparaison entre CPLEX et RS.....	75
4.4	Conclusion.....	76
5	Chapitre 05 : Partie réactive	78
5.1	Introduction	79
5.2	Génération d'électricité	81
5.2.1	Énergie traditionnelle.....	81
5.2.2	Énergie Renouvelable	83
5.3	Description de problème	85
5.4	Programme et interfaces.....	88
5.5	Conclusion.....	89
6.	Conclusion Générale et perspective	91
	Références.....	93
	Résumé :.....	100
	Appendice A : Programme de déclaration des données en CPLEX.	101
	Appendice B : Programme de déclaration des données en JAVA.....	102

Table des figures

Figure 1-1 : L'usine intelligente et ses composantes. (Gilchrist, 2016)	17
Figure 1-2 : Un système de production 3.0. (Dittes).....	18
Figure 1-3 Un système de production 4.0. (Dittes).....	19
Figure 1-4 La taille de caméra OV6948 par rapport au doigt d'un humain.	21
Figure 1-5 Différence entre un interrupteur magnétique et un nouveau interrupteur.	21
Figure 1-6 : Une image d'un travailleur « pick-by-paper » dans un stock de DHL qui utilise le Google Glass pour lui indiquer quel article à prélever. (digirupt.io, s.d.).....	26
Figure 1-7 Représente un satellite spaceX. (Starlink, s.d.).....	29
Figure 1-8 Un travailleur dans l'usine WITTENSTEIN bastian. (Schlick, Stephan, Loskyll, & Lappe, 2014).....	33
Figure 1-9 Un travailleur dans l'usine de General Electrics.	34
Figure 1-10 Une photo d'usine EWA de Siemens.	35
Figure 2-1 représentation graphique du principe de la méthode d'agrégation. (Hafid, 2013)	43
Figure 2-2 : Pseudo code de l'algorithme génétique.....	46
Figure 2-3 : pseudo code de l'algorithme de la recherche tabou.	47
Figure 2-4 : présente une illustration de la procédure suivie par les fourmis pour aller chercher de la nourriture.	47
Figure 2-5 : représente le pseudo code de la progression d'une fourmi.	48
Figure 2-6 : les étapes de l'algorithme d'Essaims particulaires.....	49
Figure 2-7 : Pseudo code de l'algorithme de recuit simulé (Reynès, 2007)	50
Figure 4-1 : une carte du monde indiquant les pays participant à la tarification nationale et/ou internationale du carbone. (Vox, s.d.).....	64
Figure 4-2 : le taux d'émission de chaque source d'électricité en g-CO ₂ /KWh (pris de (Abdallah & El-Shennawy, 2013)).	72
Figure 4-3 : Le plan de production sans considération des frais d'énergie.....	73
Figure 4-4 : Le plan de production avec considération des frais d'énergie.	73
Figure 4-5 : courbe de changement de la fonction objectif et l'émission de GES dans différentes valeurs de <i>Lim</i>	74
Figure 5-1 : Sites solaires favorables dans le monde et la carte de l'Algérie située dans la zone solaire du milieu du monde. (Stambouli, 2011)	80
Figure 5-2 : L'exposition quotidienne globale reçue (en kWh/m ² /jour) en Algérie. (Stambouli, 2011)	80
Figure 5-3 : Cartographie des vents de l'Algérie. (Stambouli, 2011)	80
Figure 5-4 : Schéma d'un moteur à turbine à gaz. (Energy Education, s.d.).....	82
Figure 5-5 : Le principe de fonctionnement d'un panneau solaire. (hello watt, s.d.) .	84
Figure 5-6 : Le principe de fonctionnement d'une éolienne. (ECO Infos, s.d.)	85
Figure 5-7 : Représentation d'interaction entre les agents.....	88
Figure 5-8 : Interface de l'agent intermédiaire	89
Figure 5-9 : Interface de l'agent de l'énergie traditionnelle	89
Figure 5-10 : Interface de l'agent de l'énergie solaire	89
Figure 5-11 : Interface de l'agent de l'énergie éolienne	89

Table des tableaux

Tableau 1-1 Une comparaison entre SigFox et LoRaWAN. (Gilchrist, 2016).....	30
Tableau 2-1 Les différentes bases de classification et leurs catégories (Belkaid, 2014)	40
Tableau 4-1 : Données concernant le temps de l'instance N3_T5	71
Tableau 4-2 : Données concernant la machine de l'instance N3_T5	71
Tableau 4-3 : Options de contrat.....	71
Tableau 4-4 : Les résultats de simulation sur CPLEX avec changement de paramètre Lim.	74
Tableau 4-5 : Les résultats de simulation de la méta-heuristique RS sur Java avec changement de paramètre Lim.	75
Tableau 4-6 : Les résultats de performance de CPLEX pour différentes tailles d'instances.....	76
Tableau 5-1 : Résultats des essais sur le rendement de la turbine à gaz GE 7F.05 à différentes températures ambiantes.....	82
Tableau 5-2 : Température moyenne à Oran par mois et performance de la turbine.	83
Tableau 5-3 : Le rôle de chaque agent.....	86

Introduction Générale

Aujourd'hui le monde industriel est confronté à deux événements décisifs, la nouvelle révolution industrielle appelée aussi Industrie 4.0, et l'intérêt croissant-surtout dans la dernière décennie- à la production et la consommation durable puisque l'impact environnemental des activités industrielles est bien claires et important.

Des questions sont de plus en plus posées sur les résultats générés de cette confrontation et sur le chemin que l'industrie 4.0 va prendre par rapport à ses prédécesseurs. En effet, les effets des autres révolutions industrielles sur l'environnement sont presque incurables. Ainsi, avec la mauvaise utilisation des technologies de l'industrie 4.0, les dégâts risquent de devenir catastrophiques s'ils ne sont pas déjà.

Au milieu de cette tempête des questions et des doutes, certaines personnes affirment d'avoir une opinion impopulaire disant que ce n'est pas le cas pour cette révolution industrielle, comme dans le travail de (Dubey, Rameshwar, Gunasekaran, Childe, & Pa, 2017) qui ont argumenté que le *BIG DATA* et le *PREDECTIVE ANALYTICS*, qui font partie des technologies de l'industrie 4.0, peuvent améliorer significativement la performance environnementale et même sociale.

Alors, ces personnes ont-ils raison de dire que l'industrie 4.0 peut et va sauver la terre ? L'industrie 4.0 est-elle un héros ? Ou un vilain ?

Dans le cadre de la réponse à cette question, nous avons travaillé sur un cas d'utilisation de l'industrie 4.0 où nous essayons d'utiliser les technologies et méthodes de l'industrie 4.0 pour résoudre un problème d'optimisation industrielle de dimensionnement des lots avec des contraintes écologiques.

L'objectif était non seulement de prouver que l'industrie 4.0 peut améliorer les performances environnementales, mais aussi réduire significativement les coûts de production.

Organisation du mémoire :

Ce travail est divisé en 5 chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous abordons le sujet de l'industrie 4.0 en général. Nous définissons le terme, ses concepts de base et les principales technologies qui le sous-tendent. Nous mentionnons également quelques exemples réels de cette nouvelle vision de la production.
- Le deuxième chapitre sera consacré aux métaheuristiques. Nous présentons le principe derrière quelques métaheuristiques qui sont célèbres puis nous focalisons sur la métaheuristique de recuit simulé comme elle nous a servi dans ce travail.
- Le troisième chapitre est consacré aux problèmes de dimensionnement des lots.
- Le quatrième chapitre est dédié à la présentation de la première partie de notre travail, qui consiste à résoudre un problème de dimensionnement des lots.

Introduction Générale

- Le cinquième et dernier chapitre concerne la deuxième partie de notre travail qui consiste en la création d'un système multi-agents pour résoudre le problème de la fluctuation de l'énergie.

Chapitre 01 :

Industrie 4.0

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le concept "d'industrie 4.0" d'une manière générale en nous concentrant sur les parties qui nous intéressent le plus. Nous commençons par l'histoire du concept, puis nous définissons le terme et le comparons à un terme similaire qui est "Internet industriel", après cela nous présentons les principes de l'industrie 4.0. Nous introduisons également les principales technologies à l'origine du succès du terme et l'architecture de communication. Nous terminons en donnant quelques exemples réels d'usines intelligentes et en présentant la position de l'Algérie concernant cette nouvelle révolution.

1.2 Historique

Depuis son introduction en 2011, le terme « industrie 4.0 » est devenu une tendance qui s'est et s'accroîtra -probablement- au cours du temps dans le domaine industriel ainsi que les recherches académiques. Le terme « industrie 4.0 » ou « l'industrie de futur » joue un rôle stratégique dans la digitalisation de toutes les étapes des systèmes de production et de service. Le « 4 », c'est pour marquer cette quatrième révolution industrielle. Les autres trois révolutions ont duré presque 200 ans. (Drath & Horch, 2014)

La première révolution industrielle a commencé en début du XVIIIe siècle grâce à l'utilisation de la vapeur et à la mécanisation de la production. Les machines à vapeur ont remplacé les anciens systèmes, la version mécanisée a atteint huit fois le volume en même temps. Des développements tels que le bateau à vapeur ou (environ 100 ans plus tard) la locomotive à vapeur ont entraîné de nouveaux changements massifs car les humains et les marchandises pouvaient parcourir de grandes distances en moins de temps. (Desoutter Industrial Tools, s.d.)

La deuxième révolution industrielle a commencé au XXe siècle par l'introduction de la production d'électricité et de chaînes de montage. Henry Ford (1863-1947) a pris l'idée de la production de masse dans un abattoir de Chicago, et il l'a appliquée dans l'assemblage des automobiles en la modifiant radicalement. Alors qu'auparavant une station assemblait une automobile entière, les véhicules étaient maintenant produits en étapes partielles sur le tapis roulant - beaucoup plus rapidement et à moindre coût. Ce qui a introduit la production de masse. (Desoutter Industrial Tools, s.d.)

La troisième révolution industrielle a commencé dans les années 70 du XXe siècle par l'automatisation partielle dans les usines en utilisant les automates programmables industriels (API), les robots, les machines à commande numérique et les ordinateurs. Depuis l'introduction de ces technologies, nous sommes désormais en mesure d'automatiser quelque processus de production, sans assistance humaine (Desoutter Industrial Tools, s.d.). Mais l'automatisation a resté toujours partielle car l'homme n'était pas capable -ou n'avait pas l'intérêt- d'automatiser quelque processus ou tâches, et les machines n'avaient pas la capacité d'échange d'informations entre eux.

Depuis son introduction, il y avait des sceptiques sur cette apparition de quatrième révolution industrielle, comme dans le travail « *Industrie 4.0 : Hit or Hype ?* » appartenant à (Drath & Horch, 2014) qui ont discuté la question si l'industrie 4.0 était une réalité ou juste un mythe. Les deux auteurs ont fini par être convaincus que l'industrie 4.0 est probablement une « *Hit* » -une réalité-, à condition que toutes les

parties concernées collaborent entre eux pour surmonter les défis. À la fin du débat, les deux auteurs soulignent que la question n'est plus sur « si » mais « quand » va l'industrie 4.0 arrive au secteur industriel ?

Cette idée que le future n'est plus loin devant, inculque un peu de la crainte au sein des directeurs des entreprises aujourd'hui, en fait même les simples travailleurs devraient avoir peur-le peur d'être abandonné- car dans les meilleurs cas c'est leurs postes qui sont en première ligne. En 2014, le CEO d'entreprise Axel Springer a très bien exprimé cette crainte dans sa lettre ouverte pour le président exécutif de Google, intitulé « Pourquoi nous avons peur de Google » (MAPI Foundation, s.d.). Le peur n'était pas de Google elle-même, mais du changement technologique qu'elle apporte et représente. Et bien sûr, le monde des affaires est jonché d'histoires d'avertissement de grandes entreprises qui ont échoué en raison du refus de changement, on peut citer parmi autres : Nokia, Xerox, Hitachi, Toshiba, Motorola, General Motors, Etc. (valeur, s.d.)

Ce danger qui menace la pérennité des entreprises et au même temps offre une chance prometteuse, a attiré l'attention de public en générant un marketing parfois trop ambitieux et des différentes définitions du terme, ce qui a semé la confusion au lieu d'augmenter la transparence.

1.3 Définition

Le terme industrie 4.0 tire ses origines d'un projet de la stratégie high-tech du gouvernement Allemand. Il a été officiellement introduit dans le Hanover Messe en avril 2011. (Drath & Horch, 2014)

La vision de l'industrie 4.0 est qu'à l'avenir les entreprises vont créer des réseaux globaux pour connecter leurs machines, usines, et même leurs équipements de manutention sous forme de système Cyber-physique (CPS), ce terme auquel nous sommes confrontés à maintes reprises lors de la lecture sur ce sujet, représente l'une des quatre composants principaux de l'industrie 4.0. (Hermann, Tobias, & Boris, 2015)

Le terme consiste à créer des systèmes intelligents où la prise de décision est décentralisée comme des machines intelligentes, des usine intelligentes, et -le point qui nous intéresse le plus- des chaînes logistiques intelligentes. (Hermann, Tobias, & Boris, 2015)

Alors que la vision de l'industrie 4.0 est plus ou moins claire, il n'existe pas une définition exacte du terme, et même un directeur de site de production du constructeur automobile Audi n'a pas pu expliquer le terme à son fils (Hermann, Tobias, & Boris, 2015). En fait, une étude en 2014 affirme que la plupart des entreprises en Allemagne n'avaient pas une compréhension claire de ce qu'est l'industrie 4.0 ou même à ce qu'elle ressemble. (Rogers, 1958)

Plus simplement, on peut définir l'industrie 4.0 comme une combinaison de plusieurs technologies physiques et numériques dans le domaine industriel telles que l'intelligence artificielle, le *cloud computing*, la robotique adaptative, la réalité augmentée, la fabrication additive et l'Internet des objets (IoT), dans une nouvelle manière plus coordonnée.

Dans d'autres parties du monde, des projets similaires ont été créés comme « Smart Factory » dans la Hollande, « Usine de futur » en France, « High value manufacturing Catapult » en Royaume-Uni, « *Fabbricadel Futuro* » en Italie, « Made in china 2025 » et « Internet plus » dans la Chine et le terme qui est devenu aussi -ou même plus-célèbre que l'industrie 4.0, c'est « l'Internet industriel » ou « L'Internet industriel des objets IIoT ». Ce terme créé par la société General Electric avant qu'elle soit rejoint par AT&T, CISCO, Intel et IBM en 2014, en formant l'IIC (the industrial internet consortium) (MAPI Foundation, s.d.). Ce groupe comporte aujourd'hui 258 membres. (Industrial Internet Consortium, s.d.)

1.4 Internet industriel et L'industrie 4.0

Est-ce qu'on peut utiliser les deux termes d'une manière interchangeable ? Non, on ne peut pas. Bien que les deux peuvent sembler proches, en y regardant de plus près, les deux approches sont radicalement différentes, certaines différences étant moins visibles à l'œil nu. (MAPI Foundation, s.d.)

Tandis que l'industrie 4.0 décrit une chaîne de production décentralisée qui s'étend du design conceptuelle jusqu'à la mise à l'arrêt ou l'élimination du produit ou du service, en passant par la distribution, la production, ...etc. L'Internet industriel englobe à peu près les mêmes processus, sauf que l'horizon d'application s'étend au-delà de la fabrication et dépasse même le domaine industriel.

1.4.1 Définition d'Internet industriel

En générale, on peut définir l'Internet industriel comme la combinaison de plusieurs technologies clés afin de produire un système plus performant que la somme de ses parties. (Gilchrist, 2016)

Une définition plus précise du (ge.com, 2015) :

"... une source à la fois d'efficacité opérationnelle et d'innovation qui est le résultat d'une recette fascinante de développements technologiques. La somme de ces éléments donne l'Internet industriel - l'intégration étroite des mondes physique et numérique. L'Internet industriel permet aux entreprises d'utiliser des capteurs, des logiciels, l'apprentissage de machine à machine et d'autres technologies pour recueillir et analyser des données provenant d'objets physiques ou d'autres grands flux de données, puis d'utiliser ces analyses pour gérer les opérations et, dans certains cas, pour offrir de nouveaux services à valeur ajoutée".

Un exemple de l'utilisation de l'internet industriel au-delà du secteur industriel : en raison de la pandémie actuelle de virus corona, le marché des robots de téléprésence médicale -qui est une technologie d'internet industriel-est en plein essor dans le monde entier, puisque le monde arrive à voir maintenant l'utilité des robots pour aider à gérer une telles crises.

Un autre exemple toujours dans le domaine médicale, qui est utilisé beaucoup après la pandémie, même si certaines entreprises y ont déjà eu appel, comme le *Guy's and St. Thomas's Nation Health Service Foundation Trust* au Royaume-Uni, est celui des Smartphones. Le dispositif du patient ne comprend pas juste un smartphone mais aussi des balances, un saturemètre et un brassard de tensiomètre. L'idée est que les patients prennent quotidiennement des mesures de leur poids, de leur rythme

cardiaque, de leur pression artérielle et de leur niveau d'oxygène, puis envoient les données au smartphone via Bluetooth pour qu'elles soient transmises au service de télésanté de BT. Cela permet aux entreprises de santé d'être toujours informées et d'intervenir en cas de besoin. (Gilchrist, 2016)

1.5 Les composantes de l'industrie 4.0

Dans leurs travaux en 2015, et pour aider les universitaires à approfondir le sujet, et permettre aux praticiens de trouver de l'aide dans la mise en œuvre de scénarios appropriés, (Hermann, Tobias, & Boris, 2015) ont utilisé la documentation analysée pour identifier quatre composantes clés de l'Industrie 4.0 jugées comme des composantes indépendantes par les auteurs du papier : système cyber-Physique, Internet des Objets, Internet des Services et L'Usine intelligente.

Les implications de ces résultats (des composants) sont ensuite utilisées pour déduire des principes de conception pour les scénarios de l'Industrie 4.0. Ces principes de conception aident les entreprises à identifier des modèles types possibles pour l'industrie 4.0, qui peuvent ensuite être mis en œuvre.

1.5.1 Système cyber-Physique (CPS)

Quand on parle des systèmes ou technologies existants aujourd'hui on peut les classer en trois types : technologie de l'information (IT), réseau, système physique ou une combinaison de quelques voir tous ces trois. Le CPS est un système qui comporte tous les trois. (Gilchrist, 2016)

Depuis cette définition nous pouvons constater que même si le concept est nouveau, la technologie qu'il définit a existé déjà, avant l'introduction de terme. En fait, le CPS le plus ancien et qui a fonctionné depuis l'existence de l'humanité, est l'homme lui-même.

Un opérateur humain est un CPS, il a :

Le cerveau comme un dispositif de traitement.

L'IHM pour la communication.

Les mains comme interfaces mécaniques.

Une définition plus formelle du (Lee, 2008):

Les CPS sont des "intégrations de processus de traitement des données et des processus physique". Les ordinateurs et les réseaux embarqués surveillent et contrôlent les processus physiques, généralement avec des boucles de feedback où les processus physiques affectent les processus computationnels et vice versa".

Dans l'autre côté, un système embarqué englobe presque les mêmes concepts sauf que nous n'avons pas ce domaine physique à affronter et cela nécessite des connaissances particulières. Le problème est que dans certaines définitions de CPS, même la fonction de réseau et de communication est considérée comme optionnelle (Gilchrist, 2016). Ce qui pose la question comment un CPS diffère d'un système embarqué ?

Avant, on considérait tous les systèmes ayant une capacité de calcul intégrée comme des systèmes embarqués, mais avec l'évolution de ces dispositifs à quelque chose qui

ne ressemble pas vraiment, ou n'utilise même pas les technologies de ses prédécesseurs, il est devenu techniquement incorrect de les appeler par le même nom. Donc, un nouveau terme a fait son apparition, les systèmes cyber-physiques (CPS). Ce terme distingue les systèmes embarqués basés sur des microprocesseurs et les systèmes plus complexes qui s'intègrent réellement avec leur environnement.

Un système embarqué est un système computationnel intégré dans un système physique ; l'accent est mis sur la composante computationnelle. Par conséquent, nous pouvons considérer que tous les CPS contiennent des systèmes embarqués, mais le CPS se concentre sur les communications ainsi que sur les domaines physique et computationnel. En fait, Industrie 4.0 est considéré comme l'évolution des systèmes embarqués-ES vers des systèmes cyber physiques-CPS.

Par exemple, la machine à laver est un système embarqué. Elle est dotée d'un microcontrôleur qui gère ses tâches lorsqu'elle reçoit un ordre en appuyant sur des boutons, et ces boutons servent comme interface d'interaction avec la personne qui l'utilise, mais quand même, vous pouvez voir qu'elle ne peut pas se rendre compte de ce qui se passe autour d'elle, par exemple elle ne peut pas savoir si vous avez mélangé les couleurs ou utilisé trop de poudre. Maintenant si elle a des capteurs qui indiquent cela, elle devient capable de reconnaître ce qui se passe autour d'elle, donc elle cesse d'être un système embarqué et devient un CPS.

Maintenant, si nous voulons relier notre machine à laver avec par exemple, notre lave-vaisselle pour suivre notre consommation d'eau dans une certaine période de temps. Quelle technologie nous permet de le faire ?

La Réponse est l'Internet des Objets (IoT).

1.5.2 Internet des Objets (IoT)

L'Internet des objets (IOT, pour *Internet Of Things*) nous offre de plus en plus d'objets connectés et communicants. Un tel objet peut être un capteur ou un système en mesure d'être connecté selon un protocole standard, c'est-à-dire respectant les standards Internet, et qui est capable de s'identifier et de fournir diverses informations se rapportant à sa fonction et à ses possibilités. (Québec)

« Objets connectés » ici veut dire des CPS, donc, l'Internet des objets est un réseau dans lequel les CPS coopèrent entre eux grâce à des schémas d'adressage uniques.

Attention ici, lorsque nous disons qu'il s'agit d'un réseau, cela ne signifie ni la technologie du réseau utilisée ni les composants du réseau (les CPS), il s'agit plutôt de tout le système lui-même, ça veut dire, cette capacité que nous n'avons pas eu avant, de relier plusieurs systèmes différents via le même Protocol et par Internet.

Mais est-ce la seule utilisation de l'internet dans l'industrie 4.0 ? Non.

1.5.3 Internet des Services (IoS)

L'IoS permet aux "fournisseurs de services d'offrir leurs services via l'Internet". L'IoS se compose de participants, d'une infrastructure pour les services, de business models et des services eux-mêmes. (Hermann, Tobias, & Boris, 2015)

L'idée de l'IoS a été implémentée dans un projet nommé SMART FACE dans le cadre du programme "Autonomie pour l'industrie 4.0" initié par le ministère fédéral allemand des affaires économiques et de l'énergie. Il développe une nouvelle gestion de production distribuée pour l'industrie automobile. Le projet est basé sur une architecture orientée services. Cela permet l'utilisation de stations d'assemblage modulaires qui peuvent être modifiées ou étendues de manière flexible. Le transport entre les stations d'assemblage est assuré par des véhicules guidés automatisés (AGV). Les stations d'assemblage et les AGV offrent tous deux leurs services via l'IoS. Les carrosseries des véhicules savent quelle est la configuration spécifique du client et peuvent décider de manière autonome les étapes de travail nécessaires. Elles peuvent donc composer individuellement les processus nécessaires par l'IoS et naviguer de manière autonome dans la production. (Hermann, Tobias, & Boris, 2015)

Donc, l'IoS facilite aux entreprises de sous-traiter quelques activités et/ou offrir leurs services aux autres entreprises.

La question que nous devons éventuellement poser est : à quoi ressembleraient tous ces composants travaillant ensemble ?

1.5.4 Usine intelligente

Le cœur de l'industrie 4.0, en termes conceptuels, est l'usine intelligente. Et si on voit comment l'industrie 4.0 fonctionnera en théorie, on peut voir que tout, de la chaîne logistique aux business model et aux processus, sont là pour former l'usine intelligente.

C'est le soleil autour duquel orbitent d'autres processus.

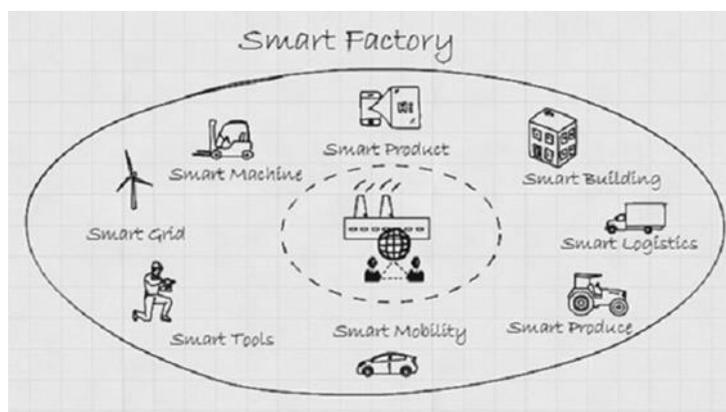


Figure 1-1 : L'usine intelligente et ses composantes. (Gilchrist, 2016)

Sur la base des définitions données pour le CPS et l'IoT, l'usine intelligente peut être définie comme une usine où les CPS communiquent à travers l'IoT et assiste les hommes et les machines dans l'exécution de leurs tâches.

Nous insistons ici sur l'expression "assiste les hommes et les machines" pour rejeter l'idée qu'une usine intelligente équivaut à une automatisation à cent pour cent où l'exécution et la gestion de la production sont entièrement faites par des robots. Cette idée est plus fausse que futuriste. En fait, les usines intelligentes ne sont pas vraiment futuristes, Elles sont avec nous aujourd'hui et le sont depuis au moins une décennie. Vous pouvez trouver quelques exemples réels d'usines intelligentes dans la section 7.

Voyons comment une usine intelligente peut fonctionner en pratique. Comme l'a suggéré le Dr Uwe Dittes de SAP SE (Dittes) dans sa conférence sur le thème des solutions techniques et opérationnelles pour l'industrie 4.0 dans l'ERP, il a proposé un exemple de production de bouteilles de shampoing.

Il considère une chaîne de production de plusieurs types de même produit (Shampoing), ils peuvent différer dans leurs étiquettes, leurs couleurs et leurs parfums. Au début, il montre comment ces différentes bouteilles de shampoing auraient été produites sur une chaîne de production traditionnelle de l'industrie 3.0. Voir Figure 1-2.

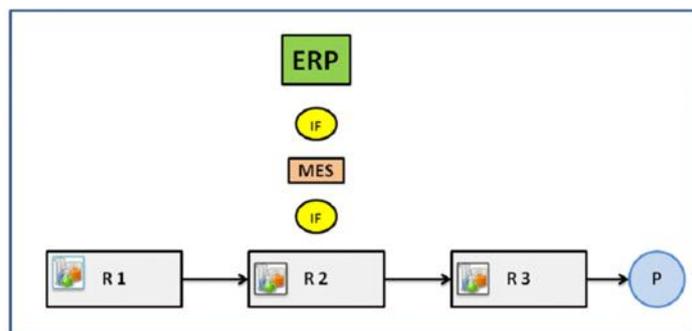


Figure 1-2 : Un système de production 3.0. (Dittes)

Il y a trois ressources pour la production : R1 produit le liquide à base de shampoing. R2 est pour l'ajout de couleur et de parfum au liquide de R1. Et enfin R3 est utilisé pour le remplissage du shampoing raffiné dans la bouteille de shampoing correspondante.

L'usine utilise un système de gestion de la production, également appelé manufacturing execution system (MES). Le système MES possède une interface qui permet l'échange d'informations avec les ressources de production. Le contrôle de la production se situe une couche au-dessus de la couche de fabrication.

L'ERP est l'abréviation de "enterprise resource planning", le système ERP dispose d'applications et de programmes permettant d'exécuter divers processus industriels et commerciaux.

Le système ERP contrôle le niveau de production en suivant les commandes générées par les chaînes de distribution et les supermarchés et envoie des instructions au MES pour qu'il fabrique les quantités nécessaires à la satisfaction des commandes. Le MES lance la production pour satisfaire les ordres et fournit un retour d'information sur l'état de la production au système ERP.

La production fonctionne de cette manière dans une usine moderne standard. Cependant, elle n'est pas sans ses défauts.

Certains de ces défauts sont : Le premier réside dans la chaîne de production en série traditionnelle elle-même, dans le cas où une ressource est défaillante, alors toute la chaîne de production est défaillante. Deuxièmement, toute défaillance de l'ERP ou du MES bloquera également la production. L'expansion ou la reconfiguration de la ligne

de production est difficile en raison des différences d'interface entre le MES et les ressources,...

L'industrie 4.0 peut atténuer certaines si pas toutes ces faiblesses. La façon dont fonctionne l'industrie 4.0 est que les ressources de l'exemple précédent sont remplacées par des CPS, comme le montre la Figure 1-3.

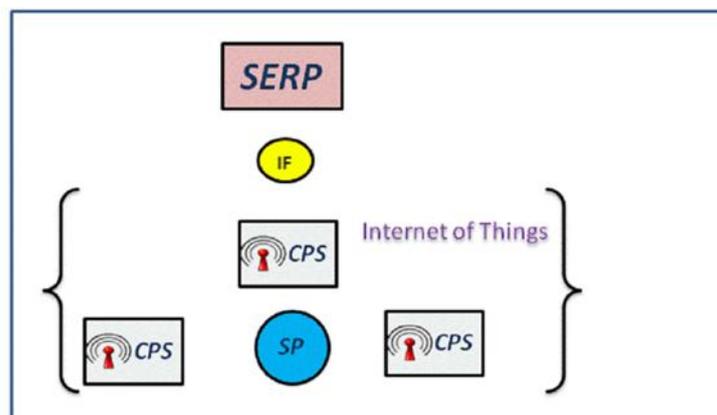


Figure 1-3 Un système de production 4.0. (Dittes)

Ce qui se passe ici, c'est qu'en remplaçant les ressources par des CPS, la ligne série stricte n'est plus fixe ; elle devient flexible, car les CPS sont intelligents et réactifs. Les CPS ont des capteurs intégrés et peuvent communiquer entre eux par des connexions radio sans fil, ce qui permet à un CPS de reprendre les tâches d'un CPS défaillant. Cette capacité des CPS à s'auto-diagnostiquer et à vérifier l'état de la chaîne de production, puis à prendre les mesures de collaboration appropriées, permet d'améliorer la disponibilité et la résilience. En outre, il n'est pas nécessaire d'avoir un système MES, ce qui élimine un autre point de défaillance potentiel, et supprime également le problème de mauvaise adaptation des interfaces.

Les CPS autonomes ne sont pas les seules entités intelligentes sur la chaîne de production, le produit est également intelligent. Par exemple, les bouteilles de shampoing seront équipées d'étiquettes RFID, qui identifient la marque et la variante dont il s'agit, et l'état de sa production (son propre historique de production à jour), ainsi que l'étape suivante à laquelle elle doit passer pour terminer sa production.

C'est ainsi qu'est né le concept d'usine intelligente, un système flexible, agile et intelligent qui dépasse les CPS et les murs de l'usine pour s'étendre aux produits, et à l'ensemble de la chaîne de valeur.

1.6 Les piliers de l'industrie 4.0

Ces technologies et méthodes qu'on trouve cruciales pour la création de l'industrie 4.0 ou au moins l'introduction du terme, sont la base sur laquelle s'appuient ses composantes. Ces technologies ont généré ce qu'on appelle la poussée technologique (Lasi, P Fettke, HG Kemper, & T Feld, 2014), vers cette nouvelle façon de voir et de gérer la chaîne de valeur, non seulement dans l'industrie, mais elles ont aussi changé la vie quotidienne des gens.

La particularité de l'industrie 4.0 est que les humains l'ont prédite avant qu'elle n'ait lieu contrairement à les autres révolutions, grâce aux nouvelles technologies qui ont

été inventées ces dernières années, la faveur ne va pas seulement à celles-ci mais surtout à leur développement vers ce que nous pouvons juger ou jugerons à l'avenir comme étant "assez mûres" et fiables pour être utilisées dans l'industrie. Par exemple : l'impression 3D a été inventée en 1980, Big Data en 2005, le nuage informatique (le cloud) en 1960, smartphone 1992, la réalité augmentée en 1990, la technologie sans fil en 1991,...Ce qui donne aux humains aujourd'hui un privilège que leurs ancêtres n'avaient pas.

1.6.1 Pourquoi maintenant ?

Comme nous l'avons déjà dit, le monde a commencé à parler de l'industrie 4.0 en 2011 parce qu'il a vu que le développement des technologies se poursuivait et que la plupart de ces technologies ont atteint le niveau "suffisamment mature". Mais ce n'est pas la seule raison.

Ainsi, pour comprendre les autres raisons pour lesquelles l'industrie 4.0 existe aujourd'hui, alors que ses technologies existent depuis un certain temps, nous devons examiner les capacités et les inefficacités des systèmes existants.

L'une des hypothèses proposées par (Gilchrist, 2016) est que la complexité des systèmes industriels a dépassé la capacité de l'opérateur humain à identifier et à réaliser les gains d'efficacité, ce qui rend plus difficile d'apporter des améliorations dans leur sens traditionnel.

Un autre toujours par (Gilchrist, 2016), ce qui explique un peu ce que nous voulons dire par "maturité technologique", est la chute des coûts du calcul, de la bande passante, du stockage et des capteurs.

En fin de compte, nous pouvons dire que les technologies existent depuis un certain temps et ont été adoptées par les informaticiens. L'adaptation du nuage informatique et le SaaS est un excellent exemple. Toutefois, ce n'est que récemment que les dirigeants d'entreprises industrielles ont pu voir la stabilité et la maturité des solutions, des outils et des applications dans ces secteurs informatiques, qui ont atteint un niveau de confiance et ont atténué les inquiétudes. (Gilchrist, 2016)

1.6.2 Miniaturisation

La miniaturisation est la tendance à fabriquer des produits et des appareils de plus en plus petits pour les rendre moins lourds et moins volumineux, ce qui est très important dans la plupart si pas tous les secteurs d'application. (Gilchrist, 2016)

Alors qu'il y a quelques années, les ordinateurs nécessitaient un espace considérable, aujourd'hui, des appareils aux performances comparables, voire considérablement meilleures, peuvent être installés sur quelques centimètres cubes, ce qui permet de nouveaux domaines d'application, notamment dans le contexte de la production et de la logistique. (Lasi, P Fettke, HG Kemper, & T Feld, 2014)

Les fabricants ont porté cette miniaturisation au-delà même de l'imagination de l'être humain en fabriquant des capteurs de la taille d'un grain de sable, comme la caméra OV6948 en 2017, avec une taille de 0,575 mm × 0,575 mm Voir Figure 1-4.

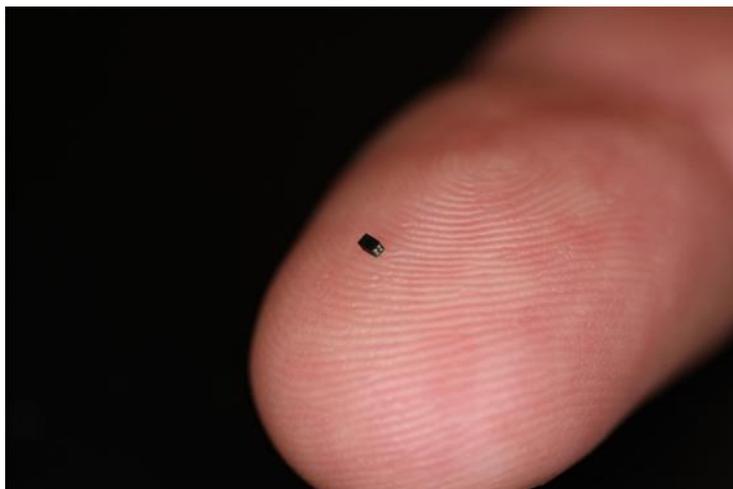


Figure 1-4 La taille de caméra OV6948 par rapport au doigt d'un humain.

Au cours des dix dernières années, la longueur de verre des interrupteurs magnétiques disponibles a été réduite d'environ 12,7 à 3,7 mm (Figure 1-5).

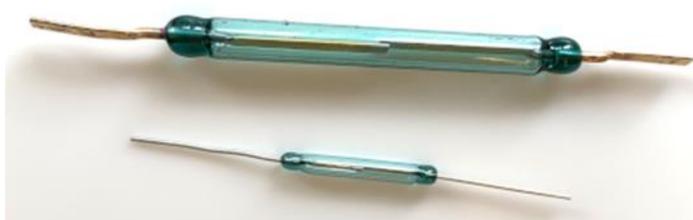


Figure 1-5 Différence entre un interrupteur magnétique et un nouveau interrupteur.

Cela représente une réduction de 70 % de la longueur et de la largeur correspondante des composants - une contribution importante à la réduction de la taille globale des dispositifs médicaux qui utilisent ces composants. [20]

1. Big Data et l'analyse avancée

Le terme "Big Data" décrit des données trop volumineuses pour être gérées par les bases de données et les outils de traitement traditionnels. Ces grandes structures de données peuvent être et sont généralement composées d'une combinaison de données structurées et non structurées provenant de diverses sources telles que du texte, des formulaires, des blogs, des commentaires, des vidéos, des photos, de la télémétrie, des tracés GPS, des discussions par messagerie, des flux d'informations, etc. La liste est presque infinie (Gilchrist, 2016). Afin de tirer profit de ces données, il doit y avoir un moyen de les traiter et de les gérer.

Un exemple de l'utilisation du Big data et qui montre largement à quel point le big data peut être avantageux dans le domaine du sport, précisément le club de football de Liverpool (ZME science, s.d.), où ils ont utilisé l'analyse de Big Data des joueurs. Selon leur équipe exceptionnelle d'analystes de données, l'équipe combine les données des événements et les données de suivi afin d'analyser en temps réel comment chaque action sur le terrain a un impact sur la probabilité de marquer un but. D'autres rapports réfèrent que le club utilise même le *Big data* dans le choix des joueurs à recruter, et le considère comme le « secret » du succès d'équipe.

Un exemple simple de l'utilisation de *Big Data* récolté de l'intérieur de l'usine est la planification prédictive de la maintenance. Pour déterminer un bon programme de maintenance prédictive d'une ou plusieurs machines, tout d'abord nous devons connaître la fiabilité opérationnelle exacte de l'équipement à maintenir pour prévoir les pannes. Selon (Cours.GI), la fiabilité opérationnelle est la combinaison de la fiabilité prévisionnelle et d'exploitation, cette dernière peut être déterminée en utilisant des capteurs intelligents qui fournissent d'énormes quantités de données et en utilisant les analyses avancées qui peuvent fournir des programmes de maintenance prédictive précis pour les machines et les équipements, en les maintenant en fonctionnement productif plus longtemps et réduisant les inefficacités et les coûts de maintenance inutile.

Le succès de Thames Water, le plus grand recycleur d'eau potable et de déchets d'eau au Royaume-Uni, est un exemple réel. Il utilise les technologies de l'industrie 4.0 pour la gestion des ressources à distance et la maintenance prédictive. En utilisant une stratégie de capteurs, de communication à distance et d'analyse des données, Thames Water peut anticiper les pannes d'équipement et réagir plus rapidement à toute situation critique pouvant survenir en raison de mauvaises conditions météorologiques. (Gilchrist, 2016)

1.6.3 Le nuage et le brouillard

Le nuage informatique (Le cloud)

Le *cloud computing* est similaire à de nombreuses technologies qui existent depuis des décennies. Il s'est réellement imposé, dans le format que nous reconnaissons aujourd'hui, au milieu des années 2000 avec le lancement d'Amazon Web Services (AWS) en 2005. AWS a été suivi par Microsoft Azure en 2010 et RackSpace, le moteur de gestion du Cloud de Google, en 2012, parmi d'autres. (Gilchrist, 2016)

La vision d'Amazon sur le nuage était l'hyper-provisionnement, dans la mesure où ils ont construit d'énormes centres de données avec une hyper-capacité afin de répondre à leurs besoins à l'échelle du web. Amazon a ensuite pris l'initiative de louer des capacités de réserve à d'autres entreprises, sous la forme de location de ressources informatiques et de stockage selon l'utilisation. (Gilchrist, 2016)

L'avantage est que l'utilisation est flexible et ne dépend que de la quantité que vous utilisez, ce qui signifie que vous ne payez que pour l'espace que vous avez occupé pendant le temps que vous avez utilisé et si vous demandez un niveau de calcul et de stockage puis constatez que la demande dépasse largement ce niveau. Le nuage s'étirera pour répondre à la demande sans aucune interaction avec le client ; le nuage gèrera la demande de manière dynamique en affectant plus de ressources.

Il existe trois catégories de services qui représentent le cloud : IaaS (Infrastructure as a Service), PaaS (Platform as a Service) et SaaS (Software as a Service). Chaque catégorie définit un ensemble de services disponibles pour le client, et c'est la clé du cloud - tout est proposé comme un service. Donc, les opérateurs de cloud utilisent les services web pour exposer leurs fonctions et leurs produits comme des services. (Gilchrist, 2016)

- IaaS : (infrastructure en tant que service) : C'est celui dont nous avons déjà parlé dans cette section, et c'est le premier service lancé par AWS qui donne à ses clients la possibilité d'utiliser des bases de données. Ainsi, au lieu d'acheter du matériel et de créer une salle de serveurs ou un centre de données, une PME pourrait louer des ordinateurs, du stockage et un réseau auprès d'un fournisseur de services en ligne.
- Paas : (Plateforme en tant que service) : C'est ainsi que Microsoft et d'autres ont réalisé que les développeurs avaient besoin non seulement d'une infrastructure, mais aussi d'un accès à des langages de développement de logiciels, à des bibliothèques et à des micro-services afin de créer des applications Windows. Google fournit également le PaaS pour soutenir ses nombreuses applications domestiques telles qu'Android et Google Apps. (Gilchrist, 2016)
- SaaS : (Logiciel en tant que service) : Le précurseur du cloud sous la forme d'applications web, comme Salesforce.com, lancé en 1999. Le SaaS était une nouvelle façon d'accéder à un logiciel. Au lieu d'accéder à un serveur privé local hébergeant une copie de l'application, les utilisateurs utilisaient un navigateur web pour accéder à une application partagée basée sur un serveur web (Gilchrist, 2016). parmi exemples les plus populaires de SaaS: Gmail, Google Apps, Netflix, Spotify, iCloud d'Apple, ...etc.

Le nuage informatique nous a permis de stocker d'énormes quantités de données sans avoir l'installation et équipement de stockage à l'intérieur des frontières physiques de l'entreprise. J'espère que vous n'avez pas la mémoire courte, "énormes quantités de données" ici veut dire Big Data, donc sans le cloud, le traitement de Big Data, pour ne pas dire leur existence, ne serait pas possible.

Par exemple, les moteurs d'un avion génèrent des téraoctets de données par vol, qui sont stockées à bord de l'avion et envoyées au cloud une fois que l'avion a atterri, et ce n'est qu'un seul avion (Gilchrist, 2016). Selon le site [flightradar24](#), Le nombre moyen de vols par jour en mars 2019 est de 176 000. Si chaque vol ne génère qu'un téraoctet, nous aurons alors 176 pétaoctets générés par jour. Même si c'est énorme, cela ne représente pas un véritable souci pour le Cloud, le vrai problème est la latence.

La latence, est le temps qu'il faut aux données pour être transmises depuis un appareil et être ensuite traitées dans le Cloud, qui est souvent inacceptable. Dans la plupart des cas, ce n'est pas un problème car les données peuvent être analysées en continu lorsqu'elles entrent dans le nuage informatique, puis stockées pour des analyses de Big Data plus approfondies par la suite. Cependant, il existe des cas d'utilisation industrielle où le temps réel est nécessaire, par exemple dans le secteur manufacturier (Gilchrist, 2016). Dans certains cas, si pas la plupart, un scénario de nuage informatique public ne serait pas acceptable, alors quelle est la solution ?

Le brouillard informatique (Le fog)

Le fog est un terme créé par Cisco pour décrire une infrastructure en nuage informatique située à proximité de la limite du réseau. Il diffère du cloud en étant situé près de la limite du réseau de proximité, généralement connecté au routeur de périphérie d'un fournisseur de services. C'est sur le routeur de périphérie du

fournisseur de services que le réseau de brouillard se connectera, réduisant ainsi la latence et améliorant la qualité de service (QoS). (Gilchrist, 2016)

Un exemple d'utilisation du *Fog* dans l'industrie est la gestion des chariots élévateurs puisqu'ils provoquent environ 100 000 accidents chaque année aux États-Unis seulement, dont près de 80 % concernent des piétons (Gilchrist, 2016). Même si les conducteurs sont bien formés et que les camions sont équipés de capteurs, le brouillard peut représenter ici une excellente solution pour la gestion de l'énorme flux d'informations provenant de ces capteurs où la prise de décision doit se faire en temps réel.

Bien que l'informatique dans le brouillard s'attaque à de nombreux problèmes majeurs liés à la latence des réseaux et à l'encombrement d'Internet, elle ne peut pas remplacer complètement l'informatique dans le nuage qui aura toujours sa place en raison de sa capacité à stocker de grandes quantités de données et à effectuer des analyses sur des quantités massives de données. (Gilchrist, 2016)

1.6.4 Les smartphones

Le smartphone est au cœur de toutes les tendances récentes de l'Internet des objets (IoT) et de l'apprentissage machine, et chaque jour nous voyons des innovations qui se concentrent sur l'appareil comme un contrôleur, un tableau de bord de système et une clé d'accès de sécurité, ou une combinaison de ces trios. (Gilchrist, 2016)

Un exemple de l'importance des smartphones pour les innovations de l'industrie 4.0 est qu'il s'agit de la principale interface homme-machine (IHM).

Examinez l'approche innovante de Ford en matière de systèmes d'info-loisirs automobiles embarqué pour voir comment l'industrie aborde la conception future. Les constructeurs automobiles conçoivent et construisent une voiture pour qu'elle dure dix ans pour un premier propriétaire ;Cependant, la conception et la construction de la forme du corps et de la mécanique sous-jacente sont déjà bien assez difficiles sans avoir à prendre en compte le système d'info-loisirs, qui sera probablement dépassé d'ici cinq ans, et avec la vitesse à laquelle la technologie actuelle évolue, cela pourrait même aller avant les cinq ans. (Gilchrist, 2016)

La solution proposée par Ford et d'autres constructeurs automobiles consistait à fournir un système de base, un affichage visuel et un système sonore, qui s'intègre à un smartphone grâce à une connexion sans fil ou par câble et via des interfaces de programmation applicative logicielles

Cependant, les smartphones ne seront qu'à la limite des domaines de la proximité et des opérations et de la gestion, car ils ne sont pas encore ou ne seront probablement pas dans l'avenir proche capable de traiter les *Big Data*, des données non structurées et structurées pour l'analyse prédictive.

1.6.5 Simulation

Dans l'environnement de marché concurrentiel et en rapide évolution d'aujourd'hui, les entreprises doivent être flexibles, modulaires, adaptables, évolutives et fondées sur un savoir-faire et doivent très bien utiliser les technologies de l'information et de la communication. Par conséquent, pour s'adapter aux changements technologiques et

aux fluctuations de la demande, avant de prendre des décisions importantes concernant la conception de l'usine, la modélisation de l'usine par simulation peut fournir de précieuses informations. (Ustundag, Alp, Cevikcan, & Emre, 2018)

Auparavant, si les fabricants voulaient tester si un processus fonctionnait de manière efficace et efficiente, il fallait procéder à des essais et des erreurs. L'industrie 4.0 utilise la virtualisation pour créer des copies numériques identiques au réel qui sont utilisées pour la modélisation de simulation et les essais et qui joueront un rôle plus important dans l'optimisation de la production, ainsi que dans la qualité des produits (Gilchrist, 2016). La simulation est donc un outil puissant pour observer les performances des systèmes de production dans des conditions de demande variable et d'usine dynamique dans des environnements virtuels. (Ustundag, Alp, Cevikcan, & Emre, 2018)

1.6.6 Réalité augmentée (RA)

La réalité augmentée (RA) a considérablement accru sa popularité depuis son introduction il y a deux décennies. La RA a fait évoluer la façon d'accéder à l'information et de la manipuler en améliorant la perception du monde réel grâce à l'information virtuelle. (Ustundag, Alp, Cevikcan, & Emre, 2018)

La réalité augmentée intègre des objets virtuels dans la réalité en superposant des informations visuelles supplémentaires générées par ordinateur à la vision de l'utilisateur grâce à des dispositifs spécifiques, tels que la caméra des smartphones, les écrans montés sur la tête (HMD), les appareils de projection, etc. Les informations visuelles générées par l'ordinateur peuvent être des images, des vidéos, des modèles 3D, des textes, des sons, des instructions vocales, etc. En superposant ce type d'augmentation à la vision réelle de l'utilisateur, celui-ci est en mesure d'obtenir les informations cachées sur les objets impliqués ou sur l'environnement, ce qui fait du RA une technologie efficace dans plusieurs domaines, tels que les jeux, les sports, la publicité, le shopping, l'éducation, les services militaires, les cabinets médicaux ainsi que les applications industrielles. (Ustundag, Alp, Cevikcan, & Emre, 2018)

Notre attention se porte sur la dernière. L'un des cas d'utilisation de RA les plus courants dans ce domaine industriel concerne la maintenance, et plus précisément la formation du personnel de maintenance. Auparavant, les techniciens devaient suivre des cours de formation auprès des fournisseurs, passer des examens de certification et développer des compétences au fil des années d'expérience avant d'être capables d'assurer la maintenance de ces machines ou réseaux. Maintenant, grâce à la RA, il est possible d'accélérer la formation car les manuels de données et les guides de service détaillés sont stockés dans le nuage avec les schémas et les dessins en 3D. En projetant cette ombre d'information à côté de la vue RA de la machine à réparer, le technicien peut recevoir les étapes détaillées de dépannage à suivre et la projection de l'image 3D sur le produit physique lui montrera exactement où se trouvent les pièces et comment y accéder. La RA peut jouer un rôle considérable dans la maintenance industrielle, en supprimant la plupart des exigences précédentes en matière de savoir-faire sur site, qui, en raison de sa rareté, étaient coûteux. (Gilchrist, 2016)

Cependant, l'aide est à portée de main grâce à la réalité augmentée. L'appareil de réalité augmentée le plus connu est Google Glass ; cependant, d'autres fabricants produisent leurs propres produits avec des capacités de RA.

DHL, par exemple, a utilisé le produit Google Glass dans ses entrepôts et a montré qu'il est extrêmement bénéfique pour les « *pick-by-paper* ». Google Glass peut afficher la liste de sélection, et des informations supplémentaires telles que l'emplacement de l'article à ramasser et donner des directions sur le chemin à suivre pour s'y rendre. De plus, il peut capturer une image de l'article pour vérifier qu'il s'agit bien du bon article en stock. Lorsque les articles sont pratiquement identiques à l'œil nu, par exemple une puce informatique ou un circuit intégré, la lecture automatique des codes-barres en mode mains libres garantit une identification correcte de l'article.

En outre, la réalité augmentée accélère la formation, et comme les « *pick-by-paper* » dans le stock sont souvent des travailleurs temporaires saisonniers, cela est très important. La technologie permet également une utilisation mains libres, ce qui entraîne une plus grande productivité, car les travailleurs peuvent trouver les articles beaucoup plus rapidement, ce qui augmente considérablement l'efficacité tout en éliminant les erreurs de prélèvement.



Figure 1-6 : Une image d'un travailleur « pick-by-paper » dans un stock de DHL qui utilise le Google Glass pour lui indiquer quel article à prélever. (digirupt.io, s.d.)

1.6.7 Technologie sans fil

L'adoption de la technologie de communication sans fil dans l'entreprise a connu un départ quelque peu malencontreux au début des années 2000, car elle était jugée lente et non sécurisée, Mais les industriels ne pouvaient pas nier le fait que le Wi-Fi avait un énorme potentiel opérationnel dans certains cas d'utilisation industrielle, comme dans les communications hospitalières, et dans les entrepôts, où de vastes zones ne pouvaient pas être facilement couvertes par des solutions câblées.

L'évolution de la technologie a été un processus progressif par étapes, qui a duré la majeure partie de la première décennie où des améliorations progressives des performances ont été apportées, parallèlement à des améliorations de la sécurité.

La sécurité était un enjeu majeur puisque les ondes radio sont susceptibles d'être écoutées vu qu'elles émettent par voie hertzienne et que toute personne qui écoute sur la même fréquence peut les distinguer. En outre, les points d'accès diffusent un SSID (Service Set Identifier), qui est un identifiant de réseau permettant aux appareils sans fil de l'identifier et de se connecter à leur réseau domestique. Pour des raisons de commodité, les premiers points d'accès Wi-Fi étaient ouverts sans qu'aucun identifiant utilisateur ne soit requis pour l'autorisation et les données étaient non cryptées par voie hertzienne ou protégées par un protocole de sécurité très faible appelé WEP (WiredEquivalent Protocol). (Gilchrist, 2016)

Le WEP défectueux a finalement été remplacé par le WPA2.

Le Wi-Fi est passé de 802.11b avec un débit réaliste de 1-2Mbps (11Mbps théorique) à 802.11ac et 802.11ad en 2013, produisant des débits théoriques de 800Mbps et 6Gbps, respectivement, en partie grâce à la modulation avancée du signal par OFDM et la technologie MIMO (Multi-IN/Multi-OUT). Ils utilisent plusieurs radios et antennes pour réaliser des communications multi flux en duplex intégral. (Gilchrist, 2016)

Mais, le Wi-Fi n'est pas la seule technologie sans fil présente dans l'usine ; nous pouvons également trouver les technologies *ZigBee* et Bluetooth qui sont à peu près passées par les mêmes étapes d'amélioration que le Wi-Fi.

Toutefois, l'utilisation de ces technologies qui sont des technologies WLAN (Wireless Local Area Network)) dans l'industrie est davantage liée aux bâtiments administratifs, ou à des zones relativement petites, car il ne peut pas couvrir de grandes distances comme le Wi-Fi que sa zone de couverture est d'environ 50 mètres à l'intérieur et 100 mètres à l'extérieur. C'est pourquoi nous avons plutôt besoin du WAN (Wide Area Network).

Cela n'exclut pas les technologies mentionnées ci-dessus, mais le modifie plutôt pour qu'elles soient utilisées de différentes manières et pour différents objectifs.

Lorsque vous choisissez une technologie WAN appropriée pour la connectivité industrielle à l'internet, tenez compte des éléments suivants ; (Gilchrist, 2016)

- Disponibilité.
- Bande passante.
- Coût.
- Gestion.
- Application.
- Les engagements de niveau de service (SLA) et la fiabilité.
- Qualité du service(QoS).

Quelques technologies anciennes de communication WAN : RNIS (ISDN), Frame Relay (relais de trames), ATM. Ils utilisent généralement des lignes câblées structurées, par exemple des lignes téléphoniques dans le cas du RNIS, et ils sont considérés comme une espèce éteinte aujourd'hui puisqu'ils ont presque disparu du monde entier. (Gilchrist, 2016)

Les nouvelles technologies les plus courantes :

- xDSL : offert par les fournisseurs de services Telco (Algerietelecom en Algérie par exemple) car il peut utiliser une ligne téléphonique existante. Les services DSL peuvent être fournis de manière efficace et peu coûteuse. (Gilchrist, 2016)
- SDH/Sonnet : Cette technologie d'anneau optique est généralement déployée en tant que noyau de transport du fournisseur de services car elle assure un transport de données à grande vitesse, à haute capacité, très fiable et tolérant aux fautes sur des régions géographiques parfois vastes. (Gilchrist, 2016)
- MPLS-IP/MPLS : est la technologie de base moderne et la plus courante des fournisseurs de services aujourd'hui. Le MPLS a remplacé les anciennes lignes louées, les relais de trame et ATM dans la plupart des pays, mais pas dans tous. (Gilchrist, 2016)
- 3G/4G/LTE : Le réseau à large bande des opérateurs mobiles a beaucoup progressé au cours de la dernière décennie, avec d'énormes améliorations dans le transfert de données sur les réseaux à large bande des opérateurs mobiles, depuis l'époque du début et de la fin des années 2000 où la 2G et le GPRS étaient utilisés. (Gilchrist, 2016)
- Nous avons préféré aborder la 5G séparément de ses prédécesseurs parce que de nombreux chercheurs prévoient qu'elle sera un énorme facilitateur pour l'industrie 4.0 comme (M. Gundall et.al, 2018). Mais cela ne nie pas le fait qu'elle partage avec eux certaines des technologies (le MIMO par exemple) et la structure principale bien sûr (le réseau mobile à large bande), mais on peut la considérer plus comme le fruit du travail de ses prédécesseurs.
- 5G : De nombreux pays ont commencé à utiliser la 5G aujourd'hui, comme les États-Unis et le Brésil et de nombreux pays d'Europe et du Moyen-Orient, ainsi que la Thaïlande, le Japon et la Corée du Sud. (nPerf , s.d.)
- Cette large diffusion n'est pas surprenante puisque dans les essais en laboratoire de la 5G les résultats ont été impressionnants. Les vitesses de pointe ont atteint 7,5 Gbps, voire 1 Tbps (un débit de pointe auquel on ne peut pas attendre à y atteindre dans les réseaux commerciaux), et NGMN¹ prévoit que la 5G fournira une capacité 100 à 1 000 fois plus grande que la 4G ; et pour la latence, qui est importante pour des communications de machine extrêmement réactives et fiables. La 5G est censée avoir une latence d'une seule milliseconde, 50 fois plus rapide que la 4G, voire moins. (Badic, Drewes, Karls, & Mueck, 2016)
- FTTX : Les câbles à fibres optiques ont une capacité et un débit presque illimités, les données se déplaçant à la vitesse de la lumière à travers le conduit en verre ou en plastique à l'intérieur du câble à fibres. Le FTTX est fourni de plusieurs façons, du fournisseur de services au bâtiment, et certains utiliseront

¹ NGMN : L'Alliance pour les réseaux mobiles de prochaine génération (NGMN) est une association de télécommunications mobiles regroupant des opérateurs, des vendeurs, des fabricants et des instituts de recherche. Son objectif est d'assurer le succès du lancement commercial des futurs réseaux mobiles à large bande grâce à une feuille de route pour la technologie et des essais conviviaux pour les utilisateurs. (NGMN , s.d.)

des réseaux optiques actifs, qui permettent de faire fonctionner une seule fibre dédiée. Le coût de cette solution risque d'être prohibitif. (Gilchrist, 2016)

- VSAT : *Very Small Aperture Terminal* est une technologie de communication par satellite utilisée pour fournir l'internet à large bande et les communications de réseaux privés. Le VSAT est idéal pour les endroits très éloignés où il n'y a pas de couverture de réseau mobile, comme sur les navires en mer, les plateformes pétrolières/gazières, les camps miniers, ou pour les communications dans les opérations sur le terrain (Gilchrist, 2016). Le VSAT est utilisé par la célèbre société *SpaceX* dans son projet *Starlink* pour fournir l'internet dans le monde entier. (Isotropic, s.d.)

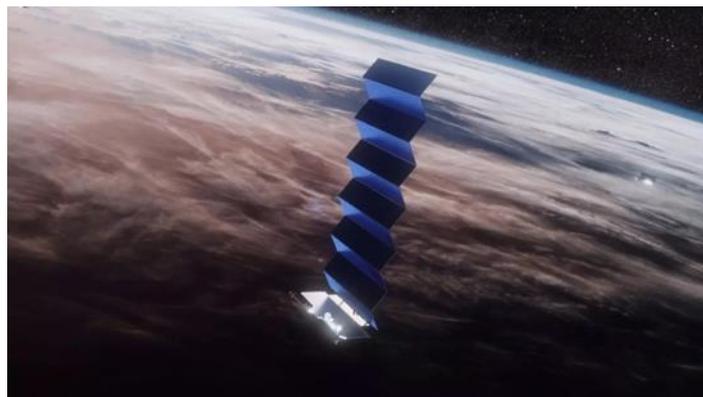


Figure 1-7 Représente un satellite spaceX. (*Starlink, s.d.*)

En Algérie, on trouve l'ADSL, le FTTX et la 3G/LTE proposés par Algérie Telecom et le VSAT d'Algérie Telecom Satellite.

LPWAN (Low-Power Wide Area Network)

L'idée fondamentale de l'industrie 4.0 est d'avoir de nombreux CPS connectés via l'IoT. Ces CPS sont des dispositifs intelligents qui peuvent être principalement n'importe quels appareils avec une capacité de connexion comme des capteurs ou des actionneurs. Leur nombre peut aller de milliers à des millions de dispositifs.

Le problème des communications radio sans fil est qu'il nécessite beaucoup d'énergie pour transmettre un signal et que la plupart des nœuds d'extrémité distants seront probablement alimentés par des mini-piles boutons, dont l'espérance de vie n'est pas de plusieurs mois mais de plusieurs années pour être viable. Toute autre solution pourrait s'avérer un cauchemar logistique extrêmement coûteux. Imaginez par exemple le suivi, la surveillance et le remplacement d'un million de piles dans les dispositifs terminaux d'un système de gestion du trafic métropolitain.

C'est pourquoi le WAN n'est pas réalisable pour les cas d'utilisation de l'IoT, en particulier s'il y a d'énormes zones à couvrir et qu'il n'y a pas d'électricité disponible. C'est là que nous avons besoin du LPWAN qui est un réseau à bas débit pour la transmission de petites quantités de données et une faible consommation d'énergie.

Contrairement à l'Algérie, le reste du monde met largement en œuvre et teste les technologies LPWAN, car il s'agit d'un facteur clé pour le déploiement de l'industrie 4.0. Les technologies les plus développées et les plus utilisées sont SigFox et

LoRaWAN, que nous allons comparer dans le Tableau 1-1, ainsi que nWave, Dash7, Ingénue RPMA, Low-Power Wi-Fi, etc. (Gilchrist, 2016)

Pour plus de détails sur ces technologies LPWAN, ainsi que d'autres, nous invitons le lecteur à consulter. (Gilchrist, 2016)

Tableau 1-1 Une comparaison entre SigFox et LoRaWAN. (Gilchrist, 2016)

Nom du standard	SigFox	LoRaWAN
Bande de fréquences	868MHz/902MHz	433/868/780/915MHz
Portée	30-50km (rural), 3-10km (urbain),	15km (rural), 2-5km (urbain),
Puissance d'émission des nœuds terminaux	10^{-5} W à 0.1 W	EU:<0.025W US:<0.5W
Taille du paquet	12 bytes	Définie par l'utilisateur
Appareils par point d'accès	1M	Entre 1M et 100K

1.6.8 L'apprentissage machine à machine (M2M) et l'intelligence artificielle (IA)

L'apprentissage machine à machine (en anglais M2M Learning) est très important et parfois très simple, par exemple un examen à choix multiples. Disons que l'examen vise à déterminer le niveau de connaissances de l'étudiant, il peut donc poser une question au hasard, il est possible qu'elle soit classée comme difficile, moyenne ou facile. Si l'élève répond incorrectement, le programme peut poser une autre question sur le même sujet à un niveau différent. Son objectif n'est pas de faire échouer l'élève, mais de découvrir sa compréhension du sujet. Il s'agit, en termes simplistes, de l'apprentissage machine à machine. (Gilchrist, 2016)

Techniquement on peut dire qu'il s'agit de la machine elle-même qui s'apprend en utilisant les données (*Le Big Data*).

Un exemple de cela est l'AlphaGo de Google qui a battu le champion du monde *Lee Sodol* au jeu de plateau GO, qui est un jeu extrêmement complexe avec une victoire au meilleur des cinq. Ce qui est bizarre, c'est que tant *Lee Sodol* que le champion d'Europe (qui avait été battu auparavant par AlphaGo) ne comprenaient pas la logique de l'*AlphaGo*. *AlphaGo* a utilisé les données de milliers d'anciens matchs et a même joué des parties contre lui-même, construisant une telle mémoire des mouvements possibles comme un processus d'apprentissage 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, qu'il ne cesse d'améliorer son jeu stratégique. (WIRED, s.d.)

Le fait que l'IA essaye d'imiter le fonctionnement du cerveau humain ne signifie pas qu'elle essaye de le remplacer. Un être humain est une machine extraordinaire, capable d'apprendre et de s'adapter à des exigences et à des environnements de travail parfois hostiles et complexes. Par exemple, les humains apprennent et peuvent acquérir des compétences bien plus facilement et à moindre coût que si l'on remplaçait un équipement robotique ou un CPS extrêmement coûteux sur une chaîne de production. Les humains sont aussi fantastiquement capables d'effectuer un travail

précis et délicat, ce que les robots ont du mal à faire. Les humains ont également un cerveau, une dextérité, une force et un engagement envers leurs collègues et leur famille extraordinaires. Malheureusement, les humains ont une personnalité, s'ennuient facilement et ont un ego qu'aucun ordinateur ne peut égaler. Par conséquent, les tâches répétitives et ennuyeuses sont plus adaptées aux robots. Après tout, les humains, aussi brillants soient-ils, n'ont pas été conçus pour rester debout sur une chaîne de production toute la journée à effectuer des tâches répétitives et ennuyeuses. Nous avons des défauts qui nous rendent humains et ceux-ci pourraient être en faveur du robot sur le marché du travail de l'avenir.

1.6.9 Impression 3D

L'impression additive ou ce qui est plus communément appelé impression 3D est une technologie majeure dans l'industrie 4.0. L'impression 3D consiste à créer une image sous forme de fichier informatique d'un produit existant ou d'un dessin CAO, une fine couche à la fois. Elle s'appuie sur chaque couche suivante jusqu'à ce qu'une copie complète du sujet ou de l'image CAO soit réalisée. Une fois que ce fichier informatique a été généré, il peut être envoyé à une imprimante 3D, qui peut interpréter les coordonnées pour recréer le dessin en utilisant plusieurs techniques et supports pour créer une représentation physique de sujet. (Gilchrist, 2016)

Il est important de faire la différence entre le marché de consommation de l'impression 3D, qui est envahi par les médias, et la réalité industrielle. Les composants créés à l'aide de l'impression 3D dans l'industrie ne sont pas juste des modèles ou des gadgets comme ceux utilisés par la NASA, et dans l'industrie aéronautique dans les moteurs à réaction. De même, ils sont couramment utilisés dans les voitures, au moins un constructeur fabriquant tout son véhicule par impression 3D. (Gilchrist, 2016)

L'impression 3D ne se limite pas à la manipulation de polymères, de céramiques, de papier et de métaux, elle peut également être utilisée dans le domaine de la santé. La fabrication additive est utilisée dans les prothèses et les composants médicaux tels que les capteurs et les actionneurs médicaux implantés dans le corps, comme les stimulateurs cardiaques par exemple.

1.7 L'architecture de communication

De tout ce qui précède, nous pouvons constater que le mot clé dans l'industrie 4.0, en général, est " la communication ", puisque finalement un environnement 4.0 est celui où tout est lié les uns aux autres, qu'il s'agisse de machines, d'ordinateurs, d'ERP, et même de personnel.

Mais, comment établir une telle connexion ? C'est la question essentielle. Bien que nous ayons déjà essayé un peu d'y répondre dans les sections précédentes et dans notre travail, il existe déjà des milliers de projets qui abordent partiellement le sujet. Comme : les principales entreprises et institutions allemandes qui ont rédigé et publié en 2015 le RAMI 4.0 qui est un modèle d'architecture de référence pour l'industrie 4.0, et l'OPC-UA en Europe qui est un protocole de communication unifié pour l'échange de données standard dans la communication industrielle (Marcon. P, 2017).

Dans cette partie, nous essayons d'aborder l'architecture de communication comme un ensemble. En présentant l'un des nombreux systèmes ou architectures de communication qui est le système multi-agent.

Système Multi-Agent (SMA) :

Les technologies basées sur les agents ou le système multi-agent représentent l'un des paradigmes technologiques les plus prometteurs pour la conception de systèmes distribués destinés à résoudre les problèmes de communication dans l'industrie 4.0. Les systèmes basés sur des agents ne peuvent pas fonctionner seuls ; ils doivent coopérer avec d'autres systèmes d'agents pour atteindre leurs objectifs, et la normalisation des systèmes d'agents est la condition fondamentale pour travailler ensemble à l'interopérabilité. Un grand nombre d'organisations travaillent à la normalisation des technologies des agents à partir des travaux réalisés dans le cadre de l'effort de partage des connaissances. À cet égard, la FIPA (Foundation for Physical Agents) et l'OMG (Object Management Group) représentent des réponses intéressantes pour répondre aux besoins susmentionnés en matière de SMA. (Ahmad, 2002)

Un agent est l'unité de base et fondamentale d'un système d'agents, et c'est pourtant l'une des tâches les plus difficiles d'avoir une définition concrète de l'agent. Cependant, dans une perspective de clarification, nous définissons l'agent comme un système informatique, situé dans un environnement donné, qui est capable de réaliser des actions autonomes et flexibles afin d'atteindre ses objectifs. (Ahmad, 2002)

Un système multi-agents peut être défini comme un réseau d'entités de résolution de problèmes qui travaillent ensemble pour trouver des réponses à des problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chaque entité indépendante. (Durfee, Lesser, & and Corkill, 1989)

Les SMA constituent la base d'un environnement ouvert où les agents interagissent entre eux pour atteindre leurs objectifs individuels ou communs dans un environnement évolutif. Pour interagir dans un tel environnement, les agents doivent surmonter deux problèmes : ils doivent être capables de se retrouver (puisque les agents peuvent apparaître, disparaître ou se déplacer à tout moment), grâce à un service de facilitation quelconque ; et ils doivent pouvoir communiquer entre eux. (Ahmad, 2002)

Il est nécessaire de mettre en place des mécanismes permettant de faire de la publicité, de trouver, de fusionner, de gérer et de mettre à jour les services et les informations des agents. Pour répondre à ces questions, la notion de "middle agents" a été proposée. Ils sont : Facilitateurs, Médiateurs, Courtiers, Pages jaunes et Tableaux noirs. (Ahmad, 2002)

La deuxième fonction importante est la communication, qui permet aux agents d'interagir et de partager des informations afin d'accomplir des tâches pour atteindre leurs objectifs. C'est pour atteindre cet objectif que des langages de communication entre agents (ACL) ont été proposés, basés sur la théorie de la parole-action. La théorie de l'acte de parole est dérivée de l'analyse linguistique de la communication humaine. Deux des langages d'agents déclaratifs de communication les plus

populaires sont le KQML et le FIPA ACL. Bien que le support du KQML ait été abandonné au profit du FIPA ACL. (Ahmad, 2002)

Quelques applications des SMA : Simulation de phénomènes complexes (Sociologie, physique des particules, Chimie, Robotique, Biologie cellulaire, ...etc.), Robotique, Productique, Télécoms, Jeux vidéo, Cinéma, E-commerce, E-learning ...etc. (Cours.Youssefi)

1.8 Exemples Réel d'industrie 4.0

Cette section présente quelques usines intelligentes modernes qui sont déjà en production.

- Le premier exemple : WITTENSTEIN bastian à Fellbach, Allemagne :

Un exemple d'usine intelligente est le site de production "WITTENSTEIN bastian" à Fellbach, en Allemagne, qui est organisé selon les principes de la lean production. Pour la mise en œuvre d'une production laitière axée sur la demande, des porteurs de pièces intelligents sont utilisés. Ils signalent quand une pièce est prête à être ramassée et ne permettent de lancer la production de lait que s'il y a une demande. Cela permet de réduire le nombre de traites et de soulager les employés du travail inutile. (Schlick, Stephan, Loskyll, & Lappe, 2014)



Figure 1-8 Un travailleur dans l'usine WITTENSTEIN bastian. (Schlick, Stephan, Loskyll, & Lappe, 2014)

- Le deuxième exemple : La brillante usine de General Electric (GE), États unis :

La "BrilliantFactory" de General Electric utilise déjà la technologie de l'IoT dans certaines de ses usines de fabrication et vise à introduire ultérieurement la technologie intelligente dans toutes les 400 usines de fabrication et de services de la société. GE vise à transformer ses usines de fabrication traditionnelles en connectant numériquement les équipes de conception des produits à l'usine, aux autres partenaires de la chaîne logistique et, enfin, aux opérations de service. (Gilchrist, 2016)



Figure 1-9 Un travailleur dans l'usine de General Electrics.

- Le troisième exemple : L'usine électronique de Siemens à Amberg, Allemagne (EWA) :

Siemens est le premier fournisseur mondial d'API, et l'usine EWA, que Siemens a créée en 1989, produit des commandes logiques programmables (API) Simatic.

EWA dispose de statistiques d'indicateurs de performance clés (KPI) assez stupéfiantes, comme la qualité de la production, qui est de 99,99885%, soit un niveau incroyablement bas de défauts sur une chaîne de production. En outre, une série de stations de test détectent les quelques défauts qui se produisent pendant la production. Pour mettre ces chiffres en perspective, il faut considérer que l'usine EWA fabrique 12 millions de produits *Simatic* par an. Avec 230 jours de travail par an, cela signifie que l'EWA produit une unité de contrôle par seconde, avec un taux de défauts de 0,00115%. Avec des machines et des ordinateurs traitant 75% de la chaîne de valeur de manière autonome. (Gilchrist, 2016)

Dans l'EWA, environ 1000 automates sont utilisés pendant la production, du début du processus de fabrication jusqu'au point d'expédition. Mais ce sont les personnes qui prennent les décisions en dernier ressort. Par exemple, un technicien en électronique supervise la station de test pour les cartes de circuits imprimés remplies, même s'il ne teste pas lui-même les composants et les circuits. Le technicien utilise un ordinateur pour surveiller toute la chaîne de valeur depuis son lieu de travail, car chaque carte de circuit imprimé possède son propre code à barres unique qui lui permet de communiquer avec les machines de production. Plus de 1000 scanners documentent toutes les étapes de fabrication en temps réel et enregistrent les détails du produit tels que la température de soudure, les données de placement et les résultats des tests. Cette richesse de données spécifiques aux produits est à portée de main pour chaque automate produit à Amberg. (Gilchrist, 2016)



Figure 1-10 Une photo d'usine EWA de Siemens.

1.9 L'Algérie et l'industrie 4.0

La position du gouvernement algérien vis-à-vis de l'industrie 4.0 semble jusqu'à présent peu claire, avec de très rares commentaires sur le sujet de la part de l'État, même si les nouveaux plans de "développement de l'économie" ont été abordés à maintes reprises. Mais nous attendons logiquement un plus grand intérêt du gouvernement pour l'industrie 4.0 dans le futur proche. Peut-être après la pandémie.

L'ignorance du gouvernement à l'égard de l'industrie 4.0 ne signifie pas nécessairement qu'elle est inadéquate au contexte algérien ou qu'elle est trop difficile à déployer sur une infrastructure industrielle aussi ancienne. Après tout, l'industrie 4.0 est un train que l'Algérie ne peut probablement pas prendre mais qu'elle sera tôt ou tard obligée de suivre.

C'est pourquoi, dans cette partie, nous essayons de mettre en lumière certains cas d'utilisation qui rendent la nouvelle révolution appropriée et applicable en Algérie.

1.9.1 L'industrie de pétrole et du gaz

L'industrie pétrolière et gazière constitue le cœur de l'économie algérienne. Les exportations de pétrole et de gaz représentent 95 % des recettes extérieures et contribuent à 60 % du budget de l'État. (The Arab Weekly, s.d.)

L'industrie du pétrole et du gaz dépend du développement de la haute technologie ainsi que de l'intelligence scientifique dans la découverte de nouveaux réservoirs, en Algérie ou dans tout autres pays. L'exploration et l'exploitation des ressources pétrolières et gazières nouvellement découvertes nécessitent des capteurs, des analyses et des systèmes de contrôle à rétroaction modernes qui ont amélioré la connectivité, la surveillance, le contrôle et les processus d'automatisation. (Gilchrist, 2016)

Auparavant, la technologie ciblait la production de pétrole et de gaz, mais les géologues avaient une capacité limitée à traiter les vastes quantités de données produites par une plateforme de forage, car il y en avait tellement et le stockage était coûteux et tout simplement impossible. En effet, la quantité de données collectées était telle que jusqu'à 90 % d'entre elles étaient supprimées, car il n'y avait nulle part où stocker les données, sans parler de la puissance de calcul nécessaire pour les

analyser en temps utile (Gilchrist, 2016). Ce système de production est ce que nous appelons une production Industrie 3.0, où le SCADA et les API sont largement utilisés. Ces derniers ne sont pas nouveaux pour la production algérienne, notamment pour la société SONATRACH (Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures). (SONATRACH)

L'un des nombreux changements que nous pouvons avoir en passant d'une industrie 3.0 à une industrie 4.0 est celui de forage et d'exploration puisque ils étaient auparavant coûteux et imprévisibles car ils étaient basés sur l'analyse de la cartographie par les géologues.

Cela s'est avéré imprévisible et, en conséquence, les principaux producteurs et explorateurs de pétrole et de gaz sont en train de transformer leurs infrastructures pour tirer profit des nouvelles technologies industrielles.

Ces technologies, telles que les communications à large bande, la technologie des capteurs sans fil, le stockage des données dans le Cloud avec des outils analytiques avancés et les réseaux intelligents avancés, permettent de mettre en place des systèmes qui améliorent la prévisibilité de la recherche sur le terrain, réduisent les coûts d'exploration et, éventuellement, diminuent les dépenses d'exploitation sur le terrain. (Gilchrist, 2016)

La connectivité des appareils et les besoins d'énergie et de câbles sont un véritable problème en Algérie, vu l'immensité de son territoire, dont 80 % est un désert. (TeachMideast, s.d.) Mais ce problème a été atténué, dans d'autres régions du monde, par la communication sans fil. Les nouvelles technologies et protocoles sans fil, ainsi que les technologies à faible consommation et la miniaturisation des composants, permettent de placer les capteurs n'importe où, quelles que soient leur taille, leur inaccessibilité ou les restrictions de câblage.

Cela facilitera l'exploration et l'exploitation des ressources dans une zone rurale telle que le Sahara algérien, et rendra le système encore plus efficace non seulement dans l'industrie pétrolière et gazière, mais il pourra aller encore plus loin dans d'autres domaines tels que la production d'énergie électrique par les panneaux solaire par exemple.

1.9.2 Les PME

L'Algérie compte environ 1 220 000 PME en activité recensées sur tout son territoire, selon des statistiques fournies, par un représentant du ministère de l'Industrie et des Mines (El Watan, s.d.). en Tunisie le nombre est de 771 000 (Tunisien), alors qu'en France, c'est 3748122. (INSEE, s.d.)

Le secteur des PME joue un rôle extrêmement important dans l'économie moderne, s'avérant être le système le plus attractif et le plus puissant en matière d'innovation. La contribution vitale des PME au développement économique est une réalité unanimement reconnue. La démonstration de leur utilité économique et sociale a conduit à considérer le secteur des PME comme un domaine d'intérêt stratégique pour l'économie. En outre, les PME génèrent le plus grand nombre de nouveaux emplois

avec un capital beaucoup moins coûteux, ce qui constitue une alternative importante dans la lutte contre le chômage.

Dans leur ensemble, les PME sont établies dans une réalité très diverse, hétérogène, flexible, dynamique et adaptable. Ces caractéristiques rendent la nouvelle révolution encore plus appropriée aux PME qu'aux grandes entreprises, puisque nous avons déjà parlé à plusieurs reprises de l'avantage qu'offre l'industrie 4.0 en termes d'adaptabilité à un environnement changeant et de flexibilité.

Robert Rudolph, membre du conseil d'administration / Digitalisation & Innovation chez *Swissme*², explique une autre idée : "Les PME ont le potentiel nécessaire pour mettre en place de nouveaux processus industriels 4.0 à partir de zéro. Les grandes entreprises, en revanche, ont un problème plus important d'intégration des données dans les différents secteurs d'activité". (Deloitte, 2014)

Cet intérêt pour le développement des PME n'est pas seulement pour les raisons mentionnées ci-dessus, mais aussi pour le fait qu'une usine intelligente à n'importe quelle échelle, ne peut pas fonctionner seule, même si elle comporte toutes les nouvelles technologies. Elle a besoin d'un environnement industriel 4.0 : d'une chaîne logistique 4.0, de machines 4.0, même d'une demande 4.0. Ceci a motivé, bien sûr en parallèle avec le poussage des PME vers l'industrie 4.0, le nouveau phénomène de la "ré-industrialisation" qui consiste à réinstaller à domicile des entreprises et des usines qui avaient été précédemment envoyées à l'étranger.

Le point est expliqué plus par Robert Rudolph : "La délocalisation de la production peut être à la fois ralentie et accélérée par l'industrie 4.0. Les solutions de l'industrie 4.0 peuvent contribuer à réduire les coûts et la pression exercée par les délocalisations pour des raisons de coûts, mais ces mêmes solutions permettent également aux entreprises d'organiser plus efficacement les structures globales". (Deloitte, 2014)

1.10 Conclusion

Le passage de l'industrie 3.0 à l'industrie 4.0 ne peut réussir que si la normalisation des données, des processus et des interfaces est réussie. La difficulté de se mettre d'accord sur une norme commune est illustrée par l'exemple de la normalisation des alimentations électriques des appareils mobiles : en 2009, la plupart des fabricants de l'industrie mobile ont promis qu'à partir de 2012, la plupart des nouveaux téléphones mobiles seraient alimentés électriquement avec un seul chargeur normalisé. Cette promesse n'a pas été tenue jusqu'à aujourd'hui. (Dittes)

Par conséquent, on peut conclure par dire que sans normalisation des processus, la transformation en industrie 4.0 va sans doute échouer.

Dans ce chapitre, nous avons introduit le terme industrie 4.0. Tout d'abord, nous avons discuté ses principales différences avec le terme « Internet industrielle ». Nous avons également mentionné les quatre principaux composants du terme : CPS, IoT, IoS et l'usine intelligente. Après la définition de chacun d'eux, Nous avons présenté les technologies qui ont favorisé cette révolution comme la miniaturisation et le cloud

² Swissme : est l'association leader pour les PME et les grandes entreprises en Suisse.

Chapitre 01 : Industrie 4.0

computing et le big data. Avant de terminer, nous avons cité certaines des usines intelligentes qui fonctionnent aujourd'hui. Et nous avons finalisé par expliquer comment l'Algérie peut aborder l'industrie 4.0 et les chances qu'elle peut lui donner en particulier dans le domaine du pétrole et du gaz et en aidant l'économie du pays.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder le sujet des métaheuristiques et qui constitue l'un des axes de notre contribution. En effet, les métaheuristiques sont largement utilisées dans le contexte de l'industrie 4.0 afin de renforcer l'intelligence des systèmes industriels.

Chapitre 02 : Les Méta-heuristiques

2.1 Introduction

La gestion au sein des usines a considérablement évolué depuis les années 1960. Schématiquement, on peut dire que l'on est passé du modèle Ford au modèle Toyota et d'une économie de production à une économie de marché. Pour survivre, les entreprises ont dû se refocaliser sur ce qui constitue le cœur de l'activité industrielle : la création de valeur ajoutée. Pour ce faire, elles s'efforcent de supprimer toutes les activités superflues, et se concentrent plus sur les concepts de qualité, de coûts et de délais pour optimiser les différentes activités industrielles. À partir de là, les problèmes d'optimisation ont suscité une énorme attention des chercheurs.

Dans ce chapitre, nous donnons une brève introduction aux méthodes de résolution appelées métaheuristiques. Dans la première section, nous présentons les problèmes d'optimisation en général. Ensuite, nous présentons les métaheuristiques les plus connues. Nous mettons l'accent sur la métaheuristique de recuit simulé puisqu'elle sera utilisée dans le chapitre 4 dans le cadre de notre travail.

2.2 Les problèmes d'optimisations

L'optimisation est une branche des mathématiques qui vise à trouver les facteurs qui donnent la meilleure valeur à une ou plusieurs fonctions dans des conditions déjà données. En d'autres termes, elle consiste à s'engager dans un processus visant à trouver la meilleure solution à un problème d'optimisation. (Belkaid, 2014)

Donc, un problème d'optimisation peut être défini comme un ensemble de variables de décision à spécifier pour obtenir le meilleur résultat (maximum ou minimum) de la fonction objectif, dans des contraintes spécifiées.

Le problème d'optimisation peut être représenté comme un triplé (S, Ω, f) où : S est le domaine de recherche défini sur un ensemble de variables de décisions, Ω est l'ensemble des contraintes à satisfaire et $f : S \rightarrow R^+$ est la fonction objectif à optimiser.

Dans le cas de la minimisation, le but est de trouver une solution $s^* \in S$ tel que $f(s^*) \leq f(s), \forall s \in S$. (Belkaid, 2014)

2.2.1 Classification des problèmes d'optimisation

Même si les problèmes d'optimisation ont une seule et unique définition et une seule représentation mathématique, ils peuvent être vraiment différents en fonction de nombreux critères. Le tableau 1 représente quelques classifications des problèmes d'optimisation.

Tableau 2-1 Les différentes bases de classification et leurs catégories (Belkaid, 2014)

Base de classification	Catégorie	Classification
Nombre de variables de décisions	Une seule variable	Le vecteur de variables de décisions comprend une seule variable
	Multi variable	Le vecteur de variables de décisions comprend plus d'une variable
Nombre de fonctions objectifs	Un seul objectif	Il y a un critère exprimé en une seule fonction objective
	Multi objectif	Il y a plusieurs critères qui sont considérés pour l'optimisation

		du problème
Présence de contraintes	Sans contraintes	Le problème à traiter ne contient aucune contrainte
	Avec contraintes	Le problème considéré contient un ou plusieurs contraintes
Caractéristiques des contraintes et des fonctions objectives	Linéaire	La fonction objectif et les contraintes sont linéaires
	Non linéaire	La fonction objectif ou les contraintes peuvent être non linéaires
Nature des variables de décisions	Statique	Les variables de décisions sont indépendantes des autres paramètres
	Dynamique	Les variables de décisions dépendent d'autres paramètres comme le temps
Type des variables de décisions	Discrète	Les variables de décisions prennent des valeurs entières ou discrètes
	Continue	Les variables de décisions prennent des valeurs réelles
	Mixte	Certaines variables de décisions prennent des valeurs discrètes et d'autres prennent des valeurs réelles
Nature des variables d'entrée et des variables de décisions	Déterministe	Toutes les variables du problème à optimiser sont supposées être déterministes
	Probabiliste	Les variables du problème sont supposées être aléatoires ou probabilistes

2.2.2 Optimisation mono-objectif et Multi-objectif

Mono-objectif :

Dans sa forme générale, un problème d'optimisation mono-objectif consiste en une fonction objectif à valeurs réels à minimiser, et un certain nombre de contraintes d'égalité ou d'inégalité.

Pour les résoudre, nous faisons appel à certaines méthodes d'optimisation qui se divisent en trois grands groupes : les méthodes énumératives, les méthodes déterministes, et les méthodes stochastiques. (Hafid, 2013)

Méthodes énumératives : L'évaluation de la valeur de la fonction objectif est faite en chaque point de l'espace des solutions qui peut être fini ou infini mais discrétisé. (Hafid, 2013)

Méthodes déterministes : Ces méthodes n'utilisent aucun concept aléatoire, et se caractérisent par une exploration systématique de l'espace de recherche. Elles requièrent en générale des hypothèses sur la fonction objectif, telles que la continuité et la dérivabilité en tout point du domaine de recherche. Parmi ces méthodes on peut citer : les méthodes de gradient et la méthode de Newton. (Hafid, 2013)

Méthodes stochastiques : Ce sont des méthodes itératives où l'optimisation est guidée partiellement ou totalement par un processus stochastique. Lorsqu'on veut résoudre un problème difficile, dès que sa dimension est grande, les méthodes d'exploration traditionnelles, déterministes ou énumératives peuvent avoir un temps de calcul déraisonnable, et on a alors recours aux méthodes stochastiques. Cependant, elles présentent l'inconvénient de ne pas garantir la convergence que d'une manière asymptotique (Hafid, 2013). Parmi les différentes méthodes stochastiques d'optimisation globale, nous nous intéressons aux méta-heuristiques qui font l'objet de ce chapitre.

Multi-objectif :

Les problèmes d'optimisation rencontrés en pratique sont rarement mono objectif plusieurs paramètres contradictoires à satisfaire sont présents. L'optimisation multi-objectif est disponible depuis environ trois décennies, et son application dans les problèmes du monde réel ne cesse d'augmenter. Son but est de chercher à optimiser plusieurs composantes de la fonction objective.

Les approches de résolution des problèmes multi-objectif peuvent être réparties en trois classes : approches basées sur la transformation du problème en un problème mono-objectif (simple objectif), approches non-Pareto et approches Pareto. (Nakib, 2007)

La transformation du problème en un problème mono-objectif :

Cette approche, décrite comme une approche naïve de l'optimisation multi-objectif, consiste simplement à transformer un problème multi-objectifs en un problème à objectif unique, pour lequel il existe de nombreuses méthodes de résolution. Parmi les méthodes qui utilisent cette approche, on peut citer les méthodes d'agrégation et les méthodes ε -contraints. (Sekkal & Belkaid, 2020)

Dans les méthodes d'agrégation, on additionne tous les objectifs après avoir affecté à chacun d'eux un coefficient de poids. Ces coefficients représentent l'importance relative que le décideur attribue à l'objectif, et on obtient une seule fonction objectif f telle que : (Hafid, 2013)

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x) \quad (2-1)$$

Avec : λ_i le poids de la i^{eme} fonction objectif.

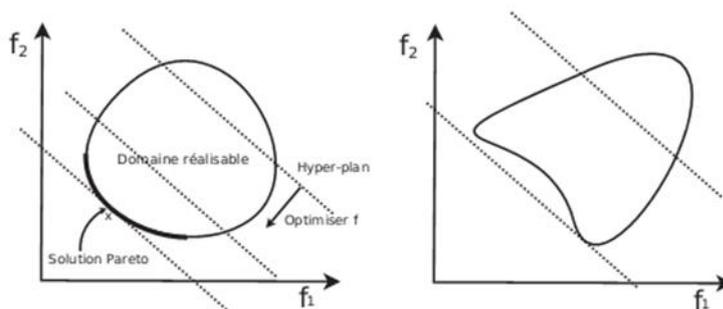


Figure 2-1 représentation graphique du principe de la méthode d'agrégation. (Hafid, 2013)³

L'autre méthode, appelée ϵ - contraintes (Nakib, 2007), est basée sur l'optimisation d'une fonction objectif f_j sujette à des contraintes sur les autres fonctions f_i ($j \neq i$). Le modèle mathématique pour deux fonctions objectif : (Hafid, 2013)

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(x) && (2-2) \\ \text{Sous les contraintes} &&& \end{aligned}$$

$$x \in C \text{ et } f_2(x) \leq \epsilon_2 \quad (2-3)$$

L'approche non-Pareto :

Cette approche est également appelée "approche non agrégée". En général, les méthodes basées sur cette approche traitent les objectifs séparément. Parmi ces méthodes on trouve : la méthode lexicographique. (Nakib, 2007)

Dans cette méthode, proposée par Fourman (1985), les fonctions objectif sont d'abord rangées par ordre d'importance. Ensuite, on optimise dans cet ordre les fonctions objectif les unes après les autres. La formulation mathématique du problème (pour deux fonctions à optimiser) est la suivante : (Hafid, 2013)

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_1(x) && (2-4) \\ \text{Sous les contraintes} &&& \end{aligned}$$

$$x \in C \quad (2-5)$$

Soit x_1^* la meilleure solution trouvée avec $f_1^* = f_1(x_1^*)$, f_1^* devient alors une nouvelle contrainte, et l'expression du nouveau problème est donc :

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_2(x) && (2-6) \\ \text{Sous les contraintes} &&& \end{aligned}$$

$$x \in C \quad (2-7) \\ \text{et } f_1(x) = f_1^*$$

³ La solution Pareto : est un optimum dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur une composante du vecteur des fonctions objectifs sans dégradation d'au moins une autre composante.

Contrairement aux autres approches qui combinent les critères ou les traitent séparément, les approches de Pareto utilisent la notion de dominance pour sélectionner des solutions qui font converger la population vers un ensemble de solutions efficaces. (Nakib, 2007)

Ces méthodes donnent un ensemble de solutions possibles (solutions de Pareto) au problème, mais ne permettent pas de choisir une alternative plutôt qu'une autre. Le choix de la solution finale revient à l'utilisateur (décideur).

2.3 Les Méta-heuristiques

Les algorithmes de méta-heuristique ont été largement utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes dans divers domaines des disciplines scientifiques et de l'ingénierie, puisque les techniques classiques et traditionnelles risquent de ne pas trouver efficacement les solutions optimales globales.

Dans la littérature, diverses classes de métaheuristiques inspirées de divers modèles d'espèces biologiques ou de phénomènes physiques ont été développées pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Une caractéristique commune à ces algorithmes est qu'ils passent par trois phases générales : initialisation, recherche de voisinage et terminaison. En d'autres termes, ces algorithmes partent d'une population de solution(s) initiale(s) et recherchent ensuite itérativement une meilleure solution dans le voisinage de la ou des solution(s) existante(s) en suivant des mécanismes spécifiques jusqu'à ce que la condition d'arrêt soit remplie.

Définition : Une métaheuristique est principalement définie comme un processus itératif de génération qui guide une heuristique subordonnée en combinant intelligemment divers concepts pour explorer et exploiter l'espace de recherche en développant des stratégies d'apprentissage pour structurer l'information afin de trouver des solutions quasi optimales. (Belkaid, 2014)

La principale différence entre les méta-heuristiques et les approches classiques est la façon dont elles proposent le prochain mouvement dans l'espace des solutions. Ici, les stratégies et les mécanismes utilisés pour proposer des mouvements plus fiables deviennent cruciaux. (Belkaid, 2014)

Deux étapes dans la conception d'une méta-heuristique sont jugées par (Talbi E. , 2009) comme essentielles pour sa mise en œuvre :

La représentation de la solution : Lors de la définition d'une représentation, le choix du codage est très important, il doit être adapté au problème étudié. En effet, il faut savoir comment appliquer les opérateurs de recherche (voisinage, reproduction, etc) sur cette représentation et comment la solution sera évaluée. (Talbi, 2009)

La définition de la fonction objectif : Puisque, une fonction objectif mal définie, peut conduire à obtenir d'inacceptables solutions et ceci quelle que soit la méta-heuristique utilisée.

2.3.1 Les algorithmes génétiques (AG)

L'AG est considéré comme un algorithme évolutif et une méthode basée sur la population qui tente de trouver les solutions optimales ou quasi-optimales en effectuant une recherche aléatoire. La base de l'AG a été principalement instaurée par

(Holland, 1975). La méthode de l'AG a été utilisée avec efficacité pour résoudre des problèmes combinatoires continus et discrets (Mitchell, 1996). La simplicité et la capacité de trouver rapidement des solutions raisonnables à des problèmes complexes de recherche et d'optimisation ont suscité un intérêt croissant pour l'AG. Cet algorithme est basé sur les principes de "survie du plus apte" de la théorie de l'évolution de Darwin et simule le processus de l'évolution naturelle. (Belkaid, Yalaoui, & Sari, 2016)

En général, un AG contient un ensemble d'individus qui constituent la population. Chaque individu de la population est représenté par un chromosome particulier qui désigne une solution plausible au problème existant. Tout au long des répétitions consécutives, appelées générations, les chromosomes évoluent à travers le processus de reproduction. Au cours de chaque génération, la valeur de fitness (la fonction objective) de chaque chromosome est évaluée. Après la sélection de certains chromosomes de la génération existante comme parents, la progéniture sera produite par des opérateurs de croisement ou de mutation. L'algorithme sera arrêté lorsqu'une condition d'arrêt sera atteinte.

L'application d'un algorithme génétique, à tout problème pratique, met en jeu six composantes : (Nakib, 2007)

- A. Une représentation sous la forme d'un chromosome des solutions.
- B. Une fonction objectif pour évaluer la qualité, en termes de fitness, de chaque individu.
- C. Une méthode d'initialisation de la population des solutions candidates.
- D. Les valeurs des paramètres de l'algorithme génétique utilisé (par exemple, la taille de la population).
- E. Les opérateurs génétiques qui produisent l'ensemble des nouveaux individus.
- F. Le critère d'arrêt de l'algorithme génétique.

Les opérateurs utilisés dans les algorithmes génétiques :

- A. Opérateur de sélection : cet opérateur est utilisé pour la sélection de la ou les populations qui doivent passer par les processus de croisement et de mutation.
- B. Opérateur de croisement : le but de cette opération est de maintenir la diversité en manipulant les composantes des individus (chromosomes). Une fois la sélection est effectuée, de nouveaux individus, appelés enfants, sont créés par croisement, c'est -à-dire en échangeant des parties des individus de la population (parents). (Nakib, 2007)

Cet échange se fait en sélectionnant un point de découpage, aléatoirement (avec une densité de probabilité uniforme), et en échangeant ensuite les deux sous-chaînes de chacun des deux parents. Considérons, par exemple, deux chaînes de parents A et B :

A=101 :101 ; B=110 :010 ;

(:) représente le point de coupure (pas forcément au milieu).

Après croisement on obtient : A*=101 010 ; B*=110 101 ;

A* et B* sont les enfants.

C. Opérateur de mutation : le principe de la mutation consiste à tirer aléatoirement un gène (par exemple, un bit, dans le cas du codage binaire) dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire. (Nakib, 2007)

L'élitisme : Une stratégie élitiste consiste à conserver au moins un individu (généralement avec la meilleur fitness) de la population de la génération précédente, dans la génération suivante.

Le pseudo code d'Algorithme génétique est présenté dans la Figure 2-2 tiré de (Hafid, 2013).

Etape 1 (Initialisation) :

– Générer N population / chromosomes en utilisant une distribution aléatoire normale dans S,

– Niter=0,

Etape 2 (Evaluation) : Évaluer le coût de chaque point /chromosome

Etape 3 (Test d'arrêt) : Si la condition d'arrêt = vrai alors Fin

Etape 4 (Opération génétiques) :

– **Selection** : Sélectionner $m \leq N$ parents parmi la population,

– **Croisement** : Créer m nouveaux points (offsprings), à partir des parents sélectionnés précédemment,

– **Mutation** : Muter les offsprings produits dans l'étape de croisement avec la probabilité P_m ,

Etape 5 (Remplacement) : remplacer les m mauvaises chromosomes de la population avec les offsprings générés précédemment,

Etape 6 (Technique locale) : créer en utilisant la procédure de la technique local un point d'essai \bar{x} . Si $f(\bar{x}) \leq f(x_h)$ où x_h est le plus mauvais point en cours. alors on remplace x_h par \bar{x} ,

Etape 7 (Incrémentaie) :

– **Affecter** : niter = niter+1,

– **Aller à l'Etape 2,**

Figure 2-2 : Pseudo code de l'algorithme génétique.

2.3.2 Recherche tabou

L'algorithme de recherche tabou a été introduit par (Glover, 1986) en 1986. Contrairement à la méthode de l'AG cette méthode consistant en l'évolution d'une seule solution. Au début, on explore tout le voisinage de la solution courante, puis on choisit la solution de ce voisinage qui minimise le critère à optimiser.

L'originalité de cette méthode est l'introduction d'une mémoire par l'intermédiaire de l'utilisation de la liste tabou. Cela consiste à enregistrer chaque mouvement, le mouvement est ici l'acte qui a produit la nouvelle solution à partir de la solution initiale, et à interdire que cela se reproduise. La liste des tabous est généralement limitée par un nombre N de mouvements qui peuvent être enregistrés, de sorte que l'algorithme enregistre les N mouvements précédents, et à chaque itération on décale la mémoire. Mais on peut faire jouer cette mémoire de d'autres façons.

```

On génère la solution initiale  $x_0$ .
 $x \leftarrow x_0$ 
 $f^* \leftarrow f(x_0)$ 
 $x^* \leftarrow x_0$ 
 $\mathcal{T} \leftarrow \emptyset$ .
tant que critère de fin non rencontré faire
   $x \leftarrow \arg \min_{x' \in (\mathcal{V}(x) \setminus \mathcal{T})} (f(x'))$ 
  si  $f(x) < f^*$  faire
     $f^* \leftarrow f(x)$ 
     $x^* \leftarrow x$ 
  fin
  On met  $\mathcal{T}$  à jour.
fin

```

Figure 2-3 : pseudo code de l'algorithme de la recherche tabou.

Pour certains problèmes d'optimisation, la méthode tabou a donné d'excellents résultats, d'ailleurs, dans sa forme de base, le procédé comprend moins de paramètres d'ajustement que le recuit simulé, ce qui le rend plus facile à utiliser. (Hafid, 2013)

2.3.3 Colonies de fourmis

Cette méthode s'inspire directement du comportement d'une colonie de fourmis qui évoluent dans un milieu et échangent des informations en laissant sur leur parcours une piste de phéromones. (Reynès, 2007)

L'illustration de la capacité des fourmis à chercher le chemin le plus court est donné via l'exemple de l'apparition d'un obstacle sur un chemin entre la nourriture et le nid. (Nakib, 2007)

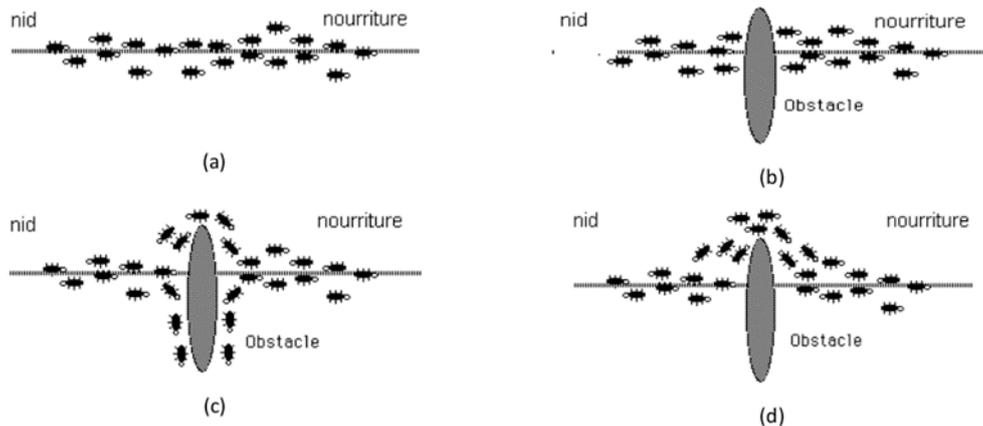


Figure 2-4 : présente une illustration de la procédure suivie par les fourmis pour aller chercher de la nourriture.

Ce comportement est simulé par un algorithme appelé ACO (*Ant Colony Optimization*).

Dans l'ACO, chaque fourmi est représentée par un agent qui construit une solution et la piste de phéromones représente une information qui sera utilisée de façon probabiliste pour faire évoluer les fourmis-solutions. (Reynès, 2007)

Dans le contexte d'ACO, on considère que les fourmis se déplacent sur un graphe valué. Pour construire ce graphe, on définit un ensemble $\varepsilon = \{e^1, e^2, e^3, \dots, e^k\}$ d'éléments pour constituer les solutions (c'est une sorte d'alphabet de base pour la construction des solutions). On construit alors un graphe qui a ces éléments pour sommets. Les fourmis vont alors pouvoir construire les solutions en parcourant les arcs du graphe. À chaque étape, la fourmi va choisir son déplacement de façon probabiliste en se basant sur (Reynès, 2007) :

- L'information localement disponible (phéromone laissée par les autres fourmis et coût des éléments).
- Sa propre mémoire (qui stocke l'état de la solution en construction).
- Les contraintes du problème.

```

iter ← VRAI
x ← ∅
tant que iter=VRAI faire
  On construit la liste Cand des mouvements possibles.
  s ← card(Cand)
  pour i = 1, 2, ..., s faire
    On calcule  $c_i$  le coût associé à l'ajout de Cand(i) à x,
    ( $c_i$  peut dépendre de l'état actuel de x)
    On enregistre la valeur  $t_i$  des phéromones associées à Cand(i).
    On calcule  $v_i$  une valeur liée à la violation des contraintes du
    problème que représente l'ajout de Cand(i) à x.
    On calcule  $p_i = g(c_i, t_i, v_i)$  la probabilité de se déplacer vers Cand(i).
  fin
  On choisit le mouvement que la fourmi va effectuer (en fonction des  $p_i$ ).
  On met à jour la piste de phéromones en fonction du mouvement choisi.
  Si x est complète iter ← FAUX
fin

```

Figure 2-5 : représente le pseudo code de la progression d'une fourmi.

2.3.4 Essaims particuliers

La méta-heuristique basée sur la méthode des essaims particuliers ("*Particle Swarm Optimization*", PSO) a été développée par Kennedy et al. (Kennedy & Eberhart, 1995) en 1995. L'idée de la procédure a été inspirée par le comportement social des bancs de poissons ou la chorégraphie de volée d'oiseaux. Comme l'AG, le PSO commence son processus de recherche en utilisant une population d'individus positionnés sur l'espace de recherche, et explore pour une solution optimale en mettant à jour les générations.

L'algorithme commence avec une initialisation aléatoire de l'essaim de particules dans l'espace de recherche. Chaque particule est modélisée par sa position dans l'espace de recherche et par sa vitesse. À chaque instant, toutes les particules ajustent leurs positions et vitesses, donc leurs trajectoires, par rapport à : (1) leurs meilleures positions, (2) la particule ayant la meilleure position dans l'essaim et (3) leur position actuelle. En réalité, chaque particule est influencée, non seulement par sa propre expérience, mais aussi par celle des autres particules. Si la vitesse calculée fait sortir une particule de l'espace de recherche, sa fitness n'est pas calculée. (Nakib, 2007)

Les différentes étapes de l'algorithme sont présentées sur la Figure 2-6. La méthode est analysée avec plus de détails dans (Clerc & and Kennedy, 2002).

1. **Initialiser** la population de particules avec des positions et vitesses aléatoires.
2. **Evaluer** la fonction objectif pour chaque particule et calculer g .
3. Pour chaque individu i , L_i est initialisée à P_i
4. **Répéter** jusqu'au critère d'arrêt
 - 4.1. Mettre à jour les vitesses et les positions des particules.
 - 4.2. Evaluer la fonction objectif pour chaque individu.
 - 4.3. Calculer les nouveaux L_i et g .
5. **Afficher** le meilleur état rencontré au cours de la recherche.

Figure 2-6 : les étapes de l'algorithme d'Essaims particulaires.

P_i : La position de la particule i .

L_i : La meilleure position de la particule i .

g : La meilleure position de tout l'essaim.

2.3.5 Recuit simulé (RS)

Dans cette section, nous présentons la métaheuristique nommée recuit simulé qui sera utilisée dans le quatrième chapitre pour résoudre le problème de l'optimisation ciblé par cette étude.

L'algorithme de RS est une méthode de recherche stochastique efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire et globale. Cette méthode a été proposée par (Kirkpatrick & Vecchi, 1983). L'idée de base est inspirée du processus physique de refroidissement de la matière (métal) en fusion jusqu'à la forme solide. Sur la base de cette procédure, le RS explore différentes zones de l'espace de solution d'un problème par recuit d'une température élevée à une température basse. Au cours du processus de recherche, les bonnes solutions et même les solutions de faible qualité sont acceptées avec une probabilité non nulle liée à la température dans le programme de refroidissement à ce moment. Cette caractéristique permet d'éviter de se retrouver piégé dans les minima locaux. Au début, cette probabilité est grande, et elle sera réduite pendant l'exécution avec un paramètre positif qui représente la température.

Comme il est présenté dans la Figure 2-7, l'algorithme commence avec une température initiale élevée et contrôle sa décroissance au sein de l'algorithme de *Metropolis* qui est un algorithme itératif permettant d'atteindre l'état d'équilibre thermodynamique d'un système simulé à une température T (Metropolis, 1953). Plusieurs lois de décroissance de la température peuvent être utilisées en pratique. (Nakib, 2007)

On génère une solution initiale x .

```

pour  $i = 1$  à  $N$  faire
    pour  $j = 1$  à  $M_i$  faire
        Dans  $\mathcal{V}(x)$ , on génère  $x'$  aléatoirement ou par recherche d'optimum.
        si  $f(x') \leq f(x)$  faire
             $x \leftarrow x'$ ,
        sinon faire
             $x \leftarrow x'$  avec probabilité  $\exp(\frac{f(x)-f(x')}{T_i})$ .
        fin
    fin
fin

```

Figure 2-7 : Pseudo code de l'algorithme de recuit simulé (Reynès, 2007)

Le RS utilise l'algorithme de *Metropolis*. Son principe consiste à itérer les deux étapes suivantes :

Évaluer la variation d'énergie associée à une transition élémentaire aléatoire de l'état courant i , d'énergie E_i , vers un nouvel état j , d'énergie E_j : $\Delta E_{ij} = E_j - E_i$;

Accepter la transition vers le nouvel état avec une probabilité P_{ij}

$$\text{Où } \begin{cases} P_{ij}(T) = 1 & \text{si } \Delta E_{ij} \leq 0 \\ P_{ij}(T) = e^{\frac{-\Delta E_{ij}}{T}} & \text{si } \Delta E_{ij} > 0 \end{cases}$$

Remarque : E ici, représente la fonction objectif dans l'algorithme de recuit simulé.

Donc, à chaque fois qu'on a une détérioration dans la valeur de résultat de la solution voisine (C'est-à-dire, $\Delta E_{ij} > 0$), on calcule la valeur de probabilité et on la compare avec un numéro aléatoire généré, on accepte la solution voisine et écrase l'ancienne solution si le numéro généré est inférieur à la probabilité.

Dans l'algorithme de RS, nous trouvons certains paramètres de contrôle principaux qui doivent être déterminés avec beaucoup de soin car ils sont cruciaux pour la bonne mise en œuvre de la métaheuristique. Ils sont :

- La température initiale.
- La fonction de décroissance de la température.
- Le critère de changement de palier de température.
- Le critère d'arrêt.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer la valeur de ces paramètres. Par exemple, pour calculer la température initiale, on peut utiliser une méthode basée sur l'observation de la variation moyenne de la fonction f . À partir d'une configuration initiale S_0 , un certain nombre de solutions S'_0 (environ 50 à 100) telles que : $f(S'_0) > f(S_0)$ est tiré, ainsi la variation moyenne (Δf) est calculée. La température initiale T_0 est calculée de façon à accepter au départ un certain pourcentage (p) de mouvements dégradant la fonction f . La valeur de T_0 est déduite de la relation suivante :

$$p = e^{\frac{-\Delta f}{T_0}} \rightarrow T_0 = \frac{-\Delta f}{\ln(p)} \quad (2-8)$$

Le recuit a connu un grand succès dans différents domaines d'application, grâce à ses deux atouts principaux : un comportement type boîte noire et une facilité de "réglage" des paramètres internes. D'un point de vue théorique, le recuit simulé permet d'approcher de près la solution optimale du problème plus rapidement qu'une exploration exhaustive dans l'espace de recherche. En pratique, un bon réglage des paramètres internes de l'algorithme permet d'accélérer la convergence vers une solution pseudo optimale, avec une précision prédéfinie. Le recuit simulé est aussi adapté pour résoudre les problèmes d'optimisation continue. (Nakib, 2007)

L'inconvénient majeur de cet algorithme est sa lenteur. Toutefois, plusieurs tentatives de parallélisation de l'algorithme ont été proposées dans la littérature, au détriment de sa convergence théorique. Il est à signaler qu'il existe des approches rapides qui sont simples à mettre en œuvre et qui conservent les propriétés de convergence, comme par exemple dans (Roussel-Ragot, 1990), où le recuit simulé est réparti sur plusieurs calculateurs en parallèle.

En optimisation multiobjectif, le recuit simulé (RS) a été appliqué après transformation du problème multiobjectif en un problème mono-objectif (Friesz, 1993) (Serafini P. , 1992). Les deux méthodes les plus populaires sont : la méthode MOSA ("Multiple Objective Simulated Annealing") proposée dans (Ulungu, 1999), où le RS a été utilisé pour rechercher la surface de compromis, et la méthode PASA ("Pareto Archived Simulated Annealing") proposée dans (Engrand, 1997) et qui utilise une fonction d'agrégation des fonctions objectifs couplées, avec un système d'archivage de solutions non dominées.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les problèmes d'optimisation en général, sous leurs deux formes, mono-objectif et multi-objectif, avec des méthodes de résolution. Nous avons ensuite présenté certaines des fameuses métaheuristiques qui existent et nous avons insisté sur la métaheuristique de recuit simulé puisque nous l'utiliserons dans le prochain chapitre pour résoudre le problème de dimensionnement des lots considéré dans ce travail.

Chapitre 03 : Le dimensionnement des lots

3.1 Introduction

Il existe plusieurs niveaux hiérarchiques de décisions qui doivent être prises par une entreprise de production dans le cadre de ses activités liées à la gestion de la production. Ces décisions peuvent être classées en fonction de leur portée dans la planification de la production : décisions à long terme, à moyen terme et à court terme. (Mohammadi M. , 2015)

Dans la planification à long terme, l'accent est généralement mis sur l'anticipation des besoins globaux et implique des décisions stratégiques telles que le choix des produits, des équipements et des processus, l'emplacement et la conception des installations et la planification des ressources. La planification à moyen terme implique souvent de prendre des décisions sur la planification des besoins en matériel et de déterminer les quantités à produire ou la taille des lots sur la période de planification, de manière à optimiser certains critères de performance tels que la minimisation des coûts globaux, tout en répondant aux exigences de la demande et en satisfaisant les contraintes de capacité existantes. Dans la planification à court terme, les décisions impliquent généralement la programmation au jour le jour d'opérations telles que le séquençement des tâches ou le contrôle dans un atelier.

Les décisions relatives au dimensionnement des lots posent le problème de l'identification du moment et de la quantité d'un produit à produire de manière à minimiser les coûts de lancement, de production et de stockage. Prendre les bonnes décisions en matière de dimensionnement des lots affectera directement les performances du système et sa productivité, qui sont importantes pour la capacité d'une entreprise manufacturière à être compétitive sur le marché.

Donc, on peut définir le dimensionnement du lot comme un problème de planification de la production. L'horizon de planification est divisé en T périodes (par exemple T jours) dont chaque période a sa propre demande d'un ou plusieurs produits. Bien sûr, dans le processus de production, on consomme le temps de fabrication, et souvent un temps de lancement de la production, sur une ressource (ou un ensemble de ressources). L'objectif est de déterminer les périodes dans lesquelles il faut produire et les quantités à produire pour chaque produit dans chaque machine (si on a plusieurs machines). Le plan résultant doit satisfaire toutes les demandes et minimiser l'ensemble des coûts, en respectant les contraintes de capacité. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Etat de l'art sur les problèmes de dimensionnement des lots avec contraintes de capacité., 2003)

Depuis la littérature, on peut dire que les problèmes de dimensionnement des lots sont tellement divers qu'il est vraiment difficile de les classer dans quelques catégories spécifiques. Mais on peut distinguer deux groupes majeurs de dimensionnement des lots (Mohammadi, Torabi, Fatemi Ghomi, & Karimi, 2010). (1) Le problème de dimensionnement à une seule gamme de produit et (2) le problème de dimensionnement à plusieurs gammes des produits.

La gamme de produit ici veut dire le nombre de produits à produire sur la chaîne de fabrication considérée.

Dans la planification de la production à une seule gamme de produit, il n'y a qu'un seul article final (produit final) pour lequel l'activité de planification doit être organisée, tandis que dans la planification de la production multi-gammes, il y a plusieurs articles finaux. La complexité des problèmes multi-gammes est beaucoup plus grande que celle des problèmes individuels.

Nous sommes intéressés par les problèmes de dimensionnement des lots d'une seule gamme de produit, ce qui constitue l'objectif de la section suivante.

Dans ce chapitre, nous abordons un problème d'optimisation à moyen terme, qui est le dimensionnement des lots. Nous commençons par les problèmes de dimensionnement de lot SILSP, nous présentons leurs modèles mathématiques. Nous discutons ensuite sur certaines des principales caractéristiques d'un problème de dimensionnement des lots. Nous finalisons notre travail par quelques méthodes de résolution pour ce type des problèmes.

3.2 Problème de dimensionnement des lots d'une seule gamme de produit (SILSP)

Les chercheurs ont accordé un intérêt particulier au problème de gamme unique (SILSP) en raison de sa relative simplicité et de son importance en tant que sous-problème de certains problèmes plus "difficiles" de dimensionnement des lots. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006)

Le problème de dimensionnement des lots de gamme de produit unique (SILSP) est (comme tout autre problème de dimensionnement de lot) un problème de planification dans lequel la demande d'un produit unique varie dans le temps sur des périodes T . L'objectif est de déterminer les périodes où la production aura lieu et les quantités qui doivent être produites au cours de ces périodes. La production totale doit satisfaire la demande tout en minimisant les coûts totaux. Les coûts de base sont le coût de production unitaire p_t (où : $t=1, \dots, T$ est la période) ; le coût de lancement s_t , qui est un coût fixe encouru si un processus de production est lancé au cours d'une période t , et le coût de stockage h_t . (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006)

Ces coûts ne dépendent pas forcément des périodes, ils peuvent dépendre des machines, ça veut dire que le coût de lancement par exemple varie d'une machine à une autre, ou peut aussi ne pas dépendre ni du temps ni de machines, par exemple le coût de stockage peut être fixé pour n'importe quel produit à n'importe quel moment.

C'est pourquoi nous avons dit précédemment que les problèmes de dimensionnement sont très diversifiés. Et avec cette diversité de types, il y a une diversité de modèles mathématiques.

3.2.1 Modèle Mathématique

Dans cette section, nous considérons un simple problème de dimensionnement des lots d'une seule gamme de produit standard sans aucune extension, comme les limites de capacité des ressources ou la contrainte de plusieurs niveaux. Dans la section suivante, nous décrivons ce qui devrait être ajouté au modèle simple pour répondre à ces extensions.

Soit T la longueur de l'horizon de planification et d_t, p_t, s_t et h_t sont, respectivement, la demande, le coût de production unitaire, le coût du lancement et le coût de stockage, au cours de la période t ($t = 1, \dots, T$).

Les variables de décision sont :

X_t : La quantité à produire dans de la période t .

I_t : Le niveau de stock à la fin de la période t .

Y_t : Est égal à 1 si la machine est lancée dans la période t ($X_t > 0$), et 0 sinon.

Il existe différentes modélisations pour les problèmes de dimensionnement des lots ; nous mentionnons ici les plus fréquemment rencontrés dans la littérature :

Le modèle agrégé (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Etat de l'art sur les problèmes de dimensionnement des lots avec contraintes de capacité., 2003):

C'est sûrement le modèle le plus fréquemment utilisé pour les problèmes de dimensionnement des lots. Ce modèle représente le problème d'une façon quasi-intuitive. Il est décrit comme suit :

$$\min \sum_{t=1}^T (s_t Y_t + p_t X_t + h_t I_t), \quad (3-1)$$

Sous :

$$I_{t-1} + X_t = d_t + I_t \quad \forall t \quad (3-2)$$

$$X_t \leq Y_t d_t \quad \forall t \quad (3-3)$$

$$Y_t = \begin{cases} 1 & \text{si } : X_t > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall t, \quad (3-4)$$

$$I_t, X_t \geq 0 \quad \forall t \quad (3-5)$$

Nous supposons, sans perte de généralité, que le stock au début et le stock à la fin de l'horizon de planification sont nuls. Ce qui veut dire que $I_0 = I_T = 0$. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006)

La fonction objectif (3-1) minimise la somme des coûts de lancement, de production et de stockage sur tout l'horizon. La contrainte (3-2) est l'équation de l'équilibre des stocks. Elle indique que le stock entrant (I_{t-1}) ajouté à la production de la période en cours (X_t) est utilisé pour satisfaire la demande (d_t). Ce qui reste est maintenu en stock à la fin de la période (I_t). La contrainte (3-3) relie les variables de production continue X_t aux variables de lancement binaire Y_t . (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006)

Même si elle est simple et facile à utiliser, la formulation en agrégation n'est pas la seule façon de présenter un problème de dimensionnement des lots.

Modèle sans variables de stock (NIF) :

Dans la formulation de modèle agrégé, en utilisant le fait que $I_t = \sum_{i=1}^t X_i - \sum_{i=1}^t d_i$, $t = 1, \dots, T$ et en combinant cela avec la contrainte $I_t \geq 0 (\forall t)$ et la contrainte de l'équilibre des stocks (3-2), on peut déduire une formulation sans variables de stock (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006). Par exemple, la fonction objectif (3-1) devient :

$$\min \sum_{t=1}^T s_t Y_t + \sum_{t=1}^T \left(p_t + \sum_{i=t}^T h_i \right) X_t - \sum_{t=1}^T h_t d_t \quad (3-6)$$

Comme vous pouvez le remarquer, il n'y a pas de I_t .

Le modèle basé sur un problème de plus court chemin :

Les auteurs dans [62] ont utilisé une technique de changement (redéfinition) de variables et ont proposé un modèle pour le SILSP basé sur un problème de plus court chemin. Cette technique est basée sur la fameuse représentation graphique du problème de dimensionnement des lots pour un seul produit et sans capacité. Un nœud est affecté à chaque période avec une période fictive (générique) $T+1$. L'arc entre deux nœuds u et v représente l'option de produire toute la demande qui se trouve entre les périodes u et $v-1$ (inclus) à la période u . Or, le problème de dimensionnement des lots d'un seul produit sans capacité consiste à trouver le plus court chemin entre les nœuds 1 et $T+1$. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Etat de l'art sur les problèmes de dimensionnement des lots avec contraintes de capacité., 2003)

Linéarisation des contraintes non linéaires :

Dans le processus de résolution des problèmes de dimensionnement des lots, nous serons probablement confrontés à des contraintes non linéaires, qui provoquent un problème majeur dans la résolution du modèle, surtout s'il est sous forme d'un programme, car les méthodes de résolution diffèrent radicalement entre un problème linéaire et un problème non linéaire.

Un programme non linéaire (NLP) est similaire à un programme linéaire dans la mesure où il est composé d'une fonction objective, de contraintes générales et de bornes variables. La différence est qu'un programme non linéaire comprend au moins une fonction non linéaire, qui peut être la fonction objective, ou une partie ou la totalité des contraintes. (Chinneck)

Une fonction non linéaire est celle où au moins une variable de décision n'est pas à la puissance de 1. Soit : X une variable de décision. Par exemple : $X^2, \frac{1}{X} = X^{-1}, X.Y$ (où Y est aussi une variable de décision) ...etc.

Le problème est que les modèles non linéaires sont intrinsèquement beaucoup plus difficiles à optimiser. Il y a de nombreuses raisons pour cela, dont certaines : les Optima ne sont pas limités à des points extrêmes, il peut y avoir de multiples zones de

faisabilité déconnectées, il est difficile de satisfaire les contraintes d'égalité (et de les maintenir). (Chinneck)

Cette difficulté ne signifie pas qu'ils sont impossibles à résoudre, en fait plusieurs solveurs d'optimisation acceptent des contraintes non linéaires, notamment fmincon, fseminf, fgoalattain, fminimax, parmi d'autres. (MathWorks, s.d.)

Mais généralement, nous pouvons transformer une contrainte non linéaire à une contrainte linéaire en utilisant de nombreuses méthodes. Comme la contrainte proposé dans (Masmoudi, Yalaoui, Ouazene, & Chehade, 2017) et qui a été linéarisée par l'introduction de la grande constante M. Pour linéariser un produit de variables entières et binaires, ils ont utilisé cette formulation comme exemple :

$$A \geq X.Y \quad (3-7)$$

Où A est un nombre positif, X est une variable entière et Y est une variable binaire. En introduisant la grande constante M, on obtient :

$$A \geq X - M.(1 - Y) \quad (3-8)$$

3.3 Caractéristiques des modèles de dimensionnement des lots

La complexité des problèmes de dimensionnement des lots dépend des caractéristiques prises en compte par le modèle. Les caractéristiques suivantes ont une influence sur la classification, la modélisation et la complexité du problème.

3.3.1 Horizon de planification

L'horizon de planification peut être fini ou infini. Un horizon de planification fini est généralement accompagné d'une demande dynamique et un horizon de planification infini d'une demande statique. En outre, le système peut être observé en continu ou à des points temporels discrets, ce qui le classe alors comme un système de type continu ou discret. En termes de terminologie des périodes de temps, les problèmes de dimensionnement des lots entrent dans les catégories des problèmes de *bigbucket* ou de *smallbucket*. Les problèmes de *bigbucket* sont ceux où la période est suffisamment longue pour produire plusieurs articles (dans les cas de problèmes à plusieurs articles), tandis que pour les problèmes de *smallbucket*, la période est si courte qu'un seul article peut être produit dans chaque période. (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003)

Le type d'horizon de planification affecte directement le modèle mathématique. La plupart du temps, l'ajout de quelques contraintes au modèle standard ((1)-(5) peut ne pas suffire, de sorte que toute la formulation doit être modifiée dans ce cas.

3.3.2 Nombre de niveaux

Les systèmes de production peuvent être à un seul niveau ou à plusieurs niveaux. Dans les systèmes à un seul niveau, le produit final est généralement simple. Les matières premières, après avoir été traitées par une seule opération (machine) telle que le forgeage ou le moulage, sont transformées en produit fini. En d'autres termes, le produit final est directement produit à partir de matières premières ou de matériaux achetés, sans sous-ensembles intermédiaires. Les demandes de produits sont évaluées directement à partir des commandes des clients ou des prévisions du marché

Dans les systèmes à plusieurs niveaux, il existe une relation parent-composant entre les articles. Les matières premières, après avoir été transformées par plusieurs opérations, deviennent des produits finis. La sortie d'une opération (niveau ou machine) est l'entrée pour une autre opération. Par conséquent, la demande à un niveau dépend de la demande au niveau de ses parents. Les problèmes à plusieurs niveaux sont évidemment plus difficiles à résoudre que les problèmes à un seul niveau.

Dans le cas d'un système à plusieurs niveaux, nous devons introduire une nouvelle dimension dans le modèle mathématique, le plus souvent désignée par « m » machines où $(m=1, \dots, N)$, tandis que N est le nombre total des machines ou des niveaux. Ainsi, dans un système de production à un seul niveau $N=1$.

3.3.3 Nombre d'établissements (usines)

L'idée de multiples établissements a également été introduite par (Zangwill, 1969) qui a examiné deux cas : les usines en parallèle et les usines en série. Dans le cas des usines parallèles, il n'y a pas d'interaction entre les usines et chaque usine satisfait ses propres besoins. Dans le cas des usines en série, la sortie d'une usine devient l'entrée d'une autre usine et la dernière usine satisfait la demande. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. European Journal of Operational Research, 2006)

La marge de changement est ici vaste, on peut ajouter des contraintes, des dimensions ou même changer tout le modèle mathématique.

3.3.4 Contraintes de capacité ou de ressources

Les ressources ou les capacités d'un système de production comprennent la main-d'œuvre, l'équipement, les machines, le budget, etc. Lorsqu'il n'y a pas de restriction de ressources, on dit que le problème est sans contrainte de capacité, et lorsque les contraintes de capacité sont explicitement mentionnées, le problème est dit avec contrainte de capacité. La restriction des capacités est importante et affecte directement la complexité du problème. La résolution des problèmes sera évidemment plus difficile lorsque des contraintes de capacité existent. (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003)

Généralement, on ajoute une contrainte sous la forme :

$$A \cdot X_t \leq B \quad (3-9)$$

Où B représente la limite de la variable de décision X_t .

3.3.5 Détérioration des produits

Si la détérioration des objets est possible, nous rencontrons des restrictions dans le temps de stockage. Il s'agit là d'une autre caractéristique qui influencerait sur la complexité du problème (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003). C'est le cas, par exemple, de la nourriture, des produits pharmaceutiques, des produits chimiques et du sang.

On peut dans ce cas ajouter une contrainte permettant de limiter la durée de stockage.

3.3.6 Demande

Le type de demande est considéré comme un intrant dans le modèle du problème. Une demande statique signifie que sa valeur ne change pas avec le temps, elle est

stationnaire ou même constante, tandis qu'une demande dynamique signifie que sa valeur change avec le temps. Si la valeur de la demande est connue à l'avance (statique ou dynamique), elle est dite déterministe, mais si elle n'est pas connue exactement et que les valeurs de la demande qui se produisent sont basées sur certaines probabilités, alors elle est dite probabiliste. (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003)

3.3.7 Structure de lancement de la production

La structure de lancement est une autre caractéristique importante qui affecte directement la complexité du problème. Les coûts et/ou les temps de lancement sont généralement modélisés par l'introduction de variables binaires dans le modèle mathématique du problème, ce qui rend la résolution du problème plus difficile. Habituellement, le passage d'un produit à l'autre peut entraîner des temps et des coûts de préparation ce qu'on appelle les coûts de lancement.

3.3.8 Rupture de stock

Si la rupture de stock est autorisée, cela signifie qu'il est possible de satisfaire la demande de la période en cours dans les prochaines périodes (cas du *backlogging*), ou il peut être autorisé que la demande ne soit pas satisfaite du tout (cas des ventes perdues). La combinaison de *backlogging* et de ventes perdues est également possible (voir (Wee, 1999) pour un modèle de ce type). Cela introduit généralement un coût de rupture dans la fonction objectif (paiement d'une pénalité de retard par exemple). Les problèmes de rupture de stock sont plus difficiles à résoudre qu'en cas contraire. (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003)

3.3.9 Remise à neuf (re-fabrication)

Le problème de dimensionnement des lots avec les options de re-fabrication consiste en un problème de dimensionnement des lots où une partie (ou la totalité) des demandes de certaines périodes peut être satisfaite par la re-fabrication de produits qui ont été utilisés au cours de périodes précédentes. Cela peut être considéré comme une partie du cadre général de la logistique inverse. Parmi les applications de ce problème figure le traitement des palettes et conteneurs usagés qui peuvent être réparés et (éventuellement) stockés pour satisfaire une partie de la demande. (Karimi, Ghomi, & Wilson, 2003)

Cette caractéristique a un impact considérable sur la conception du modèle mathématique.

3.4 Méthodes de résolution

Plusieurs modèles exactes ont été proposées pour résoudre les problèmes de dimensionnement des lots. Ces méthodes donnent la solution exacte.

L'un des ancêtres de ces modèles est la formule EOQ (Economic Order Quantity) de [11], qui est un modèle à temps continu avec un horizon temporel infini. Il considère un seul produit et n'impose aucune restriction de capacité. Plus tard, le modèle EOQ a été étendu au problème de planification économique des lots (Economic Lot Scheduling Problem - ELSP) (Hanssmann, 1962; Rogers, 1958), pour prendre en compte plusieurs produits et limites de capacité. (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, &

Nordli, Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 2006)

On peut aussi trouver des algorithmes comme celui de (Rogers, 1958) utilisé pour résoudre un problème de bigbucket.

Les exemples de méthodes exactes comprennent également : (Wagner & Whitin, 1958) qui ont utilisé une formulation serrée basée sur un graphe et une redéfinition des variables ; (Eppen & Martin, 1987) et (Barany, Roy, & Strong, 1984) qui ont utilisé des inégalités valides (plans de coupe forts). (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 2006)

Dans les méthodes approximatives, les méta-heuristiques sont le groupe majeur, avec de nombreuses méta-heuristiques utilisées pour la résolution de différents problèmes de dimensionnement des lots tels que : L'algorithme génétique (Miller, G.L.Nemhauser, & M.W.Savelsbergh, 2000), la recherche tabou (K.Haase & U.Kohlmorgen, 1995) et le recuit simulé (Gopalakrishnan, K.Ding, J.M.Bourjolly, & S.Mohan, 2001). Et nous pouvons également trouver, toujours dans les méthodes approximatives, des heuristiques basées sur lagrangien comme (Salomon, R.Kuik, & L.N.VanWassenhove, 1993).

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une brève description des problèmes de dimensionnement des lots et de leurs caractéristiques qui diffèrent d'un problème à un autre. Nous avons également discuté certains travaux qui sont liés aux méthodes de résolution exactes et approximatives.

Dans le chapitre suivant, nous allons focaliser sur les problèmes de dimensionnement des lots multi-niveaux, d'une seule gamme de produit et avec des contraintes de capacité (CSILSP). Nous avons remarqué d'après la littérature, que pour ces problèmes en particulier, il y a une faible implémentation des méta-heuristiques pour la résolution (Brahimi, Dauzère-Pérès, Najid, & Nordli, Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 2006). Nous essayons de résoudre un problème de dimensionnement des lots en utilisant un algorithme d'une métaheuristique.

Chapitre 04 : Partie prédictive

4.1 Introduction

La vision de l'industrie 4.0 est de changer la façon dont nous abordons la production dans son ensemble pour quelque chose de plus performante, par rapport non seulement à l'ancien système de production, appelé aussi industrie 3.0, mais aussi aux mêmes technologies 4.0 rassemblées peut-être d'une manière différente. Ainsi l'industrie 4.0 est plus centrée sur la vision que sur les technologies.

Dans ce contexte, comment nous approchons les problèmes industriels, ou les problèmes d'optimisation, va évidemment changer. C'est pourquoi nous avons essayé d'examiner ce privilège offert par l'industrie 4.0 ou plus tôt par ses technologies, dans un cas réel d'utilisation industrielle.

Dans notre travail, notre souhait était de résoudre un problème industriel dans un contexte Industrie 4.0, c'est-à-dire en utilisant les outils et les méthodes fournis par cette nouvelle révolution. Avec des contraintes environnementales.

Généralement, les entrepreneurs préfèrent alimenter leurs usines avec de l'énergie traditionnelle, car elle est plus fiable (moins de fluctuations de l'alimentation électrique) et beaucoup moins chère que l'énergie renouvelable, mais le problème est qu'elle émet beaucoup plus de gaz à effet de serre (GES), ce qui a provoqué le problème de la pollution en premier lieu.

C'est pourquoi les gouvernements tentent aujourd'hui de pousser les entreprises à utiliser une énergie plus propre et plus écologique en créant des restrictions non seulement pour l'approvisionnement en énergie mais aussi pour toute l'activité industrielle. Les entreprises d'aujourd'hui, ou de demain, seront obligées de contrôler leur production en termes d'émissions de carbone. Mais jusqu'à aujourd'hui, les gouvernements et les hommes d'affaires ne semblent pas s'entendre sur un système commun de limitation des émissions.

L'une des initiatives prometteuses est le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (GES). Ce système destiné à réduire la pollution de notre atmosphère est composé de deux parties.

Le plafond des émissions de GES qui sont à l'origine du réchauffement climatique est une limite ferme à la pollution. Ce plafond devient de plus en plus strict avec le temps. (EDF, s.d.)

La partie échange est un marché permettant aux entreprises d'acheter et de vendre des quotas qui leur permettent d'émettre une certaine quantité, l'offre et la demande déterminant le prix. L'échange incite fortement les entreprises à faire des économies en réduisant leurs émissions de la manière la plus rentable possible. (EDF, s.d.)

Les gouvernements vont ainsi mettre un prix sur le carbone (ou GES), ce que l'on appelle la "tarification du carbone". Aujourd'hui, de nombreux pays ont commencé à mettre en œuvre cette stratégie, comme l'indique la Figure 4-1.

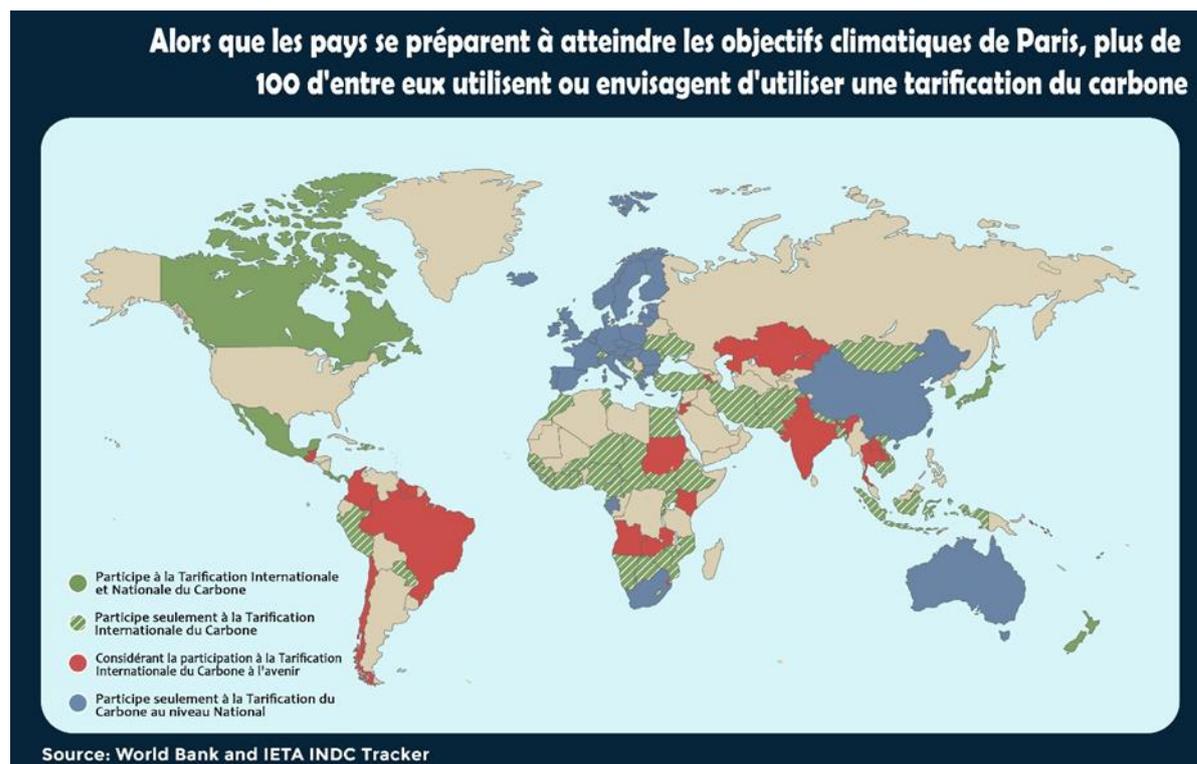


Figure 4-1 : une carte du monde indiquant les pays participant à la tarification nationale et/ou internationale du carbone. (Vox, s.d.)

La quantité de GES que chaque secteur est autorisé à émettre dépend de nombreux facteurs, nous avons considéré un système où la quantité est déterminée par produit unitaire fabriqué par l'entreprise. Nous avons essayé de résoudre un problème d'optimisation (CSILSP) dans ces conditions de plafonnement et d'échange des GES dans un contexte industrie 4.0.

Dans notre problème, nous n'avons pris en compte que les émissions dues à la production d'électricité, c'est-à-dire que nous avons négligé les émissions des machines.

Dans ce chapitre, nous présentons la première partie de notre travail de résolution d'un problème de dimensionnement de lot. Au début, nous décrivons le problème abordé avec son modèle mathématique, puis nous présentons les deux méthodes de résolution utilisées pour le résoudre. Nous finalisons par une comparaison des deux approches utilisées.

4.2 Description du problème

Comme tous les fournisseurs dans une chaîne logistique, les fournisseurs d'énergie doivent prévoir la demande afin de planifier la production et la transmission de l'énergie pour un meilleur service aux clients. Il est également nécessaire de protéger les installations de production d'énergie et de gérer la disponibilité de l'énergie de manière plus efficace. Comme les conditions de stockage et de distribution de l'énergie sont difficiles par rapport aux autres intrants d'un système de production, il devient crucial de prévoir la demande de charge.

Pour faire face à ce problème, les producteurs d'énergie proposent à leurs clients différents tarifs et options de contrat. Cette stratégie garantit que les fluctuations de la demande d'énergie sont contrôlées et précise la quantité d'énergie nécessaire à produire en permettant une transmission efficace de l'énergie aux clients. En ce qui concerne les clients industriels, l'adéquation entre les exigences du système et les offres sur le marché de l'énergie est l'une des décisions importantes qui doivent être prises. De plus, les sources d'énergie traditionnelles sont limitées et ont un énorme effet de serre sur la planète par rapport aux autres sources renouvelables. (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018)

Nous avons trois problèmes à résoudre, d'une part, le problème de l'efficacité énergétique qui peut être satisfait par des stratégies de planification et d'ordonnement appropriées. D'autre part, le choix de l'option de contrat énergétique appropriée par rapport aux besoins du système de production. Ce dernier a un impact majeur sur l'environnement. Enfin, en raison du système de plafonnement des émissions de GES des gouvernements, les entreprises ont une limite à ne pas dépasser en termes d'émissions.

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre 3, dans notre travail nous nous concentrons sur la résolution d'un problème de dimensionnement des lots multi-niveaux, d'une seule gamme de produit et avec des contraintes de capacité (CSILSP) avec différents fournisseurs d'énergie à choisir par un système de contrats sans dépasser les limites d'émission de GES tout cela sera géré dans un contexte d'industrie 4.0. Les données utilisées sont tirées du travail de (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018). Plus de détail sur le problème CSILSP se trouvent dans le chapitre 3.

Avant de passer au modèle mathématique, il sera utile de donner une brève description du problème de sélection des capacités contractuelles.

Dans le problème de capacité électrique contractuelle, le contractant paie la redevance énergétique utilisée qui est basée sur les kilowattheures, dont le prix unitaire varie en fonction des heures de pointe, des heures moyennes et des heures creuses, et paie également l'option contractuelle qui est une capacité dont il n'est pas censé trop dépasser ou être trop inférieur à l'option contractée.

Mais en cas de dépassement de la valeur de la puissance contractuelle, un coût de pénalité est ajouté sur la facture d'électricité. Pour éviter les frais de pénalité, le client doit s'assurer que la demande maximale pendant une période ne dépassera pas la valeur de la puissance contractuelle. En outre, la valeur contractuelle choisie doit couvrir le besoin en énergie du système de production. Un accord sur une capacité énergétique excessivement élevée peut obliger les clients à payer pour l'énergie non utilisée, ou une capacité énergétique inférieure aux besoins du système peut entraîner des coûts de pénalité élevés. En tenant compte de tous ces aspects, la capacité du contrat énergétique doit être choisie avec soin afin de réduire le coût de l'énergie et d'augmenter l'efficacité énergétique. (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018)

4.2.1 Modèle Mathématique

Notation :

Indice :

Chapitre 04 : Partie prédictive

m : Pour les machines.

t : Pour les périodes.

k : Pour les sources d'énergie.

Les paramètres :

N : Nombre des machines.

T : Nombre des périodes.

K : Nombre des sources d'énergie.

R_k : Nombre d'option de contrat pour la source d'énergie k .

ϕ_m : La puissance de la machine m .

p_m : Le temps de traitement de la machine m .

Co_t : Le prix d'électricité pendant la période t .

$\psi_{m,t} = \phi_m \cdot p_m \cdot Co_t$: Le coût de consommation d'électricité de la machine m pendant la période t .

h : Le coût de stockage unitaire (\$/unité. période).

$w_{m,t}$: Le coût de lancement de la machine m pendant la période t .

d_t : La demande extérieure dans la période t .

L_t : La longueur de la période t .

M : un grand nombre.

$E_{max}^{k,t}$: La puissance maximale que le fournisseur de la source k peut alimenter pendant la période t .

β : Taux de tolérance sur l'option contractée.

$V_{k,l}$: Option de contrat l pour la source d'énergie k ($l = 1, \dots, R_k$).

$Vcost_{k,l}$: Frais d'inscription dans l'option l de la source k .

U_k : Le coût de pénalité pour la source k .

Lim : La limite de CO2 émis par produit en g.

Car_k : Taux d'émission de CO2 de la source k en g.

Les variables de décisions :

$x_{m,t}$: La quantité à produire par la machine m dans la période t .

$I_{m,t}$: La quantité à stocker par la machine m dans la période t .

$C_{m,t}$: La date de fin de production de la machine m pendant la période t .

$S_{m,t}$: La date de début de production de la machine m pendant la période t .

$Y_{m,t}$: Une variable binaire, égale à 1 si la machine m est lancée dans la période t , 0 sinon.

$\alpha_{k,t}$: La demande réelle en puissance de la source k pendant la période t .

$v_{m,t}$: Une variable binaire, égale à 1 si la quantité $x_{m,t}$ est disponible sur le buffer $m-1$ au début de la période t , 0 sinon.

$f_{m,r,t}$: Une variable binaire, égale à 1 si $C_{r,t} > C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m$, 0 sinon.

$g_{m,r,t}$: Une variable binaire, égale à 1 si $C_{m,t} \geq C_{r,t}$, 0 sinon.

$AC_{k,t} = \max(0, (\alpha_{k,t} - Cont_{k,t}))$: L'énergie utilisée au-dessus de l'option contractée pour la source k pendant la période t .

$BC_{k,t} = \max((Cont_{k,t} - \alpha_{k,t}), 0)$: L'énergie utilisée au-dessous de l'option contractée pour la source k pendant la période t .

Chapitre 04 : Partie prédictive

$z_{m,t}$: Une variable binaire, égale à 1 pour la puissance maximale demandée ($\alpha_{k,t}$) pendant la période t , sinon 0.

$P_{k,l}$: Une variable binaire, égale à 1 pour l'option de contrat choisie, sinon 0.

$Emis$: L'émission de GES de tout le système dans toutes les périodes en g.

Fonction Objective :

$$\begin{aligned} Minz = & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^N (\psi_{m,t} \cdot x_{m,t} + h \cdot I_{m,t} + \omega_{m,t} \cdot \mathcal{Y}_{m,t}) \\ & + \sum_{l=1}^{R_k} \sum_{k=1}^K (Vcost_l \cdot P_{k,l}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K (U_k \cdot (AC_{k,t} + BC_{k,t})) \end{aligned} \quad (4-1)$$

Les contraintes :

$$X_{N,t} + I_{N,t-1} = d_t + I_{N,t} \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} x_{m,t} + I_{m,t-1} &= I_{m,t} + x_{m+1,t} \\ \forall m &= 1, \dots, N-1, t = 2, \dots, T \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\sum_{\tau=1}^t d_{\tau} \leq \sum_{\tau=1}^t x_{N,\tau} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (4-4)$$

$$x_{m,t} \leq \mathcal{Y}_{m,t} \cdot \sum_{\tau=t}^T d_{\tau} \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-5)$$

$$I_{m-1,t-1} \leq x_{m,t} + M \cdot v_{m,t} - 1 \quad \forall m = 2, \dots, N, t = 2, \dots, T \quad (4-6)$$

$$x_{m,t} \leq I_{m-1,t-1} + M \cdot (1 - v_{m,t}) \quad \forall m = 2, \dots, N, t = 2, \dots, T \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \\ \geq C_{m-1,t} - x_{m-1,t} \cdot p_{m-1} + (x_{m,t} - I_{m-1,t-1}) \cdot p_{m-1} \\ - M \cdot v_{m,t} \quad \forall m = 2, \dots, N, t = 2, \dots, T \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$\begin{aligned} C_{m,1} - x_{m,1} \cdot p_m \\ \geq C_{m-1,1} - x_{m-1,1} \cdot p_{m-1} + x_{m,1} \cdot p_{m-1} \\ = 2, \dots, N \quad \forall m \end{aligned} \quad (4-9)$$

$$C_{r,t} - C_{m,t} + x_{m,t} \cdot p_m \leq M \cdot f_{m,r,t} \quad (4-10)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, N, r \neq m, t = 1, \dots, T$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m - C_{r,t} \leq M \cdot (1 - f_{m,r,t}) - 1 \quad (4-11)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, r = 1, \dots, N, r \neq m, t = 1, \dots, T$$

$$C_{m,t} - C_{r,t} \leq M \cdot g_{m,r,t} - 1 \quad (4-12)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, r = 1, \dots, N, r \neq m, t = 1, \dots, T$$

$$C_{r,t} - C_{m,t} \leq (M \cdot (1 - g_{m,r,t})) + 1 \quad (4-13)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, r = 1, \dots, N, r \neq m, t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{k=1}^K (\alpha_{k,t}) \geq \phi_m \cdot \mathcal{Y}_{m,t} + \sum_{r=1, r \neq m}^N (f_{m,r,t} + g_{m,r,t} - 1) \cdot \phi_r \quad (4-14)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T$$

$$\phi_m \cdot \mathcal{Y}_{m,t} + \sum_{r=1, r \neq m}^N (f_{m,r,t} + g_{m,r,t} - 1) \cdot \phi_r \quad (4-15)$$

$$\geq \sum_{k=1}^K (\alpha_{k,t}) - (1 - z_{m,t}) \cdot M$$

$$\forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T$$

$$\sum_{m=1}^N (z_{m,t}) = 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (4-16)$$

$$\alpha_{k,t} \leq E_{max}^{k,t} \quad \forall t = 1, \dots, T, \forall k = 1, \dots, K \quad (4-17)$$

$$AC_{k,t} + (1 + \beta) \cdot \sum_{l=1}^{R_k} (V_{k,l} \cdot P_{k,l}) \geq \alpha_{k,t} \quad (4-18)$$

$$\forall t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, K$$

$$(1 - \beta) \cdot \sum_{l=1}^{R_k} (V_{k,l} \cdot P_{k,l}) - BC_{k,t} \leq \alpha_{k,t} \quad (4-19)$$

$$\forall t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{l=1}^{R_k} (P_{k,l}) = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (4-20)$$

$$Emis = \sum_{t=1}^T \frac{L_t}{60} \cdot \sum_{k=1}^K Car_k \cdot \alpha_{k,t} \quad (4-21)$$

$$Emis \leq Lim. \sum_{t=1}^T d_t \quad (4-22)$$

$$I_{m,1} = x_{m,1} - x_{m+1,1} \quad \forall m = 1, \dots, N-1 \quad (4-23)$$

$$I_{N,1} = x_{N,1} - d_1 \quad (4-24)$$

$$C_{1,1} - x_{1,1} \cdot p_1 = 0 \quad (4-25)$$

$$I_{N,0} = I_{N,T} = 0 \quad (4-26)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \geq 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-27)$$

$$C_{m,t} = S_{m,t} + x_{m,t} \cdot p_m \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-28)$$

$$C_{m,t} - x_{m,t} \cdot p_m \leq L_t \cdot Y_{m,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-29)$$

$$C_{m,t} \leq L_t \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-30)$$

$$x_{m,t} \geq Y_{m,t} \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-31)$$

$$f_{m,m,t} = g_{m,m,t} = 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-32)$$

$$x_{m,t}, I_{m,t}, C_{m,t}, S_{m,t} \text{ int. } \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-33)$$

$$Y_{m,t}, v_{m,t}, f_{m,r,t}, g_{m,r,t}, z_{m,t} \in \{0,1\} \quad (4-34)$$

$$\forall m = 1, \dots, N, r = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T$$

$$x_{m,t}, I_{m,t} \geq 0 \quad \forall m = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (4-35)$$

$$\alpha_{k,t}, BC_{k,t}, AC_{k,t} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, K \quad (4-36)$$

$$\alpha_{k,t}, BC_{k,t}, AC_{k,t} \geq 0 \quad \forall t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, K \quad (4-37)$$

La première partie de la fonction objectif (4-1) calcule le coût de production, y compris le coût de la consommation d'électricité, le coût de stockage et de lancement. La deuxième partie calcule le coût total de l'électricité et les coûts de pénalité qui peuvent résulter d'une consommation d'électricité supérieure ou inférieure à la valeur contractuelle.

Chapitre 04 : Partie prédictive

Pour simplifier la description des contraintes, il est possible de diviser le reste du modèle en cinq parties :

Partie 1 : Les contraintes (4-2)-(4-13) définissent les contraintes classiques du flow shop avec les contraintes de dimensionnement des lots. Les contraintes (4-6) et (4-7) comparent la quantité à produire dans la machine m au cours de la période t avec le niveau du stock tampon de la machine $m - 1$ de la période précédente. Les contraintes (4-8) et (4-9) traduisent l'interaction verticale entre les machines. Les contraintes (4-10) à (4-13) décrivent l'existence d'un chevauchement entre les machines.

Partie 2 : Le deuxième groupe de contraintes (4-14)-(4-17) se concentre sur la demande d'énergie du système. La contrainte (4-14) calcule la demande totale d'électricité à la période t . L'existence d'un chevauchement entre les machines détermine la demande de puissance maximale dans les périodes. Les contraintes (4-15) et (4-16) fixent la demande de puissance maximale au cours de la période t . La contrainte (4-17) garantit qu'il n'y a pas de dépassement du niveau de la puissance autorisée définie par le fournisseur d'énergie.

Partie 3 : Le troisième groupe de contraintes (4-18)-(4-20) introduit dans le modèle les vecteurs de contrat V_k comprenant des options de contrat pour différentes sources d'énergie et établit une relation entre la demande d'énergie maximale au cours de la période t et la valeur du contrat $V_{k,l}$. Lorsque la demande dépasse les limites supérieures ou inférieures définies par β (10% dans notre modèle) de l'option contractuelle, la quantité excédentaire est pénalisée par le double prix de l'énergie.

Partie 4 : le quatrième groupe de contraintes (4-21) et (4-22) vise à limiter le carbone émis dans la production d'électricité d'alimentation. Comme notre système a deux objectifs (réduction des coûts et réduction des émissions de carbone), nous avons utilisé la méthode des ε -contraintes pour transformer le problème en mono-objectif, que nous expliquons dans le deuxième chapitre, en remplaçant la fonction d'émission de carbone par une contrainte où nous limitons l'émission de carbone ($Emis$).

Partie 5 : le cinquième groupe de contraintes (4-23)-(4-37) indique les conditions initiales et générales du système.

Dans l'ancien modèle mathématique (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018), on considère un système hybride d'alimentation d'énergie de plusieurs sources, mais on était obligé de choisir une option de contrat d'une puissance minimale non nulle, ce que nous avons trouvé illogique car un contractant n'est pas obligé d'avoir trois fournisseurs d'énergie à la fois.

C'est pourquoi nous avons ajouté l'option 0 Kw d'énergie pour la possibilité de ne signer aucun contrat avec un ou deux fournisseurs d'électricité. Ceci rend le problème beaucoup plus réaliste à notre avis, et donne plus de liberté de choix aux entreprises.

Les données :

L'horizon de planification est composé de plusieurs périodes successives de pointe et de creux. Dans l'exemple numérique, on considère trois machines ($N=3$) et l'horizon de planification est divisé en cinq périodes ($T=5$). Le code d'instance est décrit comme $N3_T5$. La durée des périodes de pointe et des périodes creuses est déterminée comme suit : 1080-360 minutes respectivement. Toutefois, cet état peut être modifié. Dans notre étude, comme il est plus proche du cas réel, les périodes de pointes sont associées à des périodes plus longues. Pour chaque période de l'horizon de planification, la demande externe d_t est générée de manière aléatoire afin de garantir la faisabilité de l'instance. Dans ces exemples, les frais d'abonnement des sources d'énergie $Vcost_{k,l}$ renouvelables sont supposés plus chers que les frais des sources d'énergie traditionnelles. Les prix de l'électricité pour les périodes de pointe et hors pointe sont respectivement de 0,16 \$ et 0,08 \$. Comme dans les travaux de (Mohammadi, Torabi, Fatemi Ghomi, & Karimi, 2010) et (Masmoudi, Yalaoui, Ouazene, & Chehade, 2017). D'autres paramètres nécessaires $w_{m,t} \in [50, 100]$, $\phi_m \in [5, 10]$, $p_m \in [5, 10]$ sont générés avec une distribution uniforme (Tableau 4-1 et Tableau 4-2). Différents états de puissance ou vitesses des machines peuvent être considérés, mais dans notre étude, nous ne prenons en compte que les besoins de puissance moyens des machines donc juste la vitesse moyenne.

Tableau 4-1 : Données concernant le temps de l'instance $N3_T5$

Période (t)	1	2	3	4	5
d_t (pièce)	45	52	49	50	52
L_t (min)	1080	360	1080	360	1080
Co_t (\$/KWh)	0.16	0.08	0.16	0.08	0.16
$E_{max}^{1,t}$ (KW) traditionnelle	24	24	24	24	24
$E_{max}^{2,t}$ (KW) solaire	10	10	10	10	10
$E_{max}^{3,t}$ (KW) éolienne	15	15	15	15	15
$w_{1,t}$ (\$)	81	99	82	75	91
$w_{2,t}$ (\$)	99	95	97	93	96
$w_{3,t}$ (\$)	64	63	67	71	54

Tableau 4-2 : Données concernant la machine de l'instance $N3_T5$

Machine (m)	1	2	3
ϕ_m (KW)	9	6	8
p_m (min)	6	7	5

Les options contractuelles pour l'énergie traditionnelle sont tirées de (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018), ils ont inspiré les valeurs des tarifs de l'énergie de certains fournisseurs d'énergie en France. Pour les sources d'énergie renouvelables, on suppose que les valeurs du tableau 4-3 peuvent être proposées par le fournisseur d'énergie.

Tableau 4-3 : Options de contrat

Traditionnelle	$Vcost$ (\$)	Solaire	$Vcost$ (\$)	Éolienne	$Vcost$ (\$)
----------------	--------------	---------	--------------	----------	--------------

0 KW	0	0 KW	0	0 KW	0
6 KW	50	3 KW	75	3 KW	62.5
9 KW	55	4 KW	82.5	4 KW	68.75
12 KW	80	5 KW	120	5 KW	100
15 KW	90	6 KW	135	6 KW	112.5
18 KW	100	7 KW	150	7 KW	125
24 KW	200	8 KW	300	8 KW	250
36 KW	250	9 KW	375	9 KW	312.5

Pour les autres données :

$$h=15 \$$$

$$\beta=0.1=10\%$$

$$U_k = [10, 10, 10]$$

$$Car_k = [599, 38, 25]$$

Pour les valeurs de Car_k nous considérons que notre source d'énergie traditionnelle est le gaz, puisqu'en Algérie il représentait plus de 43% de l'énergie totale produite en 2018 sans considérer la méthode du cycle combiné (le chiffre passe à 82% si on le considère). (Arab Union of Electricity, s.d.)

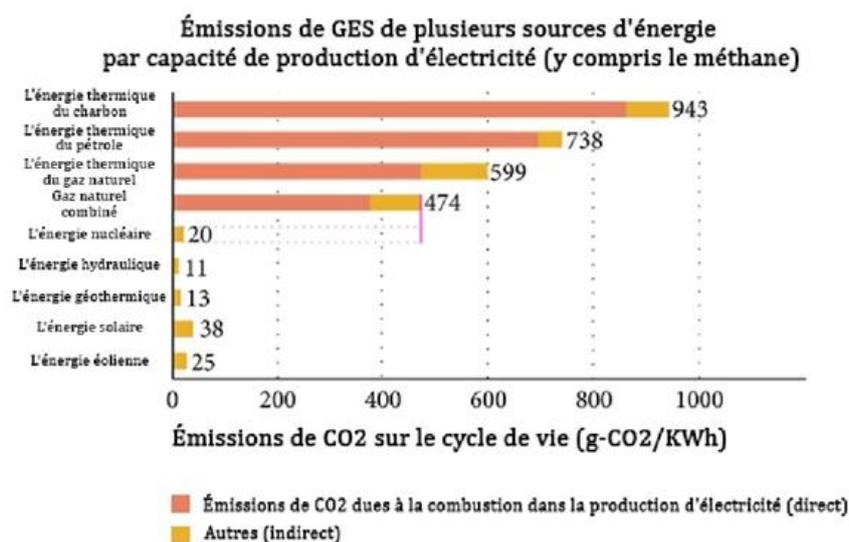


Figure 4-2 : le taux d'émission de chaque source d'électricité en g-CO2/KWh (pris de (Abdallah & El-Shennawy, 2013)).

Pour le paramètre Lim , nous ne pouvons pas fixer une valeur exacte car il dépend de nombreux facteurs et il n'existe pas de méthode commune définie pour le calculer. Sa valeur sera donc modifiée au cours de la simulation pour observer son effet sur le modèle.

Les Figure 4-3 et Figure 4-4 montrent deux configurations de production différentes proposées par (Rodoplu, Arbaoui, & Yalaoui, 2018) pour représenter aux lecteurs à quoi ressemblerait une solution réalisable, qui comprennent les quantités de

production de chaque machine (dans les carrés) et la puissance maximale requise de chaque période (en rouge au-dessus de chaque période). La Figure 4-3 montre la configuration de production qui satisfait la demande externe sans tenir compte de l'alimentation électrique, tandis que la Figure 4-4 tient compte de l'alimentation électrique.

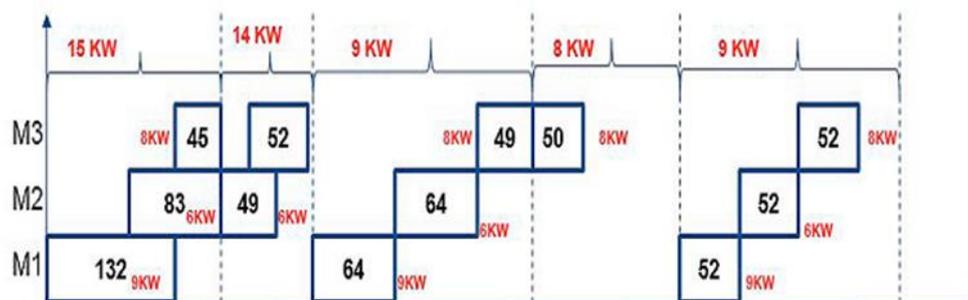


Figure 4-3 : Le plan de production sans considération des frais d'énergie.

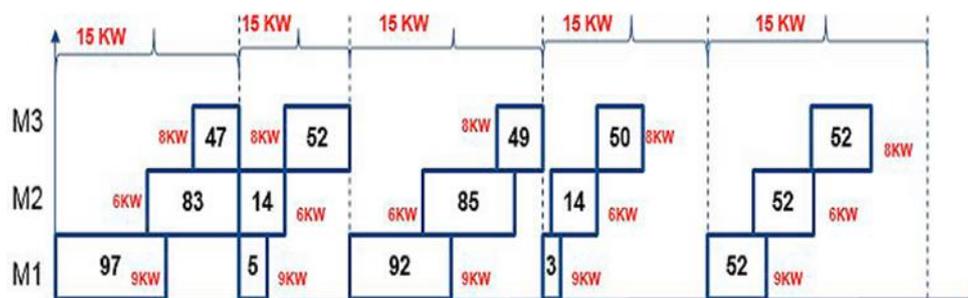


Figure 4-4 : Le plan de production avec considération des frais d'énergie.

4.3 Résolution de problème

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé le solveur *CPLEX* qui donne une solution exacte mais une fois que la taille de l'instance augmente, le temps de calcul devient important au point que la RAM du PC ne peut plus le supporter, ce qui provoque l'arrêt du système. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé la méta-heuristique de recuit simulé programmé en langage java.

4.3.1 Solveur (CPLEX)

L'une des étapes les plus importantes du processus d'optimisation consiste à choisir un logiciel adapté au type de problème d'optimisation que nous sommes en train de résoudre.

Dans notre cas, nous avons choisi le solveur *CPLEX*. Les solveurs visent à trouver une solution à une instance spécifique d'un modèle d'optimisation. Le solveur prend une instance d'un modèle en entrée, applique une ou plusieurs méthodes de solution et retourne le meilleur résultat possible. (neos Guide, s.d.)

Il faut également mentionner que le modèle est résolu par *CPLEX 12.6* sur un Intel Core i5 M 430 avec 2,27 GHz et 3 Go de RAM.

Un programme de solveur CPLEX est composé de deux fichiers, un pour les données (DATA) et un autre pour le modèle principale, le fichier de DATA est dans Appendice A.

4.3.2 Résultat

Tableau 4-4 : Les résultats de simulation sur CPLEX avec changement de paramètre Lim.

Lim (g-CO2/produit)	Fonction Objective (\$)	Temps de calcul (sec)	$V_{k,l}$ Trad. choisi (KW)	$V_{k,l}$ Sol.choisi (KW)	$V_{k,l}$ Eol.choisi (KW)	Emission de GES (Kg-CO2)
2000	7744,32	2,79	9	0	0	478
1500	7773,51	2,39	9	0	4	372
1000	7804,07	2,15	6	0	4	248
500	7862,73	1,66	0	4	4	25,16
300	7862,73	2,09	0	4	4	23,99
120	7862,57	2,13	0	4	4	23,99
90	7957,62	1,24	0	3	7	22,32
80	8394,40	2,06	0	3	7	19,84
79	PdS	PdS	PdS	PdS	PdS	PdS

PdS : Pas de solution.

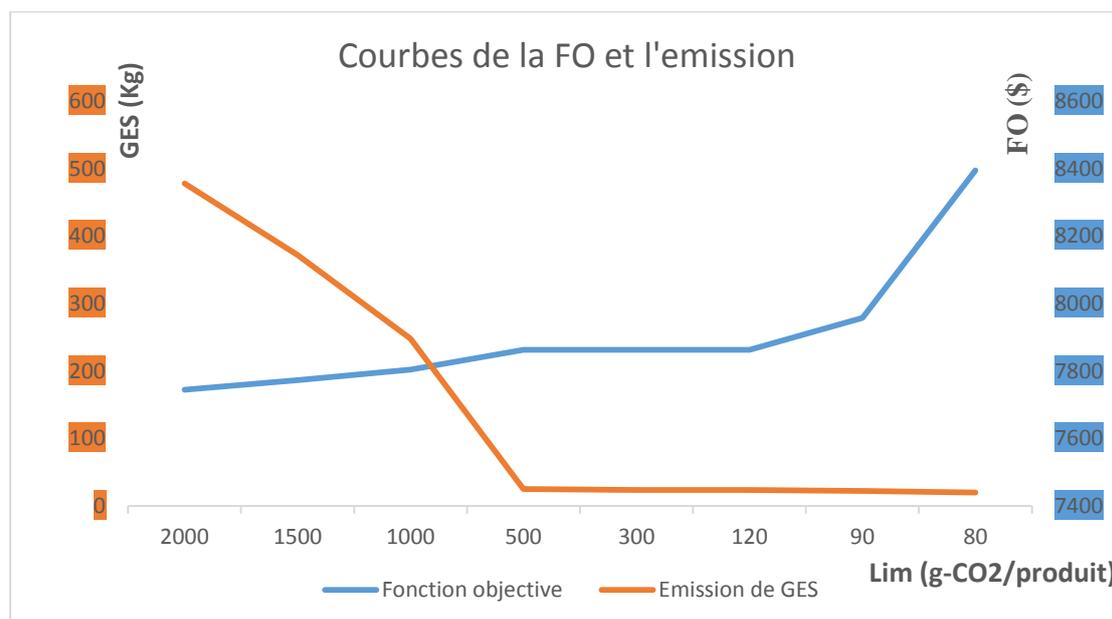


Figure 4-5 : courbe de changement de la fonction objectif et l'émission de GES dans différentes valeurs de Lim.

Comme vous pouvez le remarquer dans le tableau 4-4 et la figure 4-5, les émissions de GES diminuent plus rapidement que la fonction objectif des coûts.

4.3.3 Méta-heuristique (Recuit Simulé)

Dans [1], les auteurs voient le problème de l'utilisation d'un solveur dans le sens où, une fois que la taille de l'instance atteint un certain niveau, le solveur devient incapable de résoudre le problème ; c'est pourquoi nous avons proposé une solution

alternative qui est l'utilisation d'une méta-heuristique, nous avons sélectionné la méta-heuristique de recuit simulé car elle est largement utilisée dans les problèmes de dimensionnement de lots comme (Roshani, Giglio, & Paolucci, 2016) et s'est avérée très performante dans ce type de problèmes (Tang, 2004).

Le programme de la méta-heuristique est présenté dans les appendices D et E.

4.3.4 Résultat

Tableau 4-5 : Les résultats de simulation de la méta-heuristique RS sur Java avec changement de paramètre Lim.

Lim (g-CO2/produit)	Fonction Objective (\$)	Temps de calcul (sec)	$V_{k,l}$ Trad. choisi (KW)	$V_{k,l}$ Sol.choisi (KW)	$V_{k,l}$ Eol.choisi (KW)	Emission de GES (g-CO2)
2000	7747,36	1,32	9	0	0	478
1500	7773,51	1,4	9	0	4	371,316
1000	7834,62	1,59	6	0	6	246,432
500	7878,36	1,4	0	0	7	19,95
400	7875,32	1,48	0	0	7	19,95
300	7926,62	1,52	0	4	7	23,555
280	7937,36	1,52	0	3	7	22,479
255	7977,34	1,81	0	4	7	23,829
254	PdS	PdS	PdS	PdS	PdS	PdS

4.3.5 Comparaison entre CPLEX et RS

Ainsi, pour la génération des données des nouvelles instances, nous avons vu que le changement de la demande nous aidera à garder les autres valeurs identiques et à tester les capacités des deux systèmes en terme de capacité de résolution. Les instances générées vont être de même niveau de difficulté que l'instance N3-T5. Nous avons calculé la valeur qui représente la pression exercée par le modèle ou sa difficulté comme suit :

TD : Taux de difficulté.

Si TD=1 donc il n'y a pas de pression sur le modèle, et on peut produire la quantité demandée en lançant les machines l'une après l'autre.

Plus TD augmente plus on met de pression sur le modèle jusqu'au point où la recherche d'une solution devient impossible.

$$\sum_{t=1}^T d_t \cdot \sum_{m=1}^N p_m = \sum_{t=1}^T L_t \cdot TD \quad (4-38)$$

Dans l'instance N3-T5, TD=1.127

En calculant la demande de cette manière, nous serons toujours sûrs qu'il y a une solution réalisable pour le problème.

N3-T5 : $\sum d=248$

N5-T3 : $\sum d=88$

N5-T5 : $\sum d=139$

N5-T7 : $\sum d=190$

N7-T7 : $\sum d=132$

N9-T7 : $\sum d=117$

N5-T9 : $\sum d=240$

Tableau 4-6 : Les résultats de performance de CPLEX pour différentes tailles d'instances.

Taille de problème	CPLEX		Recuit Simulé			
	La solution obtenue (\$)	Temps de Calcule	La meilleure solution obtenue (\$)	La moyenne des solutions (\$)	Temps de calcule moyen	Pourcentage de différence
N3T5	7862,57	2,47 s	7875,32 (100)	7939,56	1,5 s	0,97%
N5T3	4877,38	1,63 s	4912,3(100)	4920,92	5,37 s	0,89%
N5T5	7662,5	1min 17 s	7710 ,82 (100)	7867,25	5,06 s	2,67%
N5T7	10411,79	9 min 27 s	10509,25 (100)	10720,06	23 s	2,96%
N7T7	PdS	>3600 s	10686,92 (100)	10844,03	11,66 s	1,47%
N9T7	PdS	>3600 s	11160,3 (100)	11372,39	52,15 s	1,9%
N5T9	PdS	>3600 s	13220 ,5 (100)	13508,29	9,49 s	2,17%

Remarque : dans toutes les simulations on considère $Lim=400(g-CO_2/product)$, pour les simulations de Métaheuristique RS on lance 100 fois pour s'assurer de la fiabilité des résultats obtenues.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la première partie de notre travail, qui consiste à résoudre un problème de dimensionnement des lots avec plusieurs sources d'énergie et des options de contrats à choisir. Nous avons résolu le problème de deux manières différentes. La première est un programme solveur (CPLEX) qui donne la solution exacte, mais le problème est lié au temps de calcul qui dépasse une heure pour certaines grandes instances. Nous avons ensuite utilisé la méta-heuristique de recuit simulé pour le résoudre, ce qui a donné des solutions relativement bonnes (moins de 3 % de différence par rapport à la meilleure solution) dans un temps de calcul beaucoup plus acceptable (moins d'une minute).

Dans le dernier chapitre, nous étendons ce problème pour résoudre le dilemme de la fluctuation de l'énergie en temps réel.

Chapitre 05 : Partie réactive

5.1 Introduction

La consommation d'énergie est responsable de 80 % des émissions de CO₂, qui sont la principale source de réchauffement de la planète et représentent les effets les plus dangereux sur le changement climatique. Il est évident que tout effort visant à réduire efficacement les émissions de CO₂ et à atténuer le changement climatique ne peut réussir sans inclure le secteur de l'énergie.

Aujourd'hui, l'impératif de réduire les émissions de CO₂ dans le monde entier est plus fort que jamais et l'investissement dans les énergies renouvelables est l'une des options les plus viables pour réduire les émissions de carbone. Comme l'indique la figure 1 du chapitre 4, l'Algérie n'a encore pris aucune initiative visant à réduire ou à tarifier les émissions de carbone.

Cette hésitation envers une initiative de limitation des GES est relativement justifiable, puisque l'économie du pays est essentiellement basée sur l'exploitation du pétrole et du gaz, et que ses prix sont également relativement bas dans le pays.

Cependant, ce qui n'est pas justifiable, c'est la forte dépendance de l'économie du pays aux revenus du pétrole et du gaz. Les crises de 1973, 1983, 1998 et 2016 sont des exemples évidents du danger que représente cette dépendance vis-à-vis du pays. Par conséquent, l'Algérie devrait ajuster sa vision de la limitation des GES pour la considérer plus comme une chance d'investir dans les sources renouvelables, en libérant au moins le secteur de la génération d'énergie de cette dépendance.

Une autre raison d'opter pour les énergies renouvelables est que les réserves de pétrole et de gaz de l'Algérie sont en baisse depuis 2005, par manque d'investissements dans la modernisation des champs existants et l'exploitation de nouvelles réserves, tandis que l'augmentation de la consommation énergétique nationale s'est faite au détriment des exportations de pétrole. L'augmentation constante de la demande domestique d'énergie ces dernières années est due à la fois à la démographie et à une activité économique largement soutenue. Un défi pour l'Algérie est donc de réduire la dépendance aux combustibles fossiles en développant les énergies renouvelables avant la date fatidique de l'épuisement des énergies fossiles. (Bélaïd & Youssef, 2017)

Selon (WBG, 2015), les émissions totales de dioxyde de carbone en Algérie ont atteint 78 925 000 tonnes métriques en 1990 et augmentent pour atteindre 121 755 000 tonnes métriques en 2011. Cela peut paraître négligeable par rapport aux 5 270 047 milliers de tonnes des États-Unis ou aux 9 733 538 milliers de la Chine (<https://www.worldbank.org/>, s.d.), mais cette augmentation pourrait avoir des conséquences catastrophiques non seulement en Algérie mais aussi dans le monde entier.

La plupart des scientifiques s'accordent aujourd'hui à dire que la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA) est parfaitement placée pour jouer un rôle de premier plan dans les futures industries lucratives de l'énergie solaire et éolienne, en particulier l'Algérie qui possède l'un des plus grands réservoirs solaires au monde. (Stambouli, 2011)

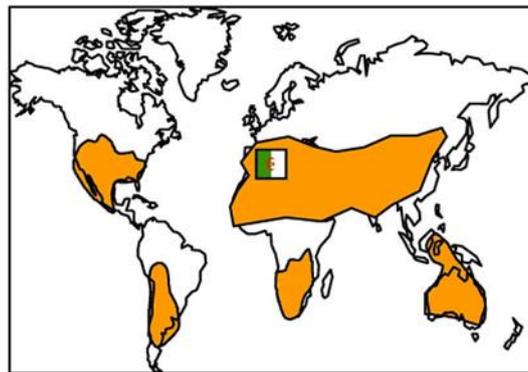


Figure 5-1 : Sites solaires favorables dans le monde et la carte de l'Algérie située dans la zone solaire du milieu du monde. (Stambouli, 2011)

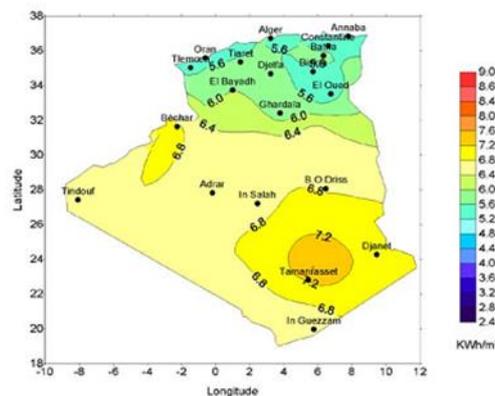


Figure 5-2 : L'exposition quotidienne globale reçue (en kWh/m²/jour) en Algérie. (Stambouli, 2011)

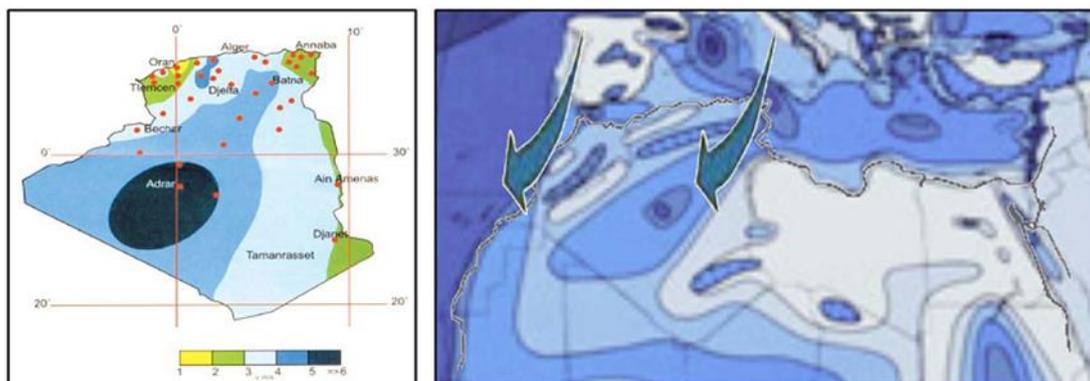


Figure 5-3 : Cartographie des vents de l'Algérie. (Stambouli, 2011)

Comme le montrent Figure 5-1, Figure 5-2 et Figure 5-3, l'Algérie est un endroit parfait pour l'installation de vastes centrales de génération d'énergie renouvelable. Cet énorme potentiel n'est malheureusement pas ou peu utilisé, puisque la production d'électricité de l'Algérie à partir de l'énergie solaire en 2018 n'était que de 603 GWh, ce qui représente 0,84% de l'énergie totale générée la même année. Pendant ce temps, l'énergie éolienne atteint à peine 10 GWh. (Arab Union of Electricity, s.d.)

Toutes ces raisons rendent le sujet abordé encore plus intéressant et adéquat au contexte algérien.

Dans ce chapitre, nous présentons la deuxième partie de notre travail. Nous abordons d'abord la production d'électricité en général, puis nous décrivons les deux principaux groupes de sources d'électricité : les sources traditionnelles et les sources renouvelables. Dans la deuxième section, nous décrivons le problème traité dans le travail et proposons l'architecture multi-agents comme solution ; nous terminons par une conclusion et des perspectives.

5.2 Génération d'électricité

L'un des principes généralement méconnus de l'électricité est que l'électricité ne peut pas être stockée à une quelconque échelle, mais qu'elle peut être convertie en d'autres formes d'énergie, qui peuvent être stockées et reconverties ultérieurement en électricité à la demande. Les systèmes de stockage de l'électricité comprennent les batteries, les volants d'inertie, l'air comprimé et le stockage par pompage. Tous les systèmes sont limités dans la quantité totale d'énergie qu'ils peuvent stocker. (World Nuclear Association, s.d.)

Ces méthodes de stockage de l'électricité se sont avérées relativement efficaces mais malheureusement pas suffisantes pour satisfaire les besoins humains, je le reformule, "énormément" loin des besoins humains. Par exemple, la réserve électrique de *Hornsedale* de *Telsa* en Australie, qui est considérée comme l'une des plus grandes installations de stockage d'électricité au monde avec un coût de construction de 50 millions de dollars (selon ("Tesla completes its giant Australian Powerpack battery on time". Engadget., 7 August 2018.)), ne peut stocker que 129 MWh ("Initial operation of the Hornsdale Power Reserve Battery Energy Storage System" (PDF). Australian Energy Market Operator, 5 April 2018.), l'Algérie seule produisant 71 TWh par an.

La deuxième chose qui rend le traitement de l'électricité encore plus risqué est l'incertitude de son taux de consommation, surtout en raison de sa nature fluctuante. Par exemple en plein hiver, une baisse de 1°C entraîne une demande supplémentaire d'environ 1400 MW, soit plus que l'équivalent d'un groupe nucléaire de type Paluel en France. (La crise de l'électricité en Californie" exposé de M. André MERLIN-Directeur de RTE.)

Ainsi, dans le secteur de l'électricité, toute erreur peut avoir des conséquences catastrophiques, et les dégâts causés à l'économie américaine par la crise californienne de 2000-2001 en sont une claire illustration. (La crise de l'électricité en Californie" exposé de M. André MERLIN-Directeur de RTE.)

5.2.1 Énergie traditionnelle

Par énergie traditionnelle, nous entendons celles qui utilisent les combustibles fossiles pour produire de l'électricité. Les trois principaux combustibles fossiles sont : le charbon, le pétrole et le gaz.

Les centrales électriques à combustibles fossiles brûlent du charbon ou du pétrole pour créer de la chaleur, qui à son tour sert à produire de la vapeur pour actionner des turbines, qui produisent de l'électricité. Dans les usines à gaz, les gaz chauds entraînent une turbine pour produire de l'électricité, tandis qu'une centrale à turbine à gaz à cycle combiné (TGCC) utilise également un générateur de vapeur pour augmenter la quantité d'électricité produite. (World Nuclear Association, s.d.)

Ces centrales produisent de l'électricité de manière fiable sur de longues périodes et sont généralement peu coûteuses à construire. Cependant, en brûlant des combustibles à base de carbone, on produit de grandes quantités de dioxyde de carbone, ce qui entraîne un changement climatique. Ces centrales produisent également d'autres polluants qui provoquent des pluies acides.

Les turbines à gaz sont théoriquement simples et se composent de trois parties principales, comme le montre la Figure 5-4:

- Compresseur : Il aspire l'air de l'extérieur de la turbine et augmente sa pression.
- Chambre de combustion : Brûle le combustible et produit un gaz à haute pression et à grande vitesse.
- Turbine : Extrait l'énergie du gaz provenant de la chambre de combustion et la convertit en énergie mécanique.

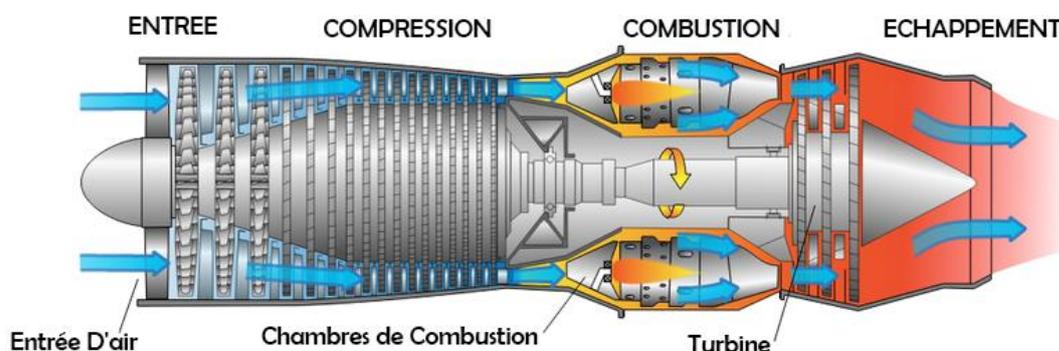


Figure 5-4 : Schéma d'un moteur à turbine à gaz. (Energy Education, s.d.)

Le travail de (wartsila, s.d.) Propose une relation empirique entre la capacité de la turbine à gaz à produire de l'électricité lorsqu'elle est exposée aux conditions ambiantes du site, comme la température ambiante, qui diffèrent des conditions ISO. Les auteurs ont conclu que pour chaque K d'augmentation de la température ambiante au-delà des conditions ISO⁴, la turbine à gaz perd 0,1% en termes de rendement thermique et 1,47 MW de sa puissance brute (utile).

Pour plus de détails, prenons la turbine à gaz 7F.05 de *General Electrics* comme exemple. Les turbines à gaz sont extrêmement réactives et la 7F.05 est loin d'être une exception, avec une capacité de démarrage de 243 MW en 11 minutes. (ge.com, 2015)

Tableau 5-1 : Résultats des essais sur le rendement de la turbine à gaz GE 7F.05 à différentes températures ambiantes.

	Cycle combiné (MW)	Cycle simple (MW)
10°C (50°F)	312	214

⁴ Les conditions de référence standard (prescrites par l'Organisation internationale de normalisation ou ISO) sont les conditions de température et de pression dans lesquelles les fabricants évaluent la capacité et le rendement de production. Ces conditions de référence ISO diffèrent selon la technologie. Les conditions de référence standard pour les turbines à gaz (ISO 3977) sont de 15°C (59°F) et 101,3 kPa (14,7 psia) tandis que pour les moteurs à combustion (ISO 3046) les conditions de référence sont de 25°C (77°F) et 99 kPa (14,4 psia).

15°C (59°F)	306	209
20°C (68°F)	300	205
25°C (77°F)	292	200
30°C (86°F)	282	194
35°C (95°F)	271	188
40°C (104°F)	260	182

Nous avons choisi Oran comme exemple de ville algérienne pour y voir les performances d'une turbine à gaz GE 7F.05.

Tableau 5-2 : Température moyenne à Oran par mois et performance de la turbine.

Mois	Temperature Moy. (°C)	Performance de Turbine (MW)
January	12,2	309
February	12,9	309
March	14,4	307
April	16,1	305
May	18,6	302
June	21,6	297
July	24,1	293
August	25,2	292
September	22,8	296
October	19,8	300
November	15,9	305
December	13,7	308

Le problème est que le climat ne change pas seulement de mois en mois mais d'heure en heure et parfois cette différence atteint 10°C dans la même journée ce qui fait que la performance d'une turbine à gaz peut passer de 300 MW à 282 dans la même journée.

5.2.2 Énergie Renouvelable

Les sources d'énergie renouvelables, telles que le vent, le soleil et les petites centrales hydroélectriques, produisent de l'électricité en émettant peu de gaz à effet de serre tout au long de leur cycle de vie. En 2017, l'éolien et le solaire ont produit respectivement 4,4 % et 1,3 % de l'électricité mondiale. Ils ne produisent pas d'électricité de manière prévisible ou constante en raison de leur dépendance inhérente aux conditions météorologiques. La production d'électricité par les éoliennes varie en fonction de la vitesse du vent, et si le vent est trop faible ou trop fort, aucune électricité n'est produite. La performance des panneaux solaires dépend de la force du rayonnement solaire, qui dépend d'un certain nombre de facteurs différents, tels que l'heure de la journée et la quantité de nuages (ainsi que la quantité de poussière sur les panneaux). (World Nuclear Association, s.d.)

Un autre problème est qu'il n'y a peut-être pas assez d'espace ou de volonté du public pour accueillir le grand nombre de turbines ou de panneaux nécessaires pour produire suffisamment d'électricité. Cela est dû au fait que l'énergie du vent ou du soleil est

diffusée, ce qui signifie qu'il faut de très grandes surfaces de terrain pour produire une quantité importante d'électricité. (World Nuclear Association, s.d.)

Énergie Solaire :

Pour simplifier les choses, voici un petit résumé des étapes qui permettent de produire de l'électricité avec un panneau solaire photovoltaïque : premièrement les photons viennent frapper les cellules photovoltaïques, puis les électrons se déplacent alors produisant un courant électrique continu, finalement ce courant électrique continu est transformé en courant alternatif grâce aux onduleurs. (hello watt, s.d.)

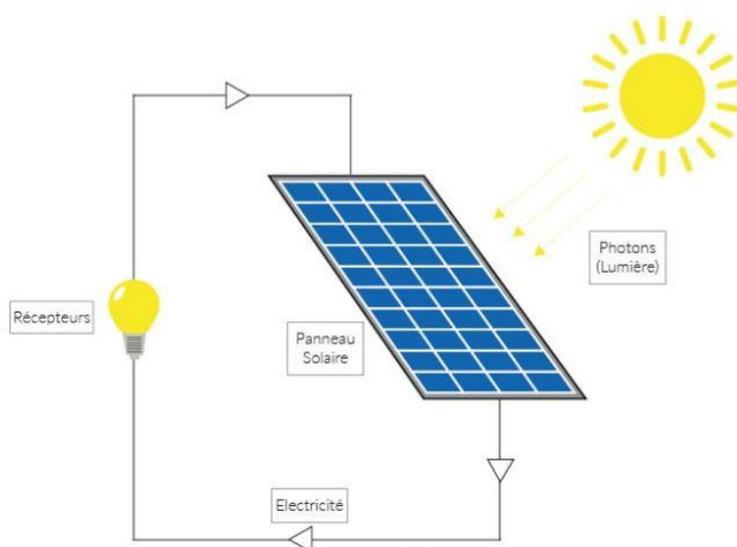


Figure 5-5 : Le principe de fonctionnement d'un panneau solaire. (hello watt, s.d.)

Énergie Éolienne :

Le principe de fonctionnement d'une éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales, qui à leur tour tournent le générateur de l'éolienne. Puis le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne. (ECO Infos, s.d.)

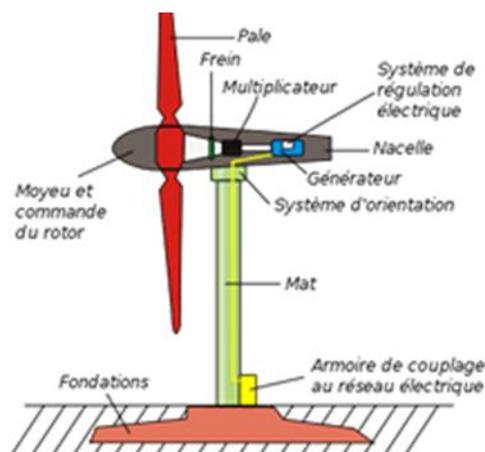


Figure 5-6 : Le principe de fonctionnement d'une éolienne. (ECO Infos, s.d.)

Le problème avec ces deux sources est qu'elles dépendent totalement des conditions climatiques, ce qui est encore difficile à prévoir, même avec les technologies dont nous disposons aujourd'hui.

Et comme l'électricité ne peut pas être facilement stockée, les énergies renouvelables doivent être complétées par d'autres formes de génération d'électricité. Les plus grandes batteries ne peuvent pas fonctionner pendant des jours, sans parler des semaines qu'il faudrait pour sauvegarder les énergies renouvelables afin d'assurer la fourniture d'électricité 24h/24. Afin d'assurer un approvisionnement régulier en électricité, les centrales au gaz (ou une source d'énergie traditionnelle) fournissent de plus en plus de services de secours à l'électricité produite à partir de sources renouvelables. Ces systèmes hybrides prennent de plus en plus de poids, parfois avec l'énergie nucléaire comme source de secours.

5.3 Description de problème

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons voulu résoudre ce problème de fluctuation de l'énergie expliqué ci-dessus, nous avons donc proposé une architecture multi-agents pour que le système réagisse au changement d'énergie en temps réel.

Par conséquent, on peut décrire le système que nous concevons dans cette partie comme une extension du modèle précédemment présenté dans le chapitre 4.

Nous avons utilisé un système dans lequel les deux composantes de la chaîne logistique sont représentées par un agent : usine et fournisseurs, nous avons également ajouté un agent intermédiaire pour la coordination entre les différents agents.

Il existe de nombreuses plateformes qui fournissent cette programmation de systèmes multi-agents tels que : AnyLogic, CORMAS, DoMIS, JACK, JADE, ...etc. (Cours.Youssefi)

Nous avons utilisé le logiciel JADE (Java Agent Development Environnement), en français environnement de développement d'agents programmés en java, et le programme est exécuté en eclipse.

JADE : est un Framework de développement de systèmes multi-agents, open-source et basé sur le langage Java. Il offre en particulier un support avancé de la norme

FIPA-ACL, ainsi que des outils de validation syntaxique des messages entre agents basé sur les ontologies. (Cours.Youssefi)

Les systèmes multi-agents sont déjà expliqués dans la section : L'architecture de communication. En général, dans un système multi-agent, chaque agent a un rôle, c'est-à-dire des tâches qu'il doit remplir une fois ou de manière répétée.

Avant de créer n'importe quel système multi-agents sur JADE, nous devons d'abord en créer le conteneur principal « *Main Container* ».

Il possède trois agents principaux (nécessaire aux normes FIPA). (Cours.Youssefi)

- DF« *Directory Facilitator* » fournit un service de « pages jaunes» à la plate-forme ;
- ACC «*Agent Communication Channel* » gère la communication entre les agents ;
- AMS« *Agent Management System* » supervise l'enregistrement des agents, leur authentification, leur accès et l'utilisation du système.

Ces trois modules sont activés à chaque démarrage de la plate-forme.

Chaque instance du JADE est appelée conteneur «*Container*», et peut contenir plusieurs agents, un ensemble de conteneurs constituent une plateforme, et chaque agent doit être déployé dans un conteneur qui le contient pendant sa période d'activité.

Notre système est composé de trois conteneurs : le conteneur principal, le conteneur d'usine, le conteneur intermédiaire et le conteneur de sources d'énergie. Les agents contenus dans chaque conteneur avec le rôle de chacun sont décrit dans Tableau 5-3.

Tableau 5-3 : Le rôle de chaque agent

Le Conteneur	L'Agent	Le rôle
Conteneur Usine	Agent Usine	Il contient le programme de la méta-heuristique dont il a été précédemment discuté au chapitre 4 avec les données du problème à résoudre. Une fois que les lots à produire sur chaque machine sont déterminés, l'agent envoie à l'agent intermédiaire un message indiquant la demande de puissance nécessaire de chaque source.
Conteneur des Sources d'énergie	Agent Traditionnel	C'est l'agent de la source d'énergie traditionnelle, il génère la fluctuation d'énergie pour chaque source et il contient un minuteur pour le lancement et le suivi de la simulation. Lorsqu'il est lancé,

		<p>il envoie un message à l'agent intermédiaire contenant trois éléments (temps min, période et niveau d'énergie) et génère en même temps la première fluctuation d'énergie (moment de la fluctuation min et quantité d'énergie réduite). Une fois que le minuteur atteint le moment de la fluctuation, il envoie un message à l'agent intermédiaire indiquant la présence d'une fluctuation. Et génère une autre fluctuation. En dehors de cela, l'agent traditionnel fait une chose différente des autres agents, il envoie un message à l'agent intermédiaire lorsque la période change.</p>
	Agent Solaire	<p>C'est l'agent de la source solaire. Lorsqu'il est lancé, il envoie un message indiquant le niveau d'énergie, génère la première fluctuation d'énergie et lance le minuteur. Lorsque le minuteur atteint le temps de fluctuation, il envoie un message à l'agent intermédiaire indiquant la présence d'une fluctuation d'énergie et génère un nouveau temps de fluctuation et un changement d'énergie.</p>
	Agent Éolien	<p>C'est l'agent de la source éolienne. Lorsqu'il est lancé, il envoie un message indiquant le niveau d'énergie, génère la première fluctuation d'énergie et lance la minuterie. Lorsque la minuterie atteint le temps de fluctuation, elle envoie un message à l'agent intermédiaire indiquant la présence d'une fluctuation d'énergie et génère un nouveau temps de fluctuation et un changement d'énergie.</p>
Conteneur	Agent Intermédiaire	Il coordonne entre les agents.

Intermédiaire		Il reçoit le message de l'agent de l'usine et prépare la demande d'énergie de chaque source. Lorsqu'elle reçoit un message d'une source d'énergie indiquant une fluctuation, il vérifie si l'alimentation est inférieure à la demande. Si c'est le cas, il essaie alors de réajuster les autres alimentations énergétiques des autres sources d'énergie pour satisfaire la demande. Si une solution n'est pas possible, il envoie un message à l'agent traditionnel pour qu'il arrête la simulation car il ne peut pas continuer à produire.
---------------	--	--

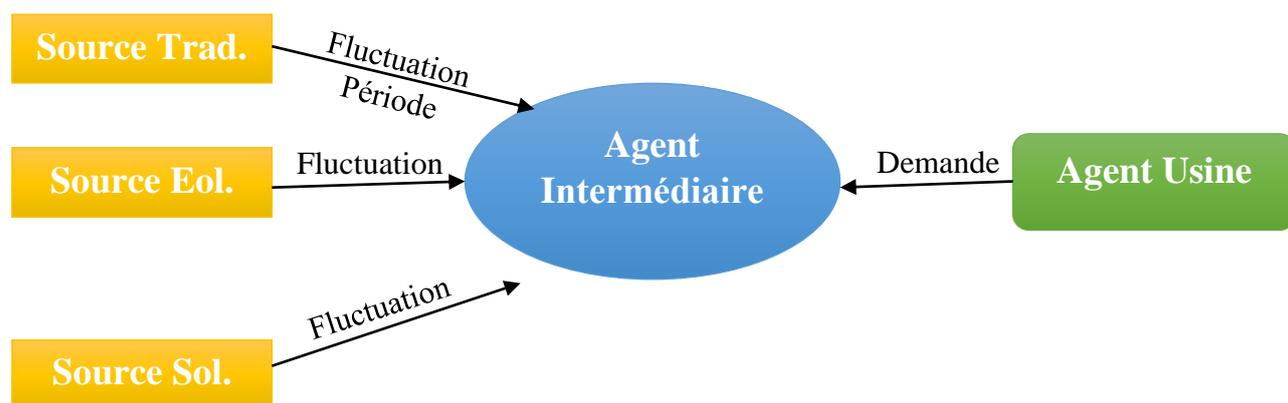


Figure 5-7 : Représentation d'interaction entre les agents

5.4 Programme et interfaces

Pour mieux expliquer l'algorithme de réajustement de l'agent intermédiaire, le programme de l'agent intermédiaire est présenté dans l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ainsi, le programme de l'agent traditionnel est présenté dans l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Notre système est composé de quatre interfaces : l'interface agent traditionnel, l'interface agent solaire, l'interface agent éolien et l'interface agent intermédiaire. Figure 5-8, Figure 5-9, Figure 5-10 et Figure 5-11 représentent les différents éléments d'interface au cours de la simulation.

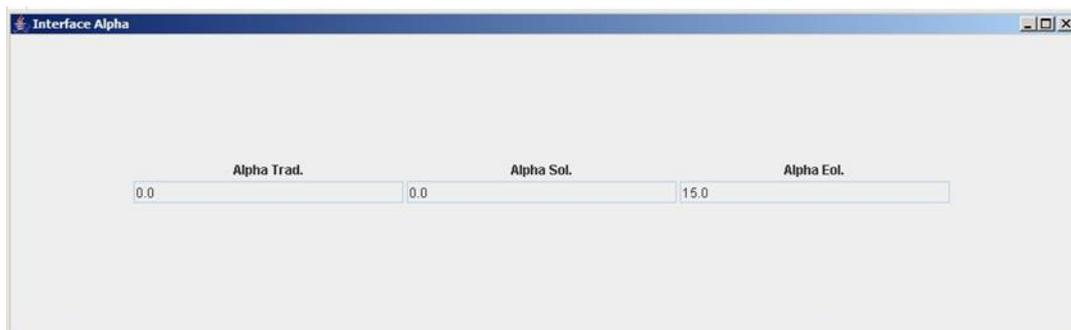


Figure 5-8 : Interface de l'agent intermédiaire



Figure 5-9 : Interface de l'agent de l'énergie traditionnelle



Figure 5-10 : Interface de l'agent de l'énergie solaire



Figure 5-11 : Interface de l'agent de l'énergie éolienne

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la deuxième partie de notre travail. Nous avons commencé par une brève introduction sur l'Algérie et le domaine de l'électricité dans laquelle nous avons discuté des méthodes de production d'électricité existantes en Algérie et des sources d'énergie potentielles futures qui peuvent être exploitées ; nous avons également mentionné l'impact environnemental des sources d'énergie traditionnelles et le danger du changement climatique. Dans la deuxième section, nous avons présenté la production d'électricité en général, nous avons également clarifié les deux termes "sources d'énergie traditionnelles" et "énergie renouvelable". Ensuite, nous sommes passés à notre sujet principal qui est le problème traité dans le travail, nous avons décrit le problème et la méthodologie de résolution, en présentant le

Chapitre 05 : Partie réactive

système multi-agents en général et en spécifiant l'architecture utilisée avec le rôle de chaque agent. À la fin, nous avons présenté certains des programmes utilisés et les interfaces du système.

6. Conclusion Générale et perspective

Les résultats de travail réalisés dans le cadre de cette thèse constituent des contributions aux problèmes de dimensionnement des lots (CILSP), à l'industrie Green et à l'optimisation des problèmes industriels dans un contexte industrie 4.0.

Contribution aux problèmes de dimensionnement des lots (CILSP) :

D'après la littérature, nous avons constaté que l'utilisation d'une approche de solution métaheuristique pour résoudre un CSILSP était limitée, nous avons donc travaillé à la résolution de notre modèle mathématique en utilisant un algorithme de recuit simulé.

Contribution à l'industrie Green :

Nous avons proposé un système multi-agents pour contrôler la production dans une usine avec la limitation des émissions de GES provenant de la consommation d'électricité fournie par différentes sources d'énergie.

Contribution à l'optimisation des problèmes industriels dans un contexte industrie 4.0 :

Notre système reste inapplicable pour un véritable cas d'utilisation industrielle, s'il n'y avait pas l'industrie 4.0. Son mouvement, ses technologies et ses approches permettent et poussent même à utiliser un tel système de gestion de production.

Perspective :

Comme perspective, nous envisageons d'étendre la partie réactive du programme afin de pouvoir modifier la taille des lots si la quantité d'énergie fournie est inférieure à celle de la demande. Nous voyons également que l'ajout des vitesses des machines (haute, moyenne et basse) rendrait le problème encore plus intéressant, et ajoute une plus grande marge de liberté au système pour s'adapter à une alimentation énergétique élevée ou faible. L'extension peut aller encore plus loin en considérant le temps et le coût du transport qui transforme notre problème en un PRP comme dans les travaux (Zeddami, Belkaid, & Bennekrouf, An Efficient Approach for Solving Integrated Production and Distribution Planning Problems Cost vs Energy, 2020) (ZEDDAMI, 2019), ou même la maintenance, comme dans (BOUFELLOUH & BELKAID, 2020).

Références

Références

- nPerf*. (n.d.). Retrieved from <https://www.nperf.com/en/map/5g>
- "Initial operation of the Hornsdale Power Reserve Battery Energy Storage System" (PDF). Australian Energy Market Operator. (5 April 2018.).
- "Tesla completes its giant Australian Powerpack battery on time". Engadget. (7 August 2018.).
- Abdallah, L., & El-Shennawy, T. (2013). Reducing Carbon Dioxide Emissions from Electricity Sector Using Smart Electric Grid Applications. *Journal of Engineering*. 2013. 10.1155/2013/845051.
- Ahmad, H. F. (2002). Multi-agent systems: overview of a new paradigm for distributed systems,. *7th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering*,(doi: 10.1109/HASE.2002.1173110.), Tokyo, Japan, 2002, pp. 101-107, d.
- Arab Union of Electricity*. (n.d.). Retrieved from <https://auptde.org/>
- Arab Union of Electricity*. (n.d.). Retrieved from <https://auptde.org/>
- Badic, B., Drewes, C., Karls, I., & Mueck, M. (2016). Rolling Out 5G: Use Cases, Applications, and Technology Solutions.
- Barany, I., Roy, T. V., & Strong, W. (1984). Formulations for multi-item capacitated lot sizing, *Management Science* 30 1255–1261.
- Bélaïd, F., & Youssef, M. .. (2017). "Environmental degradation, renewable and non-renewable electricity consumption, and economic growth: Assessing the evidence from Algeria," *Energy Policy*, Elsevier, vol. 102(C), pages 277-287.
- Belkaid, F. (2014). Investigation sur l'ordonnancement des systèmes à machines parallèles. *Doctoral dissertation*.
- Belkaid, F., Yalaoui, F., & Sari, Z. (2016). Investigations on Performance Evaluation of Scheduling Heuristics and Metaheuristics in a Parallel Machine Environment. *Springer, Cham.*, 191-222.
- BOUFELLOUH, R., & BELKAID, F. (2020). Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling under a global resource constraint: Application to the permutation flow shop problem. *Computers & Operations Research*, 104943.
- Brahimi, N., Dauzère-Pérès, S., Najid, N., & Nordli, A. (2003). Etat de l'art sur les problèmes de dimensionnement des lots avec contraintes de capacité.
- Brahimi, N., Dauzère-Pérès, S., Najid, N., & Nordli, A. (2006). Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*. 168. 1-16. 10.1016/j.ejor.2004.01.054.
- Chinneck, J. W. (n.d.). Practical Optimization: A Gentle Introduction. Retrieved from <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html.ch>. 16

Références

- Clerc, M., & Kennedy, J. (2002). , *The particle swarm: explosion, stability, and convergence in multi-dimensional complex space. IEEE Trans. on Evolutionary Compt.*, Vol 6, pp. 58-73.
- Cours.GI. (n.d.). Kahouadji. LE CONCEPT FMD.
Cours.GESTIONDELAMAINTEANCE.
- Cours.Youssefi, M. (n.d.). Cours. SMA (Systèmes multi agents).
- Deloitte. (2014). Industry 4.0 : Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies.
- Desoutter Industrial Tools*. (n.d.). Retrieved from <https://www.desouttertools.com/industry-4-0/news/503/industrial-revolution-from-industry-1-0-to-industry-4-0>
- digirupt.io*. (n.d.).
- Dittes, U. (n.d.). *Solutions techniques et opérationnelles pour l'industrie 4.0 dans les systèmes ERP*.
- Drath, R., & Horch, A. (2014). , Industrie 4.0: Hit or Hype? [*Industry Forum*]
Industrial Electronics Magazine, IEEE. 8. 56-58. 10.1109/MIE.2014.2312079.
- Dubey, Rameshwar, Gunasekaran, A., Childe, S., & Pa. (2017). Can Big Data and Predictive Analytics Improve Social and Environmental Sustainability?
Technological Forecasting and.
- Durfee, E., Lesser, V., & Corkill, D. (1989). Trends in Cooperative Distributed Problem Solving. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, , pp. 63-83,.
- ECO Infos*. (n.d.). Retrieved from <https://www.les-energies-renouvelables.eu/>
- EDF*. (n.d.). Retrieved from <https://www.edf.org/climate/how-cap-and-trade-works>
- El Watan*. (n.d.). Retrieved from <https://www.elwatan.com/edition/economie/le-nombre-de-pme-demeure-tres-faible-27-12-2017>
- Energy Education*. (n.d.). Retrieved from https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas_turbine
- Engrand, P. (1997). Approche d'optimisation multiobjective basée sur l'adoucissement simulé, et son application à la gestion des combustibles nucléaires. Fifth Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE 5). pp. 1-8, Vol.10, May 26-30 , Nice.
- Eppen, G., & Martin, R. K. (1987). Solving Multi-Item Lot-Sizing Problems using Variable Redefinition”, *Opns. Res.* 35, 832-848.
- Friesz, T. L. (1993). *The multiobjective equilibrium network design problem revisited: A simulated annealing approach. European J. of Operational Research*.
- ge.com. (2015). *Industrial Internet Insights Report for 2015*.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0, The Industrial Internet of Things. Springer*.

Références

- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and operations research*, 13, 533-549.
- Gopalakrishnan, M., K.Ding, J.M.Bourjolly, & S.Mohan. (2001). A tabu-search heuristic for the capacitated lot-sizing problem with set-up carryover, *Management Science* 47(6)851–863.
- Hafid, Z. (2013). Représentation de solution en optimisation continue, multi-objectif et applications. . (Autre. INSA de Rouen ;), Français. (NNT : 2013ISAM0027). .
- Hanssmann, F. (1962). *Operations Research in Production and Inventory Control*, John Wiley, .
- hello watt*. (n.d.). Retrieved from <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaïque>
- Hermann, M., Tobias, P., & Boris, O. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *10.13140/RG.2.2.29269.22248*.
- Holland, J. H. (1975). Adoption in neural and artificial systems. *Ann Arbor, Michigan (USA): The University of Michigan Press*.
- Industrial Internet Consortium*. (n.d.). Retrieved from <https://www.iiconsortium.org/members.htm>
- INSEE*. (n.d.). Retrieved from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4255717?sommaire=4256020#consulter>
- Isotropic*. (n.d.). Retrieved from <https://isotropic.network/spacex-future-vs-at-internet>
- K.Haase, & U.Kohlmorgen. (1995). Parallel genetic algorithm for the capacitated lot-sizing problem, in: *Operations Research Proceedings*, Springer-Verlag pp. 370–375.
- Karimi, B., Ghomi, S., & Wilson, J. (2003). The capacitated lot-sizing problem: A review of models and algorithms. *Omega*. 31. 365-378. *10.1016/S0305-0483(03)00059-8*.
- Kennedy, J. F., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In: *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*, vol. 4. Perth, Australia; (pp. 1942–48).
- Kirkpatrick, S. G., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671 -680.
- La crise de l'électricité en Californie" exposé de M. André MERLIN-Directeur de RTE. (n.d.).
- Lasi, H., P Fettke, HG Kemper, & T Feld. (2014). *Industry 4.0*. Springer.
- Lee, E. (2008). Cyber Physical Systems: Design Challenges. *Electrical Engineering and Computer Sciences*. . 363-369. *10.1109/ISORC.2008.25*.

Références

- M. Gundall et.al. (2018). 5G as Enabler for Industrie 4.0 Use Cases: Challenges and Concepts. *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Turin, 2018,*, pp. 1401-1408, doi: 10.1109/ETFA.2018.8502649.
- MAPI Foundation.* (n.d.). Retrieved from <https://mapifoundation.org/economic/2015/7/23/the-internet-of-things-industrie-40-vs-the-industrial-internet?external-link=yes>
- Marcon. P, e. (2017). Communication technology for industry 4.0., *Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg,*.
- Masmoudi, O. A., Ouazene, Y., & Chehade, H. (2016). Lot-sizing in a multi-stage flow line production system with energy consideration. *International Journal of Production Research.* 1-23. 10.1080/00207543.2016.1206670.
- Masmoudi, O., Yalaoui, A., Ouazene, Y., & Chehade, H. (2017). Lot-sizing in a multi-stage flow line productionsystem with energy consideration. *International Journal of Production Research*, 55(6), 1640–1663.
- MathWorks.* (n.d.). Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/nonlinear-constraints.html>
- Metropolis, N. R. (1953). Equation of state calculation by fast computing machines. *J. of Chemical Physics.* Vol. 21, pp. 1087-1092.
- Miller, A., G.L.Nemhauser, & M.W.Savelsbergh. (2000). Solving multi-item capacitated lot-sizing problems with setup times by branch-and-cut, Technical Report 39, Université Catholique de Louvain—Center for Operations Research and Economics,.
- Mitchell, M. (1996). An introduction to genetic algorithms, . *PHI Pvt. Ltd., New Delhi.*
- Mohammadi, M. (2015). Metaheuristic algorithms for solving lot-sizing and scheduling problems in single and multi-plant environments / Maryam Mohammadi.
- Mohammadi, M., Torabi, S., Fatemi Ghomi, S., & Karimi, B. (2010). A new algorithmic approach for capacitated lot-sizing problem in flow shops with sequence-dependent setups. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 49(1-4), 201–2.
- Nakib, A. (2007). Conception de métaheuristiques d'optimisation pour la segmentation d'images. Application aux images biomédicales.
- neos Guide.* (n.d.). Retrieved from <https://neos-guide.org/content/optimization-introduction>
- NGMN .* (n.d.). Retrieved from <https://www.ngmn.org/>
- Québec, M. d. (n.d.). *Plan d'action en économie numérique : Feuille de route industrie 4.0.*

Références

- Reynès, C. (2007). Etude des Algorithmes génétiques et application aux données de protéomique. . *Sciences du Vivant [q-bio]. Université Montpellier I,*.
- Rodoplu, M., Arbaoui, T., & Yalaoui, A. (2018). Energy Contract Optimization for the Single Item Lot Sizing Problem in a Flow-Shop Configuration and Multiple Energy Sources. *IFAC-PapersOnLine*, 51, 1089-1094. 10.1016/j.ifacol. 2018.08.460.
- Rogers, J. (1958). Acomputationalapproachtotheeconomiclot-scheduling problem, *Management Science* 4 264–291.
- Roshani, A., Giglio, D., & Paolucci, M. (2016). A simulated annealing approach for the capacitated dynamic lot sizingproblem in a closed remanufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 49 , 1496–1501.
- Roussel-Ragot, D. G. (1990). A problem Independant parallel implementation of simulated annealing: Models and experiments. *IEEE Trans. on ComputedAided Design.*, Vol. 9, pp. 827-837.
- Salomon, M., R.Kuik, & L.N.VanWassenhove. (1993). Statisticalsearch methods for lot-sizing problems, *Annals of Oper-ationsResearch*41 453–468.
- Schlick, J., Stephan, P., Loskyll, M., & Lappe, D. (2014). Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung. *Bauernhansl, T., M. ten Hompel and B. Vogel-Heuser, eds.,*.
- Sekkal, N., & Belkaid, F. (2020). A multi-objective simulated annealing to solve an identical parallel machine scheduling problem with deterioration effect and resources consumption constraints. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1-37.
- Serafini, P. (1992). Simulated annealing for multiple objective optimization problems.
- Serafini, P. (1992). *Simulated annealing for multiple objective optimization problems.Making, In Tenth Int. Conf. on Multiple Criteria Decision.*
- SONATRACH. (n.d.). *LE CODE RESEAU DE TRANSPORT PAR CANALISATION.*
- Stambouli, A. (2011). Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15. 1169-1181. 10.1016/j.rser.2010.11.017.
- Starlink*. (n.d.). Retrieved from <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/constellation-satellites-starlink-18554/>
- Talbi, E. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. JohnWiley and Sons, Inc.
- Talbi, E. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. *JohnWiley and Sons, Inc.*
- Tang, O. (2004). Simulated annealing in lot sizing problems. *International Journal of Production Economics*. 88. 173-181. 10.1016/j.ijpe.2003.11.006.

Références

- TeachMideast*. (n.d.).
- The Arab Weekly*. (n.d.). Retrieved from <https://thearabweekly.com/algeria-youthful-country-dependent-oil-and-gas>
- The world bank*. (n.d.). Retrieved from <https://www.worldbank.org/>
- Tunisien, G. (n.d.). *Statistics Tunisia, National Institute of Statistics*.
- Ulungu, E. T. (1999). MOSA method: A tool for solving multi-objective combinatorial optimization problems. *Journal of Multicriteria Decision* Vol. 20, 2, pp. 221-236.
- Ustundag, Alp, Cevikcan, & Emre. (2018). *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*.
- valeur*. (n.d.). Retrieved from <https://www.valuer.ai/blog/50-examples-of-corporations-that-failed-to-innovate-and-missed-their-chance>
- Vox*. (n.d.). Retrieved from <https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/6/15/15796202/map-carbon-pricing-across-the-globe>
- Wagner, H., & Whitin, T. (1958). Dynamic version of the economic lot size model, *Management Science* 5. 89–96.
- wartsila*. (n.d.). Retrieved from <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-deteriorating-due-to-ambient-temperature>
- WBG. (2015). *World development indicators: Energy dependency, efficiency and carbon dioxide emissions*. Technical report, World Bank, Washington, DC.
- Wee, H. (1999). deteriorating inventory model with quantity discount, pricing and partial backordering. *International Journal of Production Economics* , 59:511-8.
- WIRED*. (n.d.). Retrieved from <http://www.wired.com/2016/03/googles-ai-viewed-move-no-human-understand/>
- World Nuclear Association*. (n.d.). Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/where-does-our-electricity-come-from.aspx>
- World Nuclear Association*. (n.d.). Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx>
- Zangwill, W. (1969). A backloging model and a multi-echelon model of a dynamic economic lot size production system – a network approach, *Management Science* 15 . 506–527.
- ZEDDAM, B. B. (2019). Bi-objective optimization for the Production-Routing problem Cost vs Environment with energy consideration. *International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, 1-6.

Références

- Zeddami, B., BELKAID, F., & BENNEKROUF, M. (2019). Bi-objective optimization for the Production-Routing problem Cost vs Environment with energy consideration. *In 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, 1-6.
- Zeddami, B., Belkaid, F., & Bennekrouf, M. (2020). An Efficient Approach for Solving Integrated Production and Distribution Planning Problems: Cost vs. Energy. *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 10(2), 25-44.
- Zeddami, B., Belkaid, F., & Bennekrouf, M. (2020). An Efficient Approach for Solving Integrated Production and Distribution Planning Problems Cost vs Energy. *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 25-44.
- Zeddami, B., Belkaid, F., & Bennekrouf, M. (2020). An Efficient Approach for Solving Integrated Production and Distribution Planning Problems: Cost vs. Energy. *International Journal of Applied Logistics (IJAL)*, 25-44.
- ZME science. (n.d.). Retrieved from <https://www.zmescience.com/science/how-liverpool-fc-is-using-data-science-to-dominate-british-premier-league>

Résumé :

Résumé :

Aujourd'hui, l'industrie se trouve dans une nouvelle révolution, où non seulement les machines mais aussi les usines seront reliées pour former d'énormes chaînes logistiques complexes. Cette révolution met en œuvre ses propres technologies dans les usines, rendant la consommation d'énergie intensive à un point tel que les industriels doivent reconsidérer leurs sources d'énergie et leur impact sur l'environnement. Dans ce contexte, cette thèse vise à simuler un cas d'utilisation de l'industrie 4.0 d'un problème d'optimisation de dimensionnement des lots où l'objectif est d'optimiser à la fois les coûts de production et les émissions de gaz à effet de serre (GES) en utilisant un algorithme de métaheuristique de recuit simulé. Ensuite, et pour réagir efficacement en temps réel aux fluctuations de l'énergie, un système multi-agent est proposé.

Mots clés : industrie 4.0 métaheuristique, énergie, recuit simulé, système multi agent, gaz à effet de serre.

Abstract:

The industry today is going through a new revolution, where not only machines but also factories will be connected between each other to form huge complex supply chains. This revolution implements its own technologies into factories, making energy consumption reach intensive levels to a point where industrials need to question their energy sources and their impact on the environment. In this context the thesis aims to simulate an industry 4.0 use case of a lot-sizing optimization problem where the objective is to optimize both production costs and Greenhouse Gas (GHG) emissions using simulated annealing metaheuristic algorithm. After that, and to react effectively in real-time to energy fluctuation a multi-agent system is proposed.

ملخص:

تمر الصناعة اليوم بثورة جديدة، حيث لن يتم ربط الآلات فحسب، بل المصانع أيضاً فيما بينها لتشكيل سلاسل توريد معقدة ضخمة. تستقدم هذه الثورة تقنياتها الخاصة الى المصانع، مما يجعل استهلاك الطاقة يصل إلى مستويات كبيرة لدرجة أن المصنعين يحتاجون إلى مراجعة مصادر طاقتهم وتأثيرها على البيئة. في هذا السياق، تهدف الأطروحة إلى محاكاة حالة استخدام للصناعة 4.0 في مشكلة تحديد حجم الدفعات حيث الهدف هو تقليل كل من تكاليف الإنتاج وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري باستخدام خوارزمية تقنية محاكاة التلدين. بعد ذلك ومن أجل الاستجابة بشكل فعال في الوقت الحقيقي لتقلبات الطاقة، نُقترح نظام متعدد العوامل.

Appendice A : Programme de déclaration des données en CPLEX.

```
/******Les données******/
/*Les indices*/
N=3;
KK=3;
TT=5;
Rk=8;
/*Les paramètres*/
po=[9 6 8];
pro=[6 7 5];
CO=[0.16 0.08 0.16 0.08 0.16];
Aqua=[ [] [] [] ];
h=15;
w=[[81 99 82 75 91]
   [99 95 97 93 96]
   [64 63 67 71 54]];

d=[45 52 49 50 52];
Len=[1080 360 1080 360 1080];
Big=100000;
Emax=[[24 24 24 24 24]
      [10 10 10 10 10]
      [10 10 10 10 10]];
b=0.1;
V=[[0 6 9 12 15 18 24 36]
   [0 3 4 5 6 7 8 9]
   [0 3 4 5 6 7 8 9]];
Vcost=[[0 50 55 80 90 100 200 250]
       [0 75 82.5 120 135 150 300 375]
       [0 62.5 68.75 100 112.5 125 250 312.5]];
haf=[10 10 10];
Lim=2000;
car=[599 38 25];
```

Appendice B : Programme de déclaration des données en JAVA

```
intN=3;
intT=5;
intR=8;
intK=3;

double [] [] Aqua= newdouble[N][T];
int [] Len = {1080, 360, 1080, 360, 1080, 360, 1080};
double [] pow = {9, 6, 8};
double [] pro={6, 7, 5};
double [] co={0.16, 0.08, 0.16, 0.08, 0.16};
inth=15;
int [][] w={{81, 99, 82, 75, 91},{99, 95, 97, 93, 96},{64, 63,
67, 71, 54}};
int[] d={45, 52, 49, 50, 52};
intBig=10000000;
doubleb=0.1;
int [][] V={{0, 6, 9, 12, 15, 18, 24,
36},{0,3,4,5,6,7,8,9},{0,3,4,5,6,7,8,9}};
double [][] Vcost={{0,50, 55, 80, 90, 100, 200,
250},{0,75,82.5,120,135,150,300,375},{0,62.5,68.75,100,112.5,125,250,
312.5}};
double [] penal={10,10,10};
double [][] Emax={{24,24,24,24,24},{10,10,10, 10,
10},{10,10,10,10,10}};
int [] Car={599, 38, 25};
doubleLim=2000;
```