

N° d'ordre:

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABÈS DE SIDI BEL ABBÈS
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE
LABORATOIRE EEDIS

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Filière : Informatique
Spécialité : Systèmes d'information et de connaissances (SIC)

Par

MR ALLAL ANIS

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE ET LA PRODUCTION DANS LE CADRE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Soutenue le 30-01-2022 devant le jury :

Pr.	FARAOUN KAMEL MOHAMED	UDL-SBA	Président du jury
Dr.	AMAR BENSABER DJAMEL	ESI-SBA	Examinateur
Pr.	BOUKLI HACEN SOFIANE	UDL-SBA	Examinateur
Pr.	KESKES NABIL	ESI-SBA	Examinateur
Pr.	BENSLIMANE SIDI-MOHAMED	ESI-SBA	Directeur de thèse
Pr.	ADJOUDJ REDA	UDL-SBA	Co-Directeur de thèse

Année Universitaire : 2021 - 2022

Je dédie ce modeste travail :

A ma femme qui m'a accompagné tout au long de ces années de thèse et qui a partagé avec moi tous les moments d'émotions et de doutes pendant ces années de travail. Merci pour tes sacrifices et ta compréhension.

A mes parents pour tous leur dévouement et leurs sacrifices.

A ma soeur

A ma fille Sofia que j'ai parfois pu délaisser pour pouvoir aboutir à ce travail.

A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse.

REMERCIEMENTS

Il est d'usage de commencer ses remerciements par une dédicace à son directeur de thèse. Cette primeur n'est pas ici une simple politesse. Le Professeur Benslimane Sidi-Mohammed m'a accompagné depuis mon Magister et a toujours été présent pour me prodiguer ses nombreux conseils, m'aider à avancer et me pousser au travail. C'est donc avec le plus grand respect que je le remercie pour m'avoir encadré durant toutes ces années.

Un grand merci au Professeur Sahnoun M'hammed qui est à l'origine de ce sujet et qui en plus de m'avoir aidé et encadré dans cette thèse, est devenu un véritable ami. Merci pour tous les efforts que tu a fourni durant ces années, pour toutes les nuits que tu a passé en ligne avec moi à travailler, pour tous tes conseils. J'ai beaucoup appris a ton contact et j'espère que j'aurais encore l'occasion d'apprendre d'avantage.

Je remercie mon Co-Directeur de thèse, le Professeur Adjoudj Reda qui m'a pris sous son aile bienveillante et a été un grand frère pour moi pendant toutes ces années. Merci pour tes conseils et tes encouragements

Je n'oublie évidemment pas Mazar Merouane dont l'aide a été précieuse dans un moment où j'en avait le plus besoin. Nos débats agités et ses compétences en recherche opérationnelle ont grandement contribué à la réalisation de ce travail. C'est en toute amitié que je te remercie.

L'aide de Fasla Aziz lors de la rédaction du papier en anglais a été essentielle. Merci cher ami pour tout le temps que tu m'a accordé.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du laboratoire LINEACT du CESI de Rouen qui m'ont accueilli parmi eux pendant les stages de perfectionnement que j'ai effectué au laboratoire. J'ai trouvé chez vous une ambiance chaleureuse et conviviale qui m'a permis d'avancer dans mon travail.

Je suis bien sûr reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à mon évolution scientifique et apporté les briques nécessaires à la construction de ce manuscrit. Je pense entre autres à Hamri Mehdi, Badsy Hichem et Benatia Amine.

Enfin, je remercie tous mes collègues du département d'informatique de l'université Djillali Liabes.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 BACKGROUND	5
1.1 CARTOGRAPHIE DES PARCS ÉOLIENS DANS LE MONDE	6
1.1.1 Le potentiel de l'énergie renouvelable dans le monde . .	6
1.1.2 Capacité mondiale d'énergie éolienne installée	7
1.1.3 L'énergie éolienne en Algérie	9
1.2 LES MODES DE DÉGRADATIONS DES ÉOLIENNES	13
1.2.1 Les composants d'une éolienne	14
1.2.2 Répartition des couts de l'éolienne	15
1.2.3 La fiabilité des éoliennes	17
1.2.4 Les causes de pannes des éoliennes	17
1.2.5 Analyse des défaillances des éoliennes	19
1.2.6 Méthodes pour améliorer la fiabilité	20
1.3 LA MAINTENANCE DES ÉOLIENNES	22
1.3.1 Les stratégies de maintenance	23
1.3.2 Les pièces de rechange pour la maintenance	24
1.3.3 Les restrictions de la maintenance	24
1.3.4 Les méthodes de maintenance	25
1.3.5 Comparaison entre les types de maintenances	28
1.4 GESTION DE LA MAINTENANCE DES PARCS ÉOLIENS	28
1.4.1 Conception des installations éoliennes offshore	29
1.4.2 Ressources humaines	31
1.4.3 Ressources matérielles	32
1.4.4 Organisation de la chaîne logistique	33
1.5 CONCLUSION	35
2 SIMULATION MULTI-AGENTS	36
2.1 INTRODUCTION	37
2.2 HISTORIQUE	37
2.3 DÉFINITION D'UN AGENT	38
2.3.1 Agent cognitif	40
2.3.2 Agent réactif	40

2.3.3	Agent hybride	41
2.3.4	Agent BDI	41
2.4	LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS	42
2.5	PROPRIÉTÉS DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS	43
2.5.1	Interaction et coopération	44
2.5.2	Communication entre agents	45
2.5.3	Environnement	47
2.6	DOMAINES D'APPLICATION DES SMA	48
2.7	MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES	50
2.7.1	Système	50
2.7.2	Système complexe	51
2.7.3	Modèle	52
2.7.4	Modélisation	53
2.8	PROBLÉMATIQUE DE SIMULATION DE SYSTÈMES COMPLEXES . .	54
2.9	MODÈLES DE SIMULATION	57
2.9.1	Simulation par événements discrets (Discrete Event Simulation, "DES")	58
2.9.2	Simulation continue	58
2.9.3	Simulation discrète-continue combinée	58
2.10	SIMULATION MULTI-AGENTS	59
2.11	CONCLUSION	60
3	ÉTAT DE L'ART SUR LES APPROCHES DE SIMULATION MULTI-AGENTS ET DE MAINTENANCE DES PARCS ÉOLIENS OFFSHORE	61
3.1	INTRODUCTION	62
3.2	APPROCHES DE SIMULATION BASÉ SUR LA SIMULATION MULTI-AGENTS	62
3.3	MAINTENANCE D'ÉOLIENNE OFFSHORE	65
3.4	PROBLÈME D'ORDONNANCE DE LA MAINTENANCE ET DU ROUTAGE	66
3.4.1	Optimisation de l'ordonnancement	66
3.4.2	Route optimale pour la maintenance	67
3.5	CONCLUSION	73
4	MODÉLISATION ET SIMULATION À BASE D'AGENTS POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE DES ÉOLIENNES OFFSHORE	74
4.1	INTRODUCTION	75
4.2	ARCHITECTURE MULTI-AGENTS	76
4.2.1	Agents "Éolienne"	76
4.2.2	Agents "Maintenance"	81
4.2.3	Agents "Ressource"	81
4.2.4	Agent "Météo"	82
4.2.5	Agent "Monitoring"	82
4.3	FORMULATION DU PROBLÈME	83
4.4	MODÈLE DE COÛT	85
4.5	PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION DANS LE MODÈLE MULTI-AGENTS	87
4.6	CONCLUSION	88

5	OPTIMISATION DU ROUTAGE ET DE L'ORDONNANCEMENT DE LA MAINTENANCE : APPROCHE À BASE DE COLONIES DE FOURMIS	89
5.1	INTRODUCTION	90
5.2	LES MÉTA-HEURISTIQUES	90
5.3	ALGORITHME DE COLONIES DE FOURMIS "ANT COLONY OPTIMIZATION"	92
5.4	APPROCHE D'OPTIMISATION : "ANT COLONY SYSTEM"	93
5.4.1	Définition des phéromones et informations heuristiques	94
5.4.2	Règle de transition d'état de l'ACS	95
5.4.3	Mise à jour locale des phéromones	95
5.4.4	Mise à jour globale des phéromones	96
5.4.5	L'implémentation de l'ACS	96
5.5	CONCLUSION	97
6	EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS	98
6.1	INTRODUCTION	99
6.2	PLATEFORME DE SIMULATION	99
6.3	SIMULATION-OPTIMISATION	100
6.4	PARAMÈTRES DE L'ALGORITHME ACS	102
6.5	EXPÉRIMENTATION	102
6.6	MAINTENANCES	103
	CONCLUSION GÉNÉRALE	108
	CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES	109
	BIBLIOGRAPHIE	110
	NOTATIONS	128

LISTE DES FIGURES

1.1	Carte des ressources éoliennes dans le monde (3tier 2014). . .	7
1.2	Capacité mondiale annuelle d'éoliennes installées (1996-2018) (Ohlenforst & Council 2019).	8
1.3	Les nouvelles capacités d'éoliennes onshore installées en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).	9
1.4	Les nouvelles capacités d'éoliennes offshore installées en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).	9
1.5	Les installations total de l'offshore et de l'onshore en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).	10
1.6	Carte annuelle des vents à 10m d'altitude en Algérie (Chellali et al. 2011).	12
1.7	Les composants d'une éolienne (Bezzaoucha et al. 2018). . .	15
1.8	Répartition des coûts pour un parc éolien offshore en eaux peu profonde (Tavner 2012).	17
1.9	La relation entre la cause et le mécanisme de détérioration (Tavner 2012).	19
1.10	La relation entre la cause et le mode de défaillance d'un arbre principal d'une éolienne (Tavner 2012).	19
1.11	Les taux moyens de pannes des composants des éoliennes (Pérez et al. 2013).	21
1.12	Structure générale du modèle informatique pour un parc éolien (Rademakers et al. 2009)	21
1.13	Aperçu des différents types de maintenances (Wiggelinkhuizen et al. 2008). 23	
1.14	comparaison entre la maintenance preventive conditionnelle, la maintenance preventive systemique et la maintenance corrective (Ribrant 2006).	27
1.15	Évolution de la taille et puissance des éoliennes offshore (connaissancedesenergies 2017)	29
1.16	Principaux métiers sur la chaîne de valeur de l'éolien offshore.(Podevin 2017)	31
1.17	Navire de maintenance d'éolienne offshore "Ulstein SX175"(Ulstein 2015).	33
2.1	Une classification des différents types d'application des systèmes multi- agents (Ferber 1995)	49
2.2	La simulation informatique selon (Fishwick et al. 1997) . . .	55
2.3	Les trois rôles de réalisation des SMA (Drogoul et al. 2002) .	56
4.1	Regroupement des taches de maintenances	76
4.2	La composition et le comportement de l'agent "Éolienne" . .	77

4.3	La courbe de puissance d'une éolienne avec une production maximale $P_s = 6$ MW	78
4.4	diagramme de fonctionnement global	87
5.1	Les différentes classifications des algorithmes méta heuristiques	91
5.2	Principe de Ant Colony Optimization	92
5.3	Procédure de sélection d'éoliennes par des fourmis	95
5.4	Organigramme de l'algorithme ACS	96
6.1	Capture d'écran de l'interface du sim-optimiseur conçue à l'aide du logiciel NetLogo	101
6.2	Réduction du coût des maintenances en utilisant la stratégie de tournées et l'algorithme ACS par rapport à l'utilisation de l'heuristique	104
6.3	Réduction du coût pour chaque année en utilisant l'approche proposée (ACS et stratégie de tournée)	105
6.4	Amélioration de la moyenne quotidienne de l'EHF en utilisant l'approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)	105
6.5	Amélioration de la moyenne annuelle de l'EHF en utilisant l'approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)	106
6.6	Amélioration de la production cumulée en utilisant l'approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)	107
6.7	Amélioration annuelle de la production d'énergie selon l'approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)	107

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison entre les différents types de maintenance (Rao 1996), (Giebhardt <i>et al.</i> 2004).	28
2.1	Les agents cognitifs vs réactifs (Wooldridge & Jennings 1995).	40
3.1	Tableau comparatif entre les approches de simulation multi-agents	64
3.2	Tableau comparatif entre les approches de maintenance d'éoliennes offshore	72
6.1	Comparaison des paramètres expérimentaux de l'approche heuristique et de l'approche ACS	103
6.2	Nombre de maintenances pour chaque type de maintenance	103

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CONTEXTE

LES énergies renouvelables ont connu au cours des dernières années grâce à leurs faible émission en carbone, un intérêt croissant de la part des communautés politiques, sociales et de recherche . L'utilisation excessive des combustibles fossiles comme source d'énergie a un impact négatif sur l'environnement. Elle est progressivement remplacée par des énergies propres. L'énergie éolienne, en particulier l'offshore (en mer), est présentée comme l'alternative la plus intéressante à ce type d'énergie et devrait être la première source d'énergie à l'avenir (Perveen *et al.* 2014). Malgré l'imprévisibilité et le manque de contrôle sur le vent, cette source d'énergie est préférée en raison de ses nombreux avantages (Babu & Jithesh 2008).

Le nombre de parcs éoliens offshore (OWF) n'a cessé de croître ces dernières années grâce à l'abondance du vent en zone offshore ainsi qu'au potentiel énergétique des éoliennes offshore. En effet, ces dernières années, la capacité moyenne des éoliennes nouvellement installées est de 6,8 MW en 2018 (Walsh *et al.* 2019). De plus, les éoliennes offshore offre beaucoup d'avantages tels que l'électricité produite et le faible impact visuel par rapport à l'éolienne onshore.

Néanmoins, l'exploitation et la maintenance de ces éoliennes (offshore) sont complexes et coûteuses. Les éoliennes offshore sont relativement plus vulnérables aux pannes que les éoliennes terrestres (onshore) (Irawan *et al.* 2019). (Shafiee 2015a) a analysé les données collectées de différents parcs éoliens et montré que la disponibilité des parcs éoliens onshore est comprise entre 95% et 99%, alors qu'elle se situe entre 60% - 70% pour les parcs éoliens offshore.

Des entretiens fait, avec des exploitants de parcs éoliens offshore ont révélé que la gestion de la maintenance était résolue manuellement par des planificateurs de maintenance expérimentés (Dawid *et al.* 2017). Cependant, étant donné la complexité du problème et le nombre de contraintes à prendre en compte, la capacité humaine à produire systématiquement des politiques optimales face à des milliards de combinaisons possibles d'affectation de navires aux éoliennes doit être remise en question. La disponibilité d'outils d'aide à la décision offrirait aux opérateurs un avantage non négligeable et leur permettrait de réduire les coûts de maintenance.

Ce potentiel de réduction des coûts devient de plus en plus important à mesure que les parcs éoliens deviennent plus grands et sont construits plus loin du rivage, augmentant les temps de trajet des navires vers et à l'intérieur des parcs éoliens.

PROBLÉMATIQUE

Les conditions dans lesquelles les éoliennes fonctionnent provoquent souvent des pannes du système (Chan & Mo 2017). La plupart des sous-systèmes des éoliennes peuvent tomber en panne pendant le fonctionnement, peuvent être concernés rotors, pales, systèmes de commande de tangage, boîtes de vitesses, roulements, systèmes de lacet, générateurs, commandes électriques et freins (Hyers *et al.* 2006). L'interaction de pannes entre ces éléments augmente la difficulté des actions de maintenance et la durée de leur variabilité (Qiu *et al.* 2018).

En fait, le coût de maintenance d'un parc éolien offshore représente 20 à 35% du prix total en Kwh (Ortegon *et al.* 2013). L'U.S Energy Information Administration (EIA) rapporte que l'électricité produite par les éoliennes offshore est 2,6 fois plus chère que celle produite par les éoliennes onshore (Perveen *et al.* 2014). Par conséquent, afin de rendre l'énergie éolienne offshore compétitive avec l'énergie éolienne terrestre et d'autres sources d'énergie renouvelables, il est nécessaire de réduire le coût des tâches de maintenance et d'exploitation (O & M) des OWF.

Le coût de l'O & M pour un parc éolien offshore dépend de plusieurs paramètres tels que les conditions météorologiques, l'accessibilité aux parcs éoliens, les pannes aléatoires des éoliennes, etc., ce qui rend l'estimation des coûts complexe. De nombreux travaux de recherche s'intéressent à la réduction des coûts de la maintenance en OWF. D'autre part, la littérature montre l'efficacité du regroupement de la maintenance dans le même circuit pour réduire les coûts de transport (Dai *et al.* 2015). En outre, une politique de maintenance opportuniste peut également permettre une réduction des coûts (Ding & Tian 2012; Song *et al.* 2018).

Afin de mettre en oeuvre une telle politique, il est nécessaire d'optimiser la planification et le routage des équipes de maintenance des ports aux éoliennes. La résolution de ce problème devient plus complexe lorsque l'on considère la haute dynamique des systèmes et leur aspect stochastique. (Shafiee 2015b).

La simulation multi-agents permet de modéliser et d'appréhender la dynamique de ce système ainsi que les interactions entre les entités qui le constitue. La démarche scientifique sous-tendue par l'élaboration d'un modèle de simulation multi-agents repose sur une expérimentation qui comporte trois aspects fondamentaux (Michel 2004) :

- le phénomène réel (ou virtuel) que l'on souhaite étudier.
- le modèle de ce phénomène
- la simulation de ce modèle par ordinateur.

En raison du nombre important de paramètres qui entrent en considération dans la maintenance des parcs éoliens offshore, il nous est impossible de développer un modèle qui permette de jouer tous les scénarios de simulation possibles. En effet, le problème de la maintenance des parcs éoliens offshore est modélisé comme un problème d'optimisation combinatoire NP-complet (Juan *et al.* 2015). Pour pallier à ce problème, nous proposons dans cette thèse de combiner la simulation et l'optimisation afin de fournir un outil d'aide à la décision plus réaliste capable d'optimiser la décision lors du processus de simulation.

OBJECTIFS ET MOTIVATIONS

Nous avons pu constater durant nos recherches que l'Algérie disposait d'un potentiel non négligeable d'énergie éolienne, majoritairement dans le désert. Des études ont montré que les conditions de maintenance dans le désert sont très semblables à celles en offshore. De ce fait, notre approche pourrait permettre d'apporter des solutions aux exploitants d'éventuels parcs éoliens qui seraient installés dans le désert. Plusieurs approches pour l'optimisation de la maintenance des parcs éoliens offshore ont été proposées ces dernières années afin de réduire les coûts de l'exploitation et de la maintenance et rendre l'énergie éolienne plus compétitive. L'objectif de cette thèse est de développer un outil d'aide à la décision qui pourrait permettre aux exploitants de parcs éoliens offshore de disposer de données qui les aideraient à mieux gérer les maintenances des éoliennes d'un parc offshore et de réduire les coûts liés à celles-ci. Pour cela, il est primordial de comprendre le fonctionnement des éoliennes, les maintenances qui interviennent dans ce cadre ainsi que toute la dynamique des paramètres qui entrent en jeu dans les prises de décision des exploitants. L'aide à la décision a pour objectif de faciliter la prise de décision d'un acteur confronté à une hypothèse de travail amenant ce dernier à se positionner sur trois dimensions temporelles à la fois : le passé, le présent et l'avenir (Taghezout 2011). Le but de notre travail est d'offrir au gestionnaire du parc éolien un outil capable de proposer une solution optimale ou quasi optimale (la meilleure décision au meilleur moment). L'approche que nous proposons a pour objectif de trouver le meilleur ensemble d'éoliennes à maintenir au cours d'une même tournée.

CONTRIBUTIONS

Dans ce travail nous proposons une approche de simulation-optimisation afin de déterminer l'impact de la maintenance opportuniste dans les tournées des bateaux sur le coût. Nos principales contributions sont :

- Un état de l'art sur les approches d'optimisation des éoliennes offshore ainsi qu'une comparaison entre ces approches.
- L'utilisation d'une approche de simulation-optimisation pour surmonter le problème de la nature stochastique et dynamique de l'OWF.
- Une modélisation et une simulation multi-agents sont introduites pour gérer la complexité du système.
- La prise en compte de plusieurs paramètres stochastiques du système tels que la durée de la maintenance, la variation météorologique et l'occurrence de la panne.
- L'optimisation du routage est basée sur l'algorithme Ant Colony Systems qui a prouvé son efficacité dans ce genre de problème.

ORGANISATION DE LA THÈSE

Ce manuscrit est structuré en six chapitres :

Le *premier chapitre* expose le background général de notre thèse. Nous commençons par donner une cartographie des parcs éoliens dans le monde tout en nous focalisant sur le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie. Nous présentons ensuite les concepts les plus importants de l'éolienne, de la maintenance des éoliennes et de la gestion de la maintenance des parcs éoliens.

Le *deuxième chapitre* présente la simulation multi-agents. Nous définissons les concepts d'agents et de systèmes multi-agents. Nous abordons ensuite le cadre général de notre thèse qui est celui de la modélisation et la simulation d'un système complexe.

Le *troisième chapitre* constitue un état de l'art des approches d'optimisation de la maintenance des parcs éoliens offshore. Une classification et une comparaison de ces approches sont faites afin de mettre en lumière notre apport par rapport à la littérature.

Nous présentons dans le *quatrième chapitre* une modélisation et simulation à base d'agents pour la gestion de la maintenance des éoliennes offshore. La décomposition multi-agents de notre système est détaillée ainsi que le modèle de coût et le processus de prise de décision dans notre approche.

Le *Cinquième chapitre* introduit l'algorithme d'optimisation de colonies de fourmis que nous développons dans notre approche ainsi que toutes ses règles de fonctionnements. Nous en profitons pour donner quelques définitions et concepts généraux sur les méta-heuristiques.

Nous exposons dans le dernier chapitre l'interface de notre simulateur et nous en expliquant ses fonctionnalités. Nous présentons par la suite les expérimentations faites et les résultats obtenus.

Nous terminerons cette thèse par une conclusion et des perspectives pour la suite de notre travail.

BACKGROUND



SOMMAIRE

1.1	CARTOGRAPHIE DES PARCS ÉOLIENS DANS LE MONDE	6
1.1.1	Le potentiel de l'énergie renouvelable dans le monde . . .	6
1.1.2	Capacité mondiale d'énergie éolienne installée	7
1.1.3	L'énergie éolienne en Algérie	9
1.2	LES MODES DE DÉGRADATIONS DES ÉOLIENNES	13
1.2.1	Les composants d'une éolienne	14
1.2.2	Répartition des couts de l'éolienne	15
1.2.3	La fiabilité des éoliennes	17
1.2.4	Les causes de pannes des éoliennes	17
1.2.5	Analyse des défaillances des éoliennes	19
1.2.6	Méthodes pour améliorer la fiabilité	20
1.3	LA MAINTENANCE DES ÉOLIENNES	22
1.3.1	Les stratégies de maintenance	23
1.3.2	Les pièces de rechange pour la maintenance	24
1.3.3	Les restrictions de la maintenance	24
1.3.4	Les méthodes de maintenance	25
1.3.5	Comparaison entre les types de maintenances	28
1.4	GESTION DE LA MAINTENANCE DES PARCS ÉOLIENS	28
1.4.1	Conception des installations éoliennes offshore	29
1.4.2	Ressources humaines	31
1.4.3	Ressources matérielles	32
1.4.4	Organisation de la chaîne logistique	33
1.5	CONCLUSION	35

1.1 CARTOGRAPHIE DES PARCS ÉOLIENS DANS LE MONDE

Depuis quelques années, avec la préoccupation croissante de l'opinion internationale sur l'impact de l'utilisation importante des ressources de combustibles fossiles sur l'environnement, tous les yeux sont tournés vers les énergies renouvelables et l'alternative qu'elle offre face à ce problème. Une solution aux problèmes du changement climatique, de la pollution de l'air, pollution de l'eau, et l'insécurité énergétique exige une conversion à grande échelle afin d'offrir une énergie fiable à faible coût avec une augmentation de l'efficacité énergétique.

La production d'électricité d'origine éolienne a émergé comme une des technologies la plus performante d'énergies renouvelables. Malgré l'imprévisibilité et le manque de contrôle sur le vent, l'énergie éolienne est préférée comme source de production d'électricité en raison de ses nombreux avantages (Babu & Jithesh 2008)

L'énergie éolienne se développe à un rythme soutenu dans presque tous les pays du monde. Au cours des dix dernières années, sa croissance moyenne a atteint 26 % par an. L'analyste environnemental Lester R. Brown attribue ce succès rapide à six qualités principales : « L'énergie éolienne est abondante, bon marché, inépuisable, disponible presque partout, propre et sans impact sur le climat. Aucune autre source d'énergie ne possède toutes ces qualités. » (Brown & Hulot 2008). Cette source d'énergie a le potentiel pour devenir la plus grande source d'énergie dans le futur (Perveen *et al.* 2014).

1.1.1 Le potentiel de l'énergie renouvelable dans le monde

Le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne n'est pas fixe. Il est fonction des avancées techniques et des hypothèses concernant les autres obstacles au développement de cette énergie. Néanmoins, un nombre croissant d'évaluations mondiales de la ressource éolienne démontre que le potentiel technique de la planète dans ce domaine excède la production actuelle d'électricité dans le monde (Edenhofer *et al.* 2011). Aucune approche normalisée n'a été élaborée pour estimer le potentiel technique mondial de l'énergie éolienne : la diversité des données, des méthodes, des hypothèses et même des définitions du potentiel technique ne favorise pas les comparaisons. Le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC "Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat" (Pachauri & Reisinger 2008) a estimé le potentiel technique de l'énergie éolienne terrestre à 180 EJ/an (50 000 TWh/an). D'autres estimations du potentiel technique mondial de l'énergie éolienne qui prennent en compte un certain nombre d'obstacles supplémentaires au développement varient de 70 EJ/an (19 400 TWh/an) (terrestre uniquement) à 450 EJ/an (125 000 TWh/an) (à terre et à proximité des côtes). Cette fourchette représente approximativement une à six fois la production mondiale d'électricité en 2008 et sous-estime probablement le potentiel technique, étant donné que plusieurs de ces études se fondent sur des hypothèses dépassées, ne tenant pas compte ou ne tiennent compte qu'en partie de l'énergie éolienne au large des côtes et présentent des insuffisances sur le plan des méthodes et du calcul. Les estimations du potentiel technique de la seule énergie

éolienne au large des côtes varient de 15 EJ/an à 130 EJ/an (4 000 à 37 000 TWh/an), si l'on ne tient compte que des applications en eaux peu profondes ou près des côtes ; le potentiel technique s'accroît si l'on envisage également des applications en eaux profondes, avec un recours éventuel à des éoliennes flottantes (Edenhofer *et al.* 2011). Même si les estimations des différentes études sur le potentiel de l'énergie éolienne ne sont pas précises, il est clair que cette source d'énergie offre de grandes possibilités. L'obstacle à son développement ne réside donc pas dans son potentiel mais plus dans les contraintes économiques liées au coût de l'énergie éolienne et les questions liées à l'acceptation sociale. De plus les ressources éoliennes ne sont pas également réparties sur la surface du globe, l'énergie éolienne ne pourra donc pas contribuer équitablement à la satisfaction des besoins des divers pays. La figure 1.1 présente une carte des ressources éoliennes dans le monde et fait état d'un potentiel limité dans certaines zones.

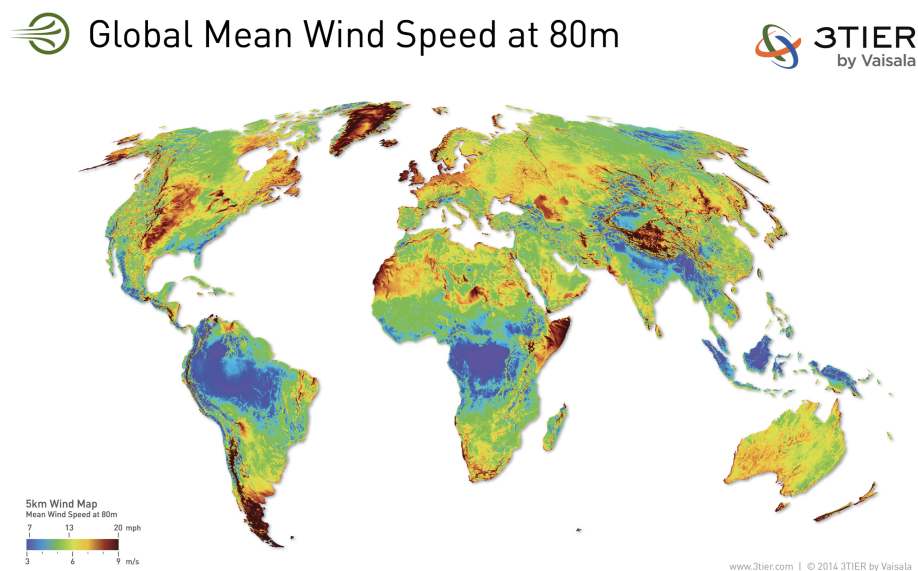


FIGURE 1.1 – Carte des ressources éoliennes dans le monde (3tier 2014).

1.1.2 Capacité mondiale d'énergie éolienne installée

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes et les subventions accordées par des gouvernements ont permis leur développement dans un grand nombre de pays. L'année 2018 a été une bonne année pour l'industrie de l'énergie éolienne, avec une croissance mondiale de plus de 9.6%, passant de 539.1 GW à 591 GW (Figure 1.2) et des installations de plus de 51 GW (Ohlenforst & Council 2019). Avec un recul de plus de 20 ans avec cette source d'énergie, l'éolienne est considérée comme l'une des technologies les plus matures et économiques parmi les énergies renouvelables. Au-delà de la donne économique et environnementale, l'énergie éolienne suscite un intérêt particulier car elle peut favoriser la diversification et l'indépendance énergétique d'un pays.

Plusieurs pays ont atteint en 2018 des niveaux relativement élevés

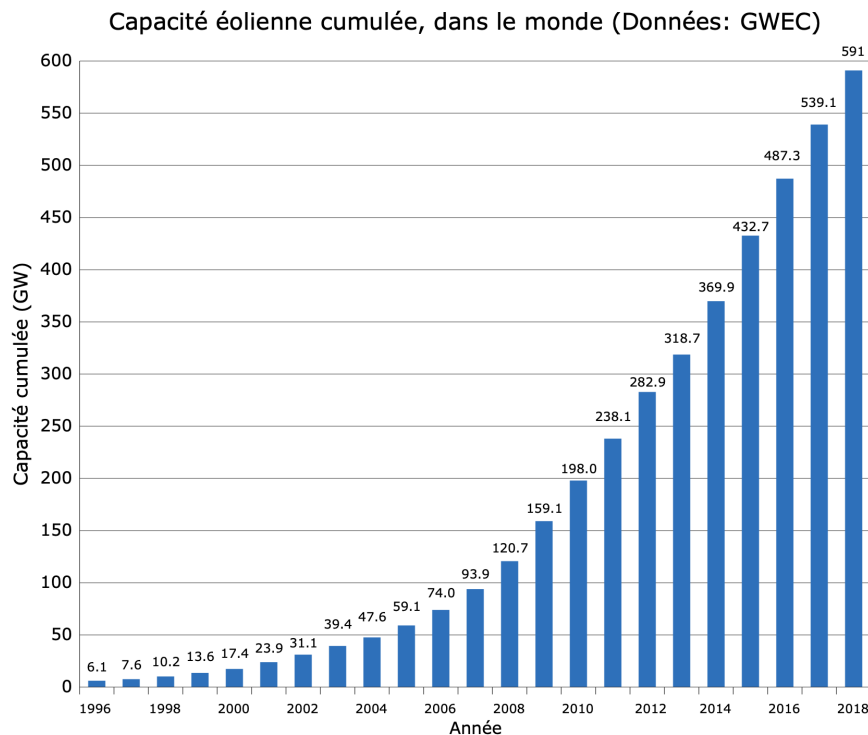


FIGURE 1.2 – Capacité mondiale annuelle d'éoliennes installées (1996-2018) (Ohlenforst & Council 2019).

d'exploitation de l'énergie éolienne, comme au Danemark avec 41% de la production d'électricité, 19% au Portugal, 19% en Espagne, 28% en Irlande et 21% en Allemagne (Komusanac *et al.* 2019). Plus de la moitié des pays du monde utilisent l'énergie éolienne sur une base commerciale. La grande surprise de ces dernières années était, bien sûr, la Chine, avec l'installation de parcs offrant une étonnante capacité de 21.2 GW en 2018, ce qui équivaut à 45% du marché "onshore" annuel (Figure 1.3) (Ohlenforst & Council 2019). Aussi, la Chine a installé pour la première fois plus d'éolienne offshore que n'importe quel autre pays (Figure 1.4) (Ohlenforst & Council 2019). Nous continuons à voir émerger de nouveaux marchés, en particulier en Afrique et en Amérique latine.

La Chine est le plus grand marché pour l'énergie éolienne depuis 2008. Elle conserve la première place en 2018. Avec la Chine au premier plan, les installations faites en Asie ont mené ce continent à la première place, devant l'Europe en seconde place et l'Amérique du nord à la troisième. En effet, pour la neuvième année consécutive, l'Asie a été le plus grand marché du monde pour l'énergie éolienne.

Les éoliennes installées dans les différents pays sont fournies par des parcs éoliens onshore et d'autres offshore. En effet, même si l'énergie éolienne onshore est considérée comme l'une des énergies renouvelables les plus rentables et matures, l'éolienne offshore prend une place de plus en plus grande et offre de nouvelles opportunités d'énergie. Malgré un coût plus important due à son âge, l'éolienne offshore est en voie de s'imposer grâce au développement continu de la technologie et à la réduction

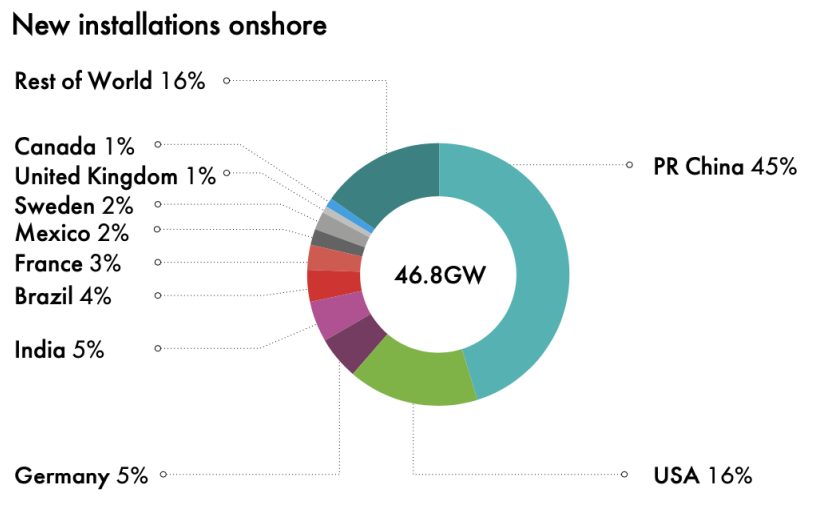


FIGURE 1.3 – Les nouvelles capacités d'éoliennes onshore installées en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).

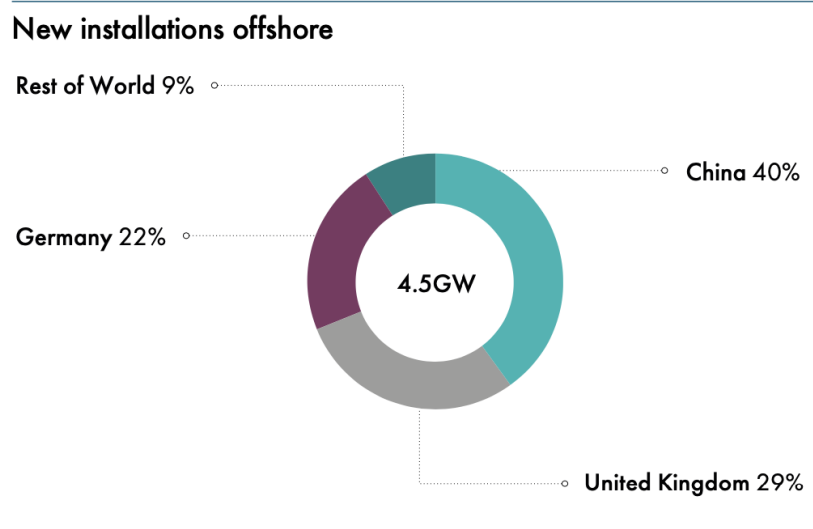


FIGURE 1.4 – Les nouvelles capacités d'éoliennes offshore installées en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).

des coûts d'exploitation(Figure 1.5). Par la suite, nous allons détailler les capacités onshore et offshore actuellement déployées par différents pays.

1.1.3 L'énergie éolienne en Algérie

L'Afrique a d'énormes ressources énergétiques renouvelables, suffisantes pour satisfaire tous les besoins énergétiques actuels et futurs. Alors que plus de 500 millions de personnes en Afrique n'ont pas accès à l'électricité, la plupart d'entre elles se trouvant en Afrique sub-saharienne, les ressources énergétiques renouvelables restent pour la plupart inexploitées. Cet énorme potentiel d'énergies renouvelables pourrait contribuer à résoudre le problème de l'accès à l'énergie et fournir à ces pays une puis-

Total installations by onshore and offshore

GW, share of total new installations

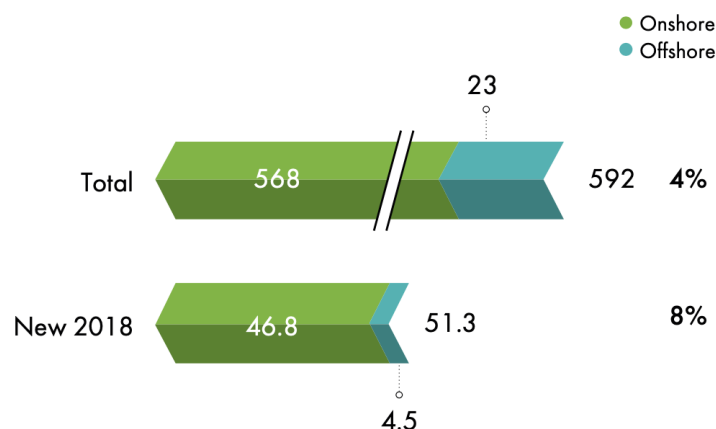


FIGURE 1.5 – Les installations total de l'offshore et de l'onshore en 2018 (Ohlenforst & Council 2019).

sance abordable pour leur développement afin de protéger leur économie de la volatilité des prix des combustibles fossiles au niveau international.

L'Afrique du Nord qui est riche en ressources éoliennes, en particulier sur l'Atlantique, la Méditerranée et les côtes de la mer Rouge, où la vitesse du vent dépasse souvent 6,9 m/s montre un bon potentiel de déploiement à grande échelle de parcs éoliens. La part actuelle de l'énergie éolienne dans la filière énergétique en Afrique du Nord est d'environ 2% de la capacité électrique totale installée de la région. Toutefois, cette situation semble évoluer rapidement grâce aux efforts fournis par la plupart des gouvernements nord-africains (GWEC 2014).

En 2014, après quelques années difficiles, plusieurs pays d'Afrique du Nord ont progressé avec des programmes nationaux pour le déploiement de l'éolienne. L'année précédente, seuls le Maroc et la Tunisie avaient fait des progrès, tandis que les autres pays avaient été plongés dans les complications du printemps arabe ou étaient en train de façonner et d'adopter de nouvelles politiques pour développer leurs ressources d'énergies renouvelables. Cependant, en 2014, quatre des cinq pays d'Afrique du Nord ; l'Égypte, la Tunisie, l'Algérie et le Maroc, ont progressé et porté la capacité installée totale de l'éolienne à plus de 1,6 GW (GWEC 2014).

L'un des développements le plus important de ces dernières années a été l'adoption en 2014 de politiques de Tarif de Rachat Garantie « TRG » par l'Algérie et l'Égypte. De plus, il existe des subventions et des fonds d'énergies renouvelables nationales qui peuvent financer une partie des projets d'énergie renouvelable en Algérie, en Égypte, au Maroc et en Tunisie. Cependant, ces fonds sont à différents niveaux de maturité opérationnelle et financière selon les pays. En Algérie, un prélèvement de 0,5% sur les recettes fiscales de l'hydrocarbure alimente le fonds national Algérien de l'énergie renouvelable, ce qui devrait avoir un impact positif sur l'avenir de déploiement de l'éolienne dans le pays. Ces efforts ont vu la naissance du premier parc éolien de 10 MW à Kabertene en 2014 dans le

cadre de la première phase du nouveau programme d'énergie éolienne de l'Algérie. Deux autres parcs éoliens, chacun de 20 MW, sont en développement (Zafar 2017)

Il y a un grand nombre de sites prometteurs pour l'énergie éolienne en Algérie. Ils sont situés dans les régions d'Adrar, dans le sud, d'Oran dans le nord-ouest, la zone de Meghress à Biskra à l'est et la zone de El Kheiter à Tiaret, à l'ouest. Un certain nombre de sites le long de la côte ont des vitesses de vent supérieures à la moyenne de 5,0 m / s, atteignant plus de 8,5 m / s à 80 m (Stambouli *et al.* 2012).

L'évaluation des ressources éoliennes disponibles sur le territoire Algérien nécessite un ensemble de données météorologiques représentatives pour chaque site. En raison du manque d'observations météorologiques enregistrées, il est difficile d'accéder à des données mesurées réelles en Algérie qui couvrent tout le pays (Guezgouz *et al.* 2021). La carte (Figure 1.6) montre que 50% de la surface du pays présente une vitesse moyenne de vent considérable. Elle montre aussi que la région sud-ouest connaît de grandes vitesses de vent pendant une grande partie de l'année. Ce potentiel de l'énergie éolienne est idéal pour le pompage de l'eau en particulier dans les hautes plaines. La plupart des recherches récentes sur l'énergie éolienne potentielle montrent que les applications impliquant de petites éoliennes pourraient être utilisées pour fournir de l'électricité sur les régions relativement peu développées du grand sud, qui ne sont pas connectées au réseau national (Chellali *et al.* 2012). En 2016, (Himri *et al.* 2016) ont présenté une analyse des ressources d'énergie éolienne dans la région de Timimoun. Ils ont considéré les effets des obstacles, les changements de rugosité de surface et les variations du terrain sur la variabilité de la vitesse du vent et la puissance de sortie. Le rendement énergétique a été estimé en utilisant l'éolienne VESTAS V90-2.0 MW. Les résultats de l'étude ont montré que l'installation d'une éolienne d'une puissance de 2.0 Mw à Tindouf pourrait produire 118 017 MWh/an d'électricité en tenant compte de la température, de la pression et du coefficient de perte d'environ 0,971, 0,964 et 0,89, respectivement.

Différentes études sont menées depuis quelques années pour évaluer le potentiel de l'Algérie en énergie éolienne. (Belabes *et al.* 2015) font une évaluation technique et économique sur la production d'électricité par des éoliennes sur six sites du nord de l'Algérie (Oran, Sétif, Skikda, Tlemcen, Tiaret, et Miliana). (Himri *et al.* 2008) ont fait une analyse sur 10 ans de données de vitesse du vent sur 3 stations, à savoir Adrar, Timimoun et Tindouf. Leurs résultats montrent que ces villes pourraient respectivement produire 98,832, 78,138 et 56,040 MWh d'électricité si des parcs éoliens de 30 MW étaient installés dans chaque ville. (Himri *et al.* 2010) font une analyse statistique sur la vitesse du vent à Tindouf et montrent que la vitesse moyenne se situe entre 7.19 et 7.95 m/s.

Le gouvernement Algérien a encouragé les institutions étatiques dans le domaine de l'énergie à développer et à promouvoir des instruments et des mécanismes qui encouragent l'investissement dans les énergies renouvelables. L'adoption du cadre juridique, propice à la promotion des énergies renouvelables et à la construction d'infrastructures relatives à la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables, se définit à travers diverses mesures (Boukli Hacene *et al.* 2020) :

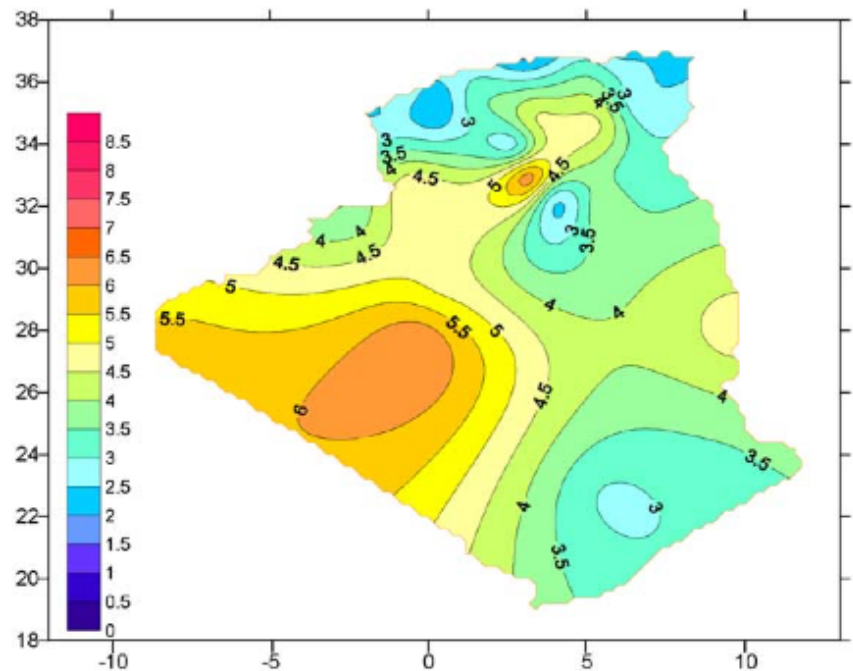


FIGURE 1.6 – Carte annuelle des vents à 10m d'altitude en Algérie (Chellali et al. 2011).

- Loi n°04-09 du 14 août 2004 promouvant les énergies renouvelables dans le cadre du développement durable (JO n° 52 du 18 août 2004) ;
- Loi n°09-09 du 30 décembre 2009 portant loi des finances pour 2010, notamment l'article 64 portant sur la création du Fonds national des énergies renouvelables et de la cogénération (FNER) (JO n° 78 du 31 décembre 2009) ;
- Le décret exécutif n° 13-218 du 18 juin 2013 a fixé les conditions d'octroi de primes pour les coûts de diversification de la production d'électricité (JO n° 33 du 26 juin 2013) ;
- Le décret exécutif n° 15-319 du 13 décembre 2015 a établi les modalités de fonctionnement du compte spécial n° 302-131 intitulé «Fonds national pour l'efficacité énergétique et pour les énergies renouvelables et la cogénération» ;
- Arrêté gouvernemental du 2 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions de leur application pour l'électricité produite à partir d'installations utilisant le secteur éolien (JO n° 23 du 23 avril 2014) ;
- Arrêté gouvernemental du 2 février 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions d'utilisation pour l'application de l'électricité produite à partir d'installations utilisant le secteur solaire photovoltaïque (JO n° 23 du 23 avril 2014) ;
- Arrêté du 1er septembre 2014 fixant les tarifs d'achat garantis et les conditions d'utilisation de l'électricité produite à partir d'installations utilisant le secteur de la cogénération (JO n° 18 du 8 avril 2015) (OJPDRA, 2015).

Par ailleurs, la recherche scientifique et le développement technologique menés au Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) font partie du programme national de recherche en énergies renouvelables, considéré par le gouvernement comme une priorité (Bouraiou *et al.* 2020).

L'Algérie entend se positionner comme un acteur majeur de la production d'électricité à partir de photovoltaïque et de l'éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces secteurs énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable, moteur d'un nouveau modèle de croissance économique. 37% de la capacité installée d'ici 2030 et 27% de la production d'électricité pour la consommation nationale seront d'origine renouvelable. Le programme national de développement des énergies renouvelables sur la période 2015-2030 vise à produire grâce à l'énergie éolienne plus de 5 000 MW (Bouraiou *et al.* 2020). Partant du fait que les étapes de construction du parc éolien nécessitent en moyenne 12 mois d'enregistrement des données de vitesse sur site, environ 12 mois pour les autorisations administratives et 18 à 24 mois pour la construction des parcs éoliens, l'objectif 2030 représente un impératif à atteindre en lançant et en réalisant des projets dans un délai très court pour assurer 5 000 MW du mix énergétique envisagé. En effet, la réalisation du programme d'énergies renouvelables, en particulier le volet éolien, nécessite la construction d'une vingtaine de parcs éoliens, chacun composé d'une centaine d'éoliennes de grande capacité (1,5MW-3MW) impliquant ainsi des travaux à grande échelle (Hafida 2018).

Comme le plus grand potentiel éolien en Algérien se trouve au sud, dans le désert, il est important de prendre en considération les conditions météorologiques de la région. Dans ce contexte, (Zgoul & El-Thalji 2011) ont présenté les principales menaces et les défis pour l'exploitation et la maintenance de parcs éoliens dans un climat désertique sur la base de l'expérience et des connaissances à jour tirées d'articles scientifiques et de rapports techniques. Les principaux fils opérationnels des régions désertiques sont les couches «accumulées de sable» dues au vent de sable, aux tempêtes de sable, aux températures nocturnes basses et aux températures diurnes élevées. De leur côté, (El-Thalji & Liyanage 2012) discutent de la similarité des conditions de maintenance dans le désert avec celles des parcs éoliens offshore, des parcs en climat froid et de l'importance que peut avoir l'expérience acquise dans la maintenance de ces derniers.

1.2 LES MODES DE DÉGRADATIONS DES ÉOLIENNES

L'intérêt pour les énergies renouvelables n'a cessé d'augmenter depuis la première crise du pétrole en 1973. L'industrie de l'énergie renouvelable a fait des progrès considérables depuis le protocole de Kyoto (Japon, 1997), où des réductions collectives d'émission de gaz à effet de serre ont été convenues et divers développements ont été encouragés par les gouvernements à travers le monde (Akdağ & Dinler 2009). En 2007, l'Union Européenne a fixé un objectif de 20% pour la part des énergies renouvelables dans l'UE d'ici 2020, l'énergie éolienne fournissant 14%. Quatre ans plus tard, la feuille de route énergétique pour 2050 a laissé entendre que

l'énergie éolienne pourrait fournir entre 31,6% et 48,7% de l'électricité de l'Europe (European-commission 2011).

Ainsi, avec la forte pénétration de l'énergie éolienne, la fiabilité va devenir un facteur essentiel au cours des prochaines années. En raison de l'environnement concurrentiel, les différents acteurs du secteur préfèrent les configurations d'éoliennes les plus productives et économiques. L'analyse des coûts à long terme de l'éolienne, dont les coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance, se traduira par un meilleur choix de configuration. Ceci est possible uniquement si cette analyse porte sur la fiabilité des différentes technologies de l'éolienne (Arabian-Hoseynabadi *et al.* 2010).

Au cours des 15 dernières années, Les éoliennes ont changé en taille et en puissance, et cela se reflète dans leur conception (Echavarria *et al.* 2008). Les différents composants de l'éolienne n'ont cessé d'évoluer dans le but de réduire les coûts et produire de l'énergie plus efficacement. Ces évolutions technologiques ont pu se faire grâce à l'expérience acquise dans le temps et à la croissance de l'industrie de l'énergie éolienne. Les combustibles fossiles sont de moins en moins attrayants offrant ainsi des opportunités pour le développement des énergies renouvelables et permettant la production d'énergie à des prix compétitifs.

L'industrie éolienne s'intéresse de plus en plus aux modes de dégradations des éoliennes et aux moyens d'y remédier. En effet, même si la fiabilité des éoliennes modernes a beaucoup progressé ces dernières années, il est nécessaire d'avoir une bonne compréhension des facteurs qui entraînent la dégradation des éoliennes afin de relever les défis économiques des futures installations. Cela pourrait permettre d'avoir une meilleure fiabilité pour les parcs éoliens offshore qui sont en pleine progression grâce à une plus grande production énergétique, mais qui sont par contre, confrontés à des conditions plus défavorables.

1.2.1 Les composants d'une éolienne

La structure basique d'une éolienne à 3 pales est illustrée dans la figure 1.7. Les principaux composants y sont présentés, mais il existe une grande variété de modèles et il est important de localiser les pannes, leurs emplacements précis dans la structure et comprendre leur effet sur la disponibilité et la fiabilité d'une éolienne. Pour des raisons opérationnelles, les éoliennes sont équipées de systèmes SCADA et CMS qui recueillent automatiquement des données de capteurs et circuits d'alarme répartis autour de la structure de l'éolienne et lui permette de fonctionner automatiquement dans son domaine opérationnel (Tavner 2012).

(Bezzaoucha *et al.* 2018) Identifie les composants de l'éolienne qui reviennent le plus souvent dans la littérature :

1. Rotor-pales : se compose d'un moyeu et de pales. Il peut convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique.
2. Système de tangage : peut être divisé en tangage hydraulique et électrique. Sa fonction est d'adapter la puissance en modifiant l'angle de la lame.
3. Boîte de vitesses : située entre le rotor et le générateur. Il accélère le taux de transmission de l'énergie mécanique vers le générateur.

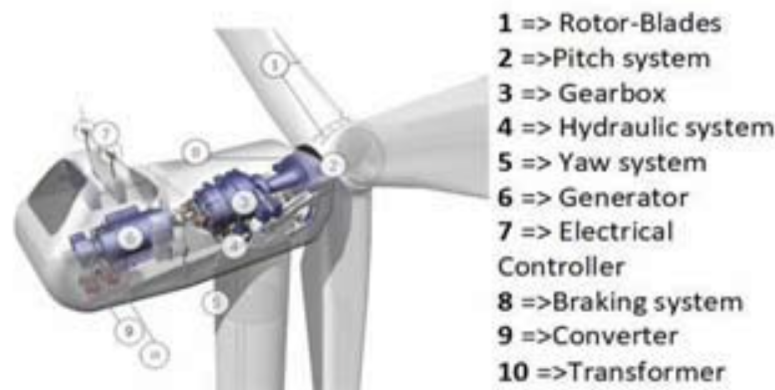


FIGURE 1.7 – Les composants d’une éolienne (Bezzaoucha et al. 2018).

4. Système hydraulique : il est utilisé pour ajuster l’angle d’inclinaison des pales dans le système de tangage, maximiser la production d’énergie éolienne dans le système de lacet et contrôler le frein mécanique pour assurer la sécurité de l’éolienne.
5. Système de lacet : composé de roulements, d’engrenages, de freins et d’un moteur. Son rôle est de contrôler la rotation de la tour pour régler la nacelle qui doit faire face correctement au vent.
6. Générateur : transforme l’énergie mécanique en énergie électrique.
7. Contrôle électrique : son rôle est de réguler le générateur.
8. Système de freinage : utilisé pour arrêter l’éolienne en cas de vent fort ou de défaillance d’un composant critique.
9. Le convertisseur : est capable d’ajuster la fréquence et la tension du générateur au réseau.
10. Transformateur : Il augmente la tension de l’électricité produite pour permettre son transport dans les petits fils électriques.

1.2.2 Répartition des coûts de l’éolienne

L’enregistrement de la fiabilité des éoliennes a commencé en Europe en 1985 (Schmid & Klein 1991), avec la croissance de l’industrie éolienne allemande et danoise, et aux États-Unis en 1987, suite à la croissance des parcs éoliens américains après 1973. Les travaux aux Pays-Bas dans les années 1990 (Van Bussel & Schöntag 1997), lorsque des parcs éoliens offshore ont été envisagés dans la mer du Nord au large de la côte néerlandaise, ont conduit à des préoccupations concernant de l’accès pour la maintenance des éoliennes mais aussi à la fiabilité et la nécessité de parvenir à un niveau élevé la disponibilité. Cela conduirait à un faible coût de l’énergie pour l’énergie éolienne afin de pouvoir rivaliser avec les combustibles fossiles à faible coût (Tavner 2012). La production d’énergie à partir des éoliennes onshore de plus grandes tailles > 1 MW basée sur le concept danois a maintenant atteint une disponibilité opérationnelle de plus de 98% et un temps moyen entre deux pannes à plus de 7000 heures, ce qui est un taux d’un peu plus de 1 défaillance / éolienne / an. (Une défaillance est un arrêt d’une durée de 24 heures ou plus) (Tavner 2012)

Couts d'installation

Les parcs éoliens offshore utilisent de grandes éoliennes dont le coût est actuellement estimé à environ 1,2 millions de £/ MW, par rapport à l'onshore qui est estimé à 0,65 million £/ MW. La structure d'une éolienne offshore est grande ; le pitch d'une éolienne de 3,5 MW est de 90 m au-dessus de la surface de la mer, le diamètre du rotor est de l'ordre de 100 m. Initialement, les structures sont généralement installées dans une profondeur d'eau relativement peu profonde, entre 5 et 20 m, et le poids de chaque structure est relativement faible, \approx 400 tonnes. Donc, contrairement aux structures pétrolières et gazières offshore typiques, la charge verticale appliquée à la fondation est relativement faible par rapport au vent et aux vagues. Par conséquent, une fondation offshore peut représenter jusqu'à 35% du coût d'installation. Les coûts augmentent à mesure que les parcs éoliens sont placés dans des eaux plus profondes (Tavner 2012).

Cependant, plutôt que de concevoir chaque éolienne à titre individuel, la conception d'une éolienne offshore peut être produite en masse pour une utilisation sur l'ensemble d'un parc éolien. Cela pourrait permettre aux coûts des éoliennes offshore d'être réduits progressivement avec le grand nombre de projets offshore comme celui du Royaume-Unis, du Danemark, de l'Allemagne et des Pays bas.

Couts de la maintenance

Les estimations des coûts de l'énergie éolienne offshore varient en fonction du site et du projet, mais la section précédente montre que les projets d'éoliennes offshore sont beaucoup plus coûteux que les onshore. Etant donné que le design des éoliennes devient adapté à des conditions en mer, la réalisation d'une solution économique favorable dépend de la capacité de contrôler le coût du cycle de vie du parc éolien. La figure 1.8 illustre la répartition des coûts pour un parc éolien offshore en eau peu profonde. Une grande partie des surcoûts actuels de l'éolienne offshore peut être attribuée aux fondations, au raccordement au réseau et à la maintenance. L'exploitation et la maintenance (Operation & Maintenance en anglais) des parcs éoliens offshore sont plus complexes que celles des onshore. Par conséquent, les coûts d'O&M pour certains parcs éoliens offshore européens varient de 18% à 23%, beaucoup plus que les coûts pour les parcs onshore qui sont de 12%. Les conditions des parcs offshore nécessitent des constructions et des opérations de mise en service plus onéreuses. L'accessibilité pour les entretiens routiniers est un problème majeur. Pendant l'hiver, tout un parc éolien peut être inaccessible pendant plusieurs jours en raison de mauvaises conditions météorologiques. Même avec des conditions météorologiques favorables, les tâches d'O & M sont plus coûteuses que sur terre à cause de la distance en mer, de l'exposition du site, la taille du parc, la stratégie de maintenance. Les conditions en mer nécessitent un équipement spécial pour installer et changer des pièces, et qui peuvent en plus, ne pas être disponibles rapidement. Par conséquent, des techniques de pointe sont nécessaires pour planifier la maintenance, à l'aide des données acquises par le Supervisory Control Data Acquisition « SCADA » et le Condition Monitoring Systems « CMS » montés sur l'éolienne. La surveillance à distance et l'inspection visuelle

deviennent beaucoup plus importantes afin de maintenir un bon niveau de disponibilité de l'éolienne (Tavner 2012).

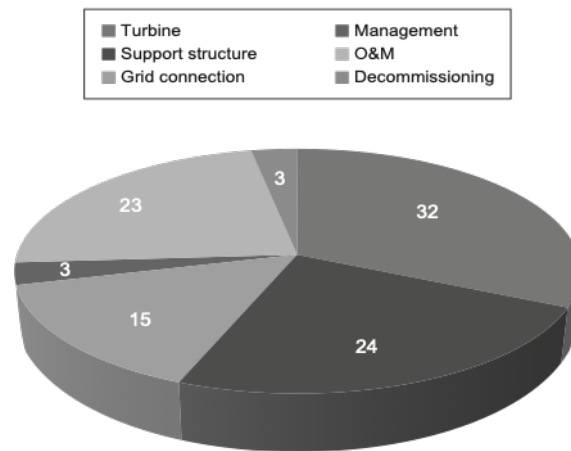


FIGURE 1.8 – Répartition des coûts pour un parc éolien offshore en eaux peu profonde (Tavner 2012).

1.2.3 La fiabilité des éoliennes

Les éoliennes sont des appareils robotiques et il est relativement rare que leurs arrêts puissent être classés comme une panne, à l'exception d'une défaillance de la boîte à vitesses, du générateur ou d'une pale, où la cause de la panne est alors évidente. Plus généralement, l'éolienne est arrêtée lorsque que son contrôleur détecte un dysfonctionnement. Cela est généralement le résultat d'un état de fonctionnement inacceptable, comme un dépassement de vitesse ou un problème de tangage. De ce fait, le contrôleur déconnecte l'éolienne de la grille, la met à l'arrêt et lance l'état d'urgence. La panne peut être résolue grâce à :

- Un redémarrage automatique ;
- Un redémarrage à distance déclenché manuellement ;
- Une visite du site par un technicien, qui peut simplement lancer un redémarrage local ;
- Une visite du site par un technicien déclenchant une opération de réparation, ce qui permet alors à l'éolienne de redémarrer.

La connaissance des taux de pannes dans l'éolienne pourrait permettre de comparer les performances de celles-ci et calibrer la contribution à apporter au manque de fiabilité de certaines pièces. De cette façon le rendement des futures éoliennes peut être amélioré par l'entretien.

1.2.4 Les causes de pannes des éoliennes

Au départ, les pratiques d'entretien de l'éolienne consistaient surtout à des entretiens réactifs, à savoir l'exploitation des éoliennes jusqu'à la panne (Wilkinson *et al.* 2006). Comme les éoliennes ont grandi en capacité, la maintenance préventive (PM) est devenue plus adoptée. De nombreux opérateurs pratiquent des inspections périodiques pour l'évaluation de l'état des éoliennes. Ces contrôles sont généralement coûteux et nécessitent des temps d'arrêt. Un autre inconvénient réside dans l'évaluation

de l'état faite seulement de manière périodique. Les conditions entre les vérifications restent inconnues. Avec l'aide de la surveillance de l'état à distance et des techniques de diagnostic de pannes, la maintenance prédictive (PdM) et la maintenance conditionnelle (CBM) sont devenues de plus en plus adoptées. La plupart des pièces dans les éoliennes peuvent tomber en panne pendant le fonctionnement, y compris les rotors, les pales, les systèmes de commande de tangage, les boîtes à vitesses, les roulements, les systèmes de lacet, les générateurs, les commandes électriques et les freins, entre autres (Hyers *et al.* 2006). Diverses études ont été menées afin de recueillir des données sur la fiabilité des éoliennes, y compris dans les parcs éoliens de l'Allemagne, du Danemark, de la Suède et de la Finlande. Les données sont présentées dans différents formats (par exemple : la distribution des pannes, la distribution des temps d'arrêt (%), les taux de pannes en 'pannes par éolienne par année', les temps d'arrêt en 'heures perdues par composant par éolienne par an') et viennent de différents lieux, différentes conditions météorologiques et différents types d'éoliennes (Pérez *et al.* 2013). Parmi ces études, le travail de (Tavner *et al.* 2006) a montré que le climat et l'emplacement sont des facteurs de fiabilité pour les éoliennes en raison de la vitesse du vent. Dans (Tavner *et al.* 2013), il a été démontré une corrélation croisée qui existe entre le taux de pannes et les conditions météorologiques, la température et l'humidité sont plus importantes que la vitesse du vent. En général, les pièces soumises à des frottements tombent plus souvent en panne dans le désert que dans les conditions onshore et offshore. Une combinaison de chaleur et de sécheresse rend les pièces en plastique de la transmission particulièrement sujettes aux pannes. En outre, la fissuration des pièces en métal est courante en raison de vibrations excessives constantes pendant le fonctionnement. Les appareils électroniques sont également fortement affectés par une chaleur excessive. Le climat chaud du désert endommagera probablement ces appareils électroniques de manière irréparable. Les filtres à huile nécessitent un entretien régulier dans le désert. L'air ambiant qui semble propre est en fait chargé de poussières fines. Le remplacement du filtre à huile de la boîte à vitesses et les vidanges doivent être plus fréquents que ce qui est recommandé pour les conditions européennes. De plus, les systèmes de lubrification et de refroidissement à l'huile sont moins efficaces et s'évaporent à cause des températures élevées générées pendant le fonctionnement de l'éolienne (Zgoul & El-Thalji 2011). La taxonomie de l'éolienne permet d'identifier avec précision la localisation de la panne dans une étude de fiabilité, mais d'un point de vue « fiabilité » il faut également comprendre la cause de la panne et le mécanisme qui les relie. La figure 1.9 montre la relation qui existe entre la cause de la panne et le mode de détérioration, tandis que la figure 1.10 permet de mieux comprendre en illustrant un exemple du lien entre la cause et le mode de défaillance d'un arbre principal d'une éolienne (Tavner 2012).

L'importance de cette relation est que nous pouvons généralement obtenir une bonne preuve de l'emplacement de la panne, à partir de laquelle nous pouvons déduire le mode de défaillance, mais pour l'entretien, il est beaucoup plus utile d'identifier la cause d'origine, qui peut être suivie par un technicien pour évaluer la progression de la panne. Ces informations sont d'une valeur inestimable pour planifier la maintenance et de réduire



FIGURE 1.9 – La relation entre la cause et le mécanisme de détérioration (Tavner 2012).

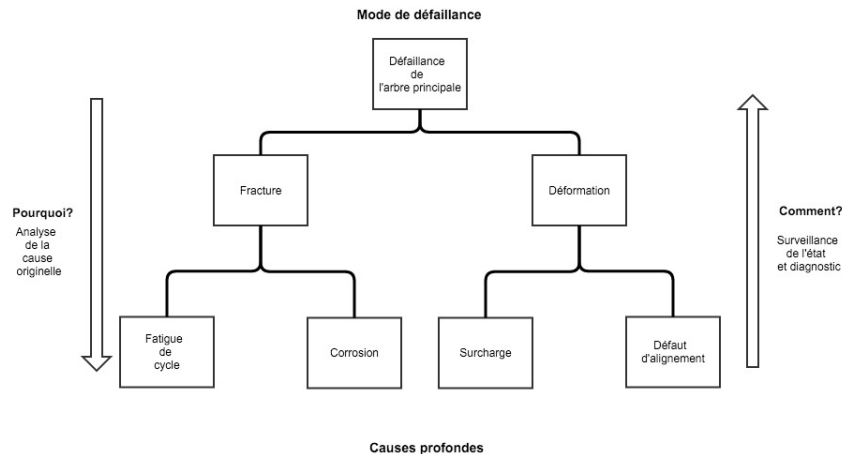


FIGURE 1.10 – La relation entre la cause et le mode de défaillance d'un arbre principal d'une éolienne (Tavner 2012).

les temps d'arrêt. La figure 1.10 montre que les données de surveillance sont des ingrédients clés pour ce processus de suivi.

Récemment des études ont été menées afin de modéliser la propagation des pannes dans une éolienne offshore (Bezzaoucha *et al.* 2020). Les auteurs ont proposé une classification des différents composants d'une éolienne en fonction de la cause de panne. Ils ont ainsi observé que la panne d'un composant pouvait être la cause d'une panne d'un autre composant, ce qui induit un phénomène de propagation de pannes.

1.2.5 Analyse des défaillances des éoliennes

(Pérez *et al.* 2013) font un état de l'art sur différentes études faites sur les défaillances des éoliennes. Plusieurs études ont été menées dans cet axe. Ainsi, dans le programme germanique (Dutch offshore wind energy converter program 'DOWEC'), (Van Bussel & Zaaijer 2001), (Van Bussel & Zaaijer 2003) un groupe d'experts a utilisé un ensemble de données sur les défaillances des éoliennes et a obtenu des estimations sur les taux de pannes des composants des éoliennes situées dans le nord de l'Allemagne. Les pales / pitch, le système de commande et la boîte de vitesses constituent la plupart des pannes, et le taux de pannes en onshore par an était de 2,20 en 2001. Également dans le contexte du programme « DOWEC » (Rademakers *et al.* 2003) il a été étudié la répartition du temps d'arrêt des composants des éoliennes, et il a été constaté que plus de 85% du temps d'arrêt total est dû aux pales, au générateur et à la boîte à vitesses. (Braam & Rademakers 2004) ont travaillé sur la fiabilité des

composants des éoliennes dans le projet européen CONMOW. Ils ont montré que les composants avec le taux de pannes le plus élevé étaient les systèmes électriques / de commandes / hydrauliques et les pales / pitch, le taux de pannes électriques étant plus élevé et celui de la boîte à vitesses moins élevé que ceux présentés par (Van Bussel & Zaaijer 2001), (Van Bussel & Zaaijer 2003). (Ribrant & Bertling 2007) ont analysé les pannes des éoliennes en Suède, en Finlande et en Allemagne. Les données pour la Suède ont été prises entre 2000 et 2004 à partir d'un nombre croissant d'éoliennes de 500-1500 kW (en moyenne 625 et représentant 95% de toutes les éoliennes) venant de plusieurs fabricants. Le nombre moyen de pannes par éolienne par année était de 0,402. Le système électrique, les capteurs et les pales/pitch représentent le plus grand taux de pannes. Les plus grandes et plus récentes éoliennes (>1 MW) avaient des taux plus élevés. Plus de 72 éoliennes en Finlande (environ 100% d'entre elles) ont été étudiées au cours de la même période. Le taux de pannes était de 1,38 par éolienne et par an, cela surtout dans le système hydraulique, les pales / pitch et les boîtes à vitesse. Les données des pannes étudiées en Allemagne ont été recueillies entre 2003 et 2005 à partir de 865 éoliennes, entre 4% et 7% du total. Ici le taux de pannes est de 2,38 par éolienne par an, principalement en raison des défauts dans l'électrique, le contrôle, les capteurs et les systèmes hydrauliques. Les pannes électriques, de contrôle, des systèmes hydrauliques, des capteurs et des pales étaient communes dans ces pays, ce qui représente plus de 65% du total. Les plus grands temps d'arrêt ont été causés par la boîte à vitesses (Suède et Finlande), suivi par le système de contrôle en Suède et les pales / pitch en Finlande. En Allemagne, les plus grands temps d'arrêt se sont produits par le générateur suivi de la boîte à vitesses. (McMillan & Ault 2008) ont démontré avec des données Windstats de l'Allemagne que la boîte à vitesses, le générateur, les rotors (pales, pitch et le moyeu) et les roulements principaux (drive train) représentent environ 67% des temps d'arrêt. Les taux moyens de panne des composants des éoliennes sont représentés en figure 1.11. Considérant le taux de panne cumulé de chaque composant, le système de contrôle a la valeur la plus élevée, suivi par les pales / pitch puis par le système électrique.

1.2.6 Méthodes pour améliorer la fiabilité

L'analyse de la fiabilité est nécessaire mais produit rarement des données qui vont au delà de 5 ans. Cependant, son grand avantage est que ces données soient numériques et comparables. Le taux de pannes peut être utilisé comme point de référence pour la conception des futures éoliennes. Par exemple, alors qu'un taux de pannes moyen de 1 panne par éolienne et par an peut être acceptable en onshore, ce n'est pas forcément le cas pour l'offshore où l'accès peut être limité à une visite par an. Les taux de pannes des différentes pièces de l'éolienne peuvent également être utilisés pour la comparaison entre les différents concepts et modèles. L'analyse de l'amélioration de la fiabilité pourra être utile pour les fabricants d'éoliennes et de pièces détachées pour définir où le design et les tests d'effort doivent être déployés pour améliorer la fiabilité future. L'entreprise Enercon a par exemple pris la décision d'enlever la boîte à vitesses et d'utiliser

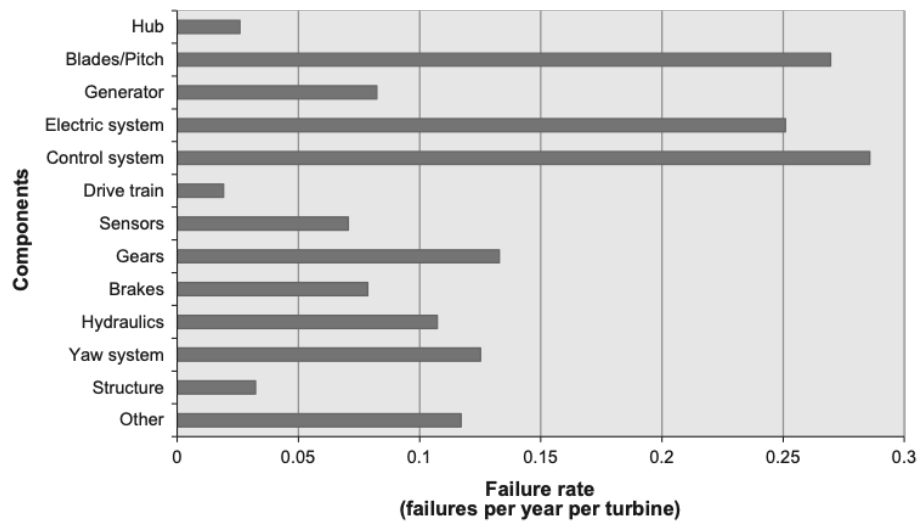


FIGURE 1.11 – Les taux moyens de pannes des composants des éoliennes (Pérez *et al.* 2013).

une configuration direct-drive pour améliorer la fiabilité. Elle a également adopté une approche tout en électrique pour éviter l'utilisation de l'hydraulique pour le tangage ou le contrôle de lacet (Spinato *et al.* 2009). Le test des pièces détachées, en particulier les convertisseurs et générateurs, peut également permettre d'obtenir une meilleure fiabilité des éoliennes au début de fonctionnement en éliminant les défaillances précoces. Les mesures de surveillance des performances indiquent la nécessité de mesures correctives lorsque le fonctionnement se détériore. L'industrie éolienne a connu un grand succès avec l'utilisation des systèmes SCADA. La plupart des parcs éoliens ont maintenant un système SCADA fournissant des données aux salles de contrôle à distance (figure 1.12). Toutefois, il n'y a pas encore d'accord sur les conditions de suivi des grandes quantités de données générées pour indiquer les défaillances naissantes. Les méthodes d'O&M ont besoin d'utiliser ces informations pour prévoir les pannes leurs entretien. Beaucoup de travaux se font actuellement dans ce domaine (Caselitz & Giebhardt 2005), (Yang *et al.* 2009).

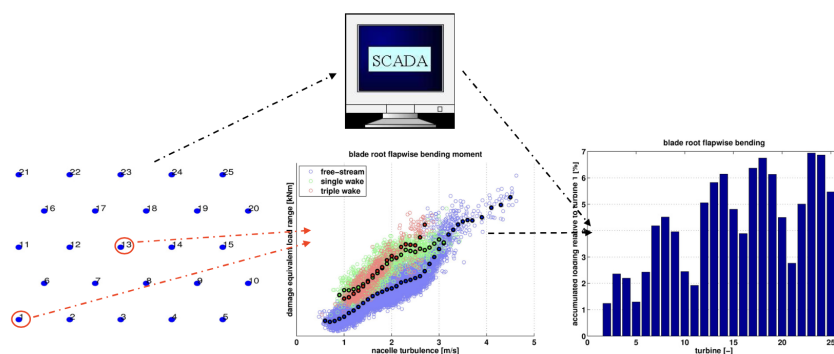


FIGURE 1.12 – Structure générale du modèle informatique pour un parc éolien (Rademakers *et al.* 2009)

1.3 LA MAINTENANCE DES ÉOLIENNES

Le bon fonctionnement de la société moderne dépend du bon fonctionnement de nombreux systèmes complexes composés de plusieurs équipements qui offrent une variété de produits et services. Tous les équipements ne sont pas fiables dans le sens où ils se dégradent avec l'âge et tombent en panne lorsqu'ils ne sont plus capables de faire leur travail. Quand un système complexe tombe en panne, les conséquences peuvent être lourdes.

Grâce à une maintenance corrective appropriée, on peut restaurer un système défaillant à son état de fonctionnement par des actions telles que la réparation ou le remplacement des composants qui sont en panne et qui ont provoqués la défaillance du système. Les défaillances peuvent être contrôlées à travers des actions de maintenance, dont la maintenance préventive, l'inspection et la surveillance d'état. Avec une bonne conception et des mesures efficaces de maintenance préventive, la probabilité de défaillances avec leurs conséquences peuvent être réduites, mais les pannes ne peuvent jamais être totalement éliminées (Kobbacy & Murthy 2008).

L'approche de la maintenance a considérablement changé au cours des cent dernières années. Il y a plus de cent ans, l'accent était principalement mis sur la maintenance corrective déléguée à la section de maintenance de l'entreprise afin de restaurer les systèmes défaillants pour les remettre dans un état opérationnel. La maintenance était effectuée par des techniciens formés et était considérée comme un problème opérationnel ne jouant pas de rôle dans la conception du système. L'importance de la maintenance préventive n'a été pleinement considérée qu'au cours de la seconde Guerre mondiale. La maintenance préventive implique des coûts supplémentaires et n'est intéressante que si les bénéfices dépassent les coûts. Décider du niveau optimal de la maintenance nécessite la construction de modèles appropriés et l'utilisation de techniques d'optimisation sophistiquées. En outre, à cette époque, les problèmes de maintenance ont commencé à être traités à l'étape de conception, ce qui a conduit au concept de maintenabilité. La fiabilité et la maintenabilité sont devenues des enjeux majeurs dans la conception des systèmes (Kobbacy & Murthy 2008).

Ces dernières années, l'industrie de l'éolienne a pris conscience de l'importance que pouvait avoir la maintenance sur la viabilité des projets actuels et futurs. Pour une durée de vie de 20 ans, les coûts de l'exploitation et de maintenance d'une éolienne de 750 KW représentent environ 25 à 30 % du coût totale de production d'énergie (Milborrow 2006) et 75 à 90 % des coûts d'investissement (Vachon 2002). De plus, des projections faites en 2002, ont démontré que les coûts d'exploitation et de maintenance d'une éolienne de 2 MW (celles de 2.5 et 3 MW sont devenues les plus répandues dans l'industrie de l'éolienne) peuvent être inférieurs de 12 % à ceux d'une éolienne de 750 KW (Walford 2006). Les nouveaux parcs éoliens ont généralement une plus grande capacité et comprennent plus d'éoliennes. Les données recueillies par (Tavner *et al.* 2008) suggèrent que les grandes éoliennes tombent plus souvent en panne et nécessitent donc plus d'entretien. Réduire les coûts de la maintenance est ainsi devenu de plus en plus important surtout avec le fait que la taille et le nombre des éoliennes ne cesse de grandir.

1.3.1 Les stratégies de maintenance

Les méthodes de maintenance peuvent être classées comme le montre la figure 1.13. La stratégie de maintenance pour l'éolienne offshore est en pleine évolution. Pour l'éolienne onshore, la stratégie est dominée par la maintenance préventive, y compris la maintenance planifiée prévue par les instructions du manuel de maintenance de l'équipementier. Celle-ci peut être affectée par la maintenance non planifiée en raison d'arrêts imprévus (Tavner 2012).

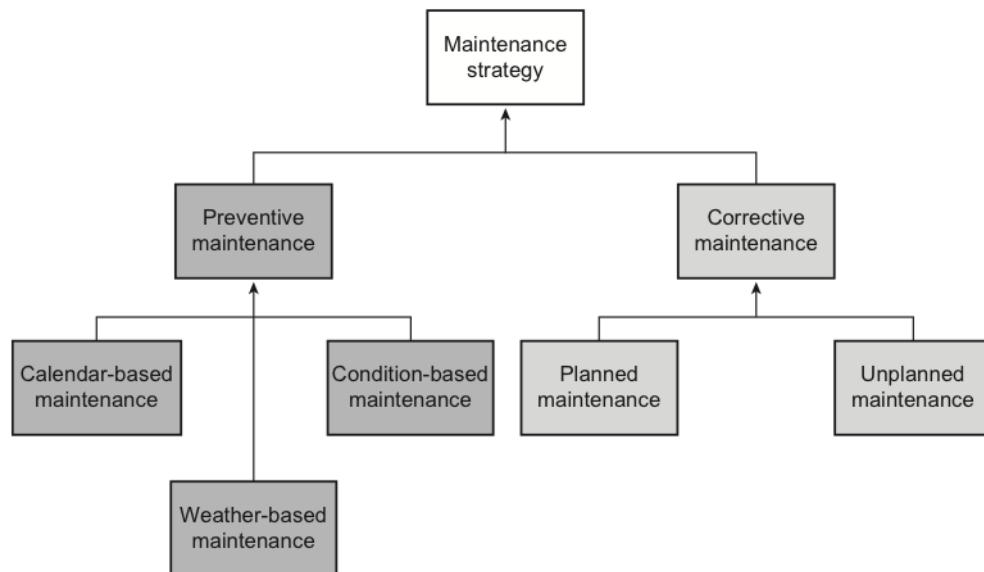


FIGURE 1.13 – Aperçu des différents types de maintenances (Wiggelinkhuizen et al. 2008).

Les stratégies de maintenance de l'industrie de l'offshore sont principalement basées sur les stratégies connues dans le onshore. Cependant, elles ont été adoptées pour répondre aux exigences difficiles dans le domaine de l'offshore (Tracht et al. 2013).

Pour réduire les temps d'arrêt non planifiés, les opérations de maintenance sont effectuées soit à titre préventif sur la base de l'état du système, ou à titre correctif. En cas de défaillances imprévues, des actions de maintenance correctives doivent être menées. Contrairement aux actions de maintenance dans l'offshore, qui ont lieu tous les six mois, les opérateurs de maintenance essaient de réduire le nombre d'inspections dans le domaine des éoliennes offshore. Par conséquent, les activités de maintenance préventive sont réduites à une par an. Cela est dû à des coûts de transport plus élevés et une accessibilité réduite aux éoliennes à cause des conditions climatiques (Goch et al. 2012). Les tâches de maintenance préventive sont effectuées en rapport à un plan de maintenance défini par le producteur de l'éolienne. Un plan de maintenance préventive comprend des activités comme un changement d'huile, des inspections visuelles des éléments clé au sein de la chaîne de traction, les contrôles fonctionnels de la grue, le système de protection contre la foudre, ainsi que l'inspection des pales de rotor. En plus de cela, les éoliennes offshore doivent être vérifiées en détail dans des intervalles réguliers (tous les quatre ans)

(Bellmer 2007). L'accessibilité restreinte aux éoliennes offshore peut rendre difficile les processus de maintenance et prolonger les temps d'arrêt. Par conséquent, les opérateurs tentent généralement d'éviter les processus de maintenance corrective et tentent de raccourcir le temps moyen de réparation par le biais d'activités de maintenance préventive planifiée.

1.3.2 Les pièces de rechange pour la maintenance

L'exploitation des pièces de rechange est généralement sous la responsabilité de l'équipementier, mais avec les tailles grandissantes de parcs éoliens, l'importance d'avoir des pièces de rechange disponibles pour un changement rapide est devenu une question importante surtout dans l'offshore où la fenêtre pour la réparation, en raison de la météo, de la logistique et d'autres contraintes opérationnelles, peut être courte.

Alors que les approches sur la planification des pièces de rechange, basées sur l'inventaire ou les coûts d'engagement sont bien connues, les algorithmes qui tiennent compte des processus de maintenance ne sont pas très répandus. Liao et Wang par exemple, ont étudié les processus de maintenance pour les machines-outils, cela leur a permis d'améliorer la précision de prédiction, avec comme résultat, la réduction des stocks (Liao & Rausch 2010; Wang & Syntetos 2011).

Les pièces de rechange peuvent être divisées en deux catégories. Les pièces de rechange «principales» avec de longs temps de fabrication, avec une exploitation qui se rapporte à la stratégie de gestion de la maintenance, et les pièces de rechange «consommables» dont la demande est fréquente et prévisible, pour lesquelles l'exploitation peut être contrôlée comme un stock (Tavner 2012). Ces pièces de rechange peuvent être répertoriées comme suit :

1. Les pièces principales :
 - Les pales
 - La boîte à vitesses
 - Le generateur
 - Le groupe hydraulique
 - Le modules convertisseur de l'onduleur
 - Les mécanismes moteurs du pitch
 - Les mécanismes moteurs du lacet
2. Les pièces consommables :
 - Les lampes, boutons et relais de contrôle
 - Les moteurs de pompe
 - Les filtres
 - Les paquets de graissage
 - Les huiles de lubrification

1.3.3 Les restrictions de la maintenance

La planification et l'ordonnancement des activités de maintenance, telles que le changement des composants principaux; les boîtes à vitesses et les pales des rotors, peuvent être considérés comme l'une des tâches les plus difficiles dans la maintenance des éoliennes offshore. Les principaux

défis apparaissent à la suite de différentes incertitudes liées à la nécessité de l'activité de maintenance déterminée par la probabilité de défaillance avec ses conséquences potentielles. La faisabilité de l'activité de maintenance dépend de différents facteurs restrictifs comme les conditions météorologiques et l'accès aux ressources de maintenance nécessaires. Les conditions météorologiques qui influent sur les activités de maintenance sont l'état de la mer, en particulier la hauteur significative des vagues et les vents. Le transport des petites pièces peut se faire en hélicoptère et n'est donc pas influencé par la hauteur des vagues, mais par de mauvaises conditions de visibilité. Les gros composants (les boîtes à vitesse, les pales), quant à eux, sont transportés par des navires et nécessitent des grues pour être remplacés. L'état de la mer et les vents pourrait donc interdire toute activité de maintenance (Tracht *et al.* 2013).

1.3.4 Les méthodes de maintenance

Une maintenance est requise pour presque tous les types de machines et cela vaut également pour les systèmes de l'énergie éolienne. Les types de maintenance qui sont effectués peuvent être programmés à l'avance comme pour la maintenance préventive, ou ils peuvent être correctifs. La maintenance préventive est effectuée à des intervalles prédéterminés ou en fonction de critères fixés à l'avance. Elle a pour but de réduire la probabilité d'une défaillance. La maintenance corrective est effectuée après une défaillance et vise à réparer le système. En d'autres termes, la maintenance préventive est effectuée avant une panne et la corrective est effectuée après que la panne se soit produite. Par conséquent, le défi de la planification de la maintenance est de décider à quel moment on doit effectuer la maintenance préventive (Ribrant 2006).

La maintenance corrective

La maintenance corrective est définie comme «Une maintenance effectuée après la détection d'une défaillance et vise à mettre un élément dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise» (Ribrant 2006). Ce type de maintenance est souvent appelée «Réparation» et est effectué après la défaillance d'un composant. Le but de la maintenance corrective est de restaurer le composant à un état de fonctionnement aussi vite que possible, soit par la réparation ou par le remplacement du composant défectueux (Gertsbakh 2013).

Utiliser uniquement la maintenance corrective est rarement une bonne solution. Cela signifie que le système va être exploité jusqu'à ce qu'une panne se produise. Dans la littérature, cela est défini comme une stratégie de répartition. Avec une stratégie de répartition, la maintenance préventive est réduite au minimum, et le système sera exploité jusqu'à ce qu'une défaillance majeure d'un composant se produise, ce qui se traduira par un arrêt de l'éolienne. Cette stratégie est risquée, car la panne des composants relativement petits, peut conduire à de graves dommages. Un autre aspect de cette stratégie est que ces défaillances de composants sont susceptibles d'être associées à la condition de charge réelle de l'éolienne. Cela peut se produire aussi dans des conditions de charge élevée. Cela signifie que

l'arrêt de la turbine est lié à des périodes de vent fort. Le temps d'arrêt dans ces périodes peut conduire à une plus grande perte de production. Si c'est une éolienne offshore, l'accessibilité est susceptible d'être mauvaise pendant les périodes de grand vent (Giebhardt *et al.* 2004).

Un autre inconvénient de cette stratégie est que, lorsque la réparation est nécessaire, le temps d'arrêt peut être étendu à cause du fait que la logistique devient plus compliquée et que les délais de livraison des pièces de rechange peuvent être plus longs (Rao 1996). La stratégie de réparation minimise les coûts de maintenance à court terme mais implique une ignorance sur la survenue des défaillances et des coûts de remplacement. A long terme, lorsqu'une défaillance survient, la maintenance corrective devient indispensable et implique des coûts importants. En effet, cela demande le déploiement de grands moyens (appel à des sous-traitants, des bateaux de moyennes tailles, des grandes grues, etc) et des délais allant de 2 à 5 jours d'intervention.

La maintenance préventive

La maintenance préventive est définie comme «une maintenance effectuée à des intervalles prédéterminés ou en fonction de critères fixes et est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation du fonctionnement d'un élément»(Ribrant 2006). Elle est effectuée régulièrement afin de reporter les défaillances ou pour les empêcher de se produire. Il existe deux types de maintenances préventives ; la maintenance préventive systémique et la maintenance préventive conditionnelle. Ce qui diffère entre les deux, c'est le moyen de décider quand effectuer la maintenance préventive.

1. La maintenance préventive systémique

La maintenance préventive systémique est définie comme «une maintenance préventive effectuée conformément à un calendrier établi ou un nombre d'unités d'utilisation établi»(Ribrant 2006). La planification de la maintenance systémique peut être soit basé sur l'âge de l'éolienne ou sur sa durée de son fonctionnement. Quand elle est basée sur la durée de fonctionnement, la maintenance systémique s'effectue conformément à un calendrier établi. Quant elle est basée sur l'âge, cela implique une maintenance lorsque les composants atteignent un certain âge.

La maintenance préventive doit être effectuée à intervalles réguliers et être conçue pour réduire la probabilité de défaillances. La durée des cycles de maintenance est adaptée aux exigences du système. Le système est donc inspecté et entretenu régulièrement. Les composants qui montrent en premier des signes d'usure doivent être entretenus et remplacés. Ce type de stratégie d'entretien signifie que les composants exposés à l'usure seront remplacés régulièrement, même s'ils ne sont pas à la fin de leur durée de vie (Rausand & Høyland 2004).

La maintenance systémique nécessite un accès régulier au système. Une grande part des coûts de maintenance réside dans le transport des grues et le personnel de maintenance. Le transport du personnel et des pièces de rechange pour le parc éolien peut également être très

coûteux. L'avantage de la maintenance préventive est qu'elle peut être prévue à l'avance et donc permettre une bonne coordination de la logistique (Giebhardt *et al.* 2004).

2. La maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est définie comme «une maintenance préventive basée sur la surveillance des performances et / ou paramètres et les mesures prises par la suite. La surveillance des performances et des paramètres peut être programmée sur demande ou en continu»(Ribrant 2006). Avec ce type de maintenance préventive, l'équipement de surveillance recueille des données de l'éolienne. La surveillance de l'état peut être prévue, sur demande ou en continu. Les données recueillies peuvent indiquer la maintenance nécessaire et prédire les pannes. La maintenance est initiée lorsqu'une variable de condition se rapproche d'une valeur limite ou la dépasse. Les composants du système seront exploités jusqu'à une condition d'usure définie. Lorsque cette condition est atteinte, les composants auront besoin de maintenance ou devront être remplacés.

La capacité de surveiller l'état des composants facilite la planification de la maintenance et minimise les temps d'arrêt et les coûts de réparation. Les composants seront utilisés jusqu'à la limite de leur durée de vie et la coordination des pièces de rechange sera plus facile. Un autre avantage de la mise en oeuvre d'un système basé sur la condition est que les données statistiques telles que la moyenne du temps d'arrêt peut être disponible. Les données statistiques du système de surveillance sont importantes et permettent d'obtenir des données fiables sur la durée de vie restante des différents composants. La figure 1.14 montre une comparaison entre la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance préventive systématique et la maintenance corrective (Rao 1996).

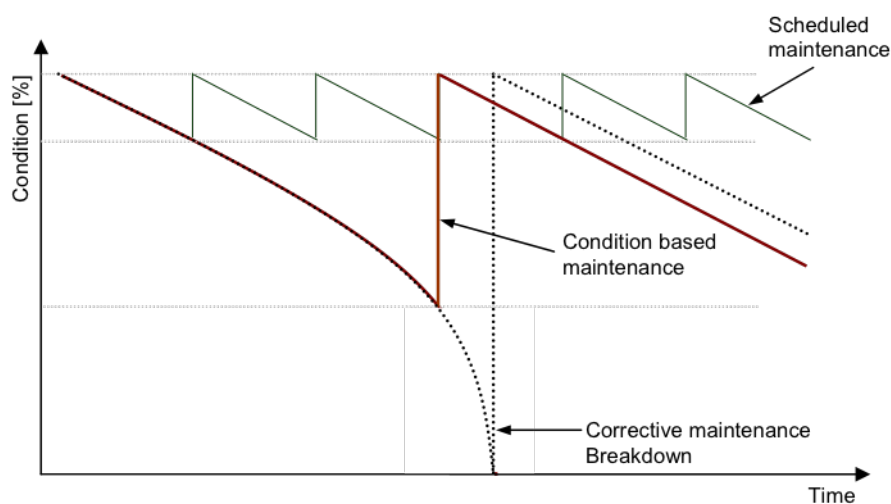


FIGURE 1.14 – comparaison entre la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance préventive systématique et la maintenance corrective (Ribrant 2006).

1.3.5 Comparaison entre les types de maintenances

La figure 1.14 montre un exemple graphique des scénarios de maintenance possibles. La comparaison montre que la maintenance systémique est plus souvent utilisée que la maintenance conditionnelle. La figure montre également que la durée de vie des composants n'est pas pleinement utilisée dans la maintenance systémique comparée à la maintenance corrective ou la maintenance conditionnelle. Le tableau 1.1 montre les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de maintenance des éoliennes.

Les types de maintenance	Les avantages	Les inconvénient
La maintenance corrective	<ul style="list-style-type: none"> • Faible coûts de maintenance pendant le fonctionnement. • L'utilisation des composant pendant une durée de vie maximum. 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque élevé de dommages consécutifs engendrant de grands temps d'arrêts. • Pas de planification de maintenance possible. • Les logistiques des pièces détachées sont compliqués. • De long délais pour la livraison des pièces de rechange.
La maintenance systémique	<ul style="list-style-type: none"> • Les temps d'arrêts sont faible. • L'entretien peut être planifié. • La logistique pour le changement de pièces est facile. 	<ul style="list-style-type: none"> • Les composants ne seront pas utilisés pour la durée de vie maximale. • Les coûts d'entretien sont plus élevés par rapport à la maintenance corrective.
La maintenance conditionnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Les composants sont utilisés jusqu'au maximum de leurs durées de vie. • Les temps d'arrêt sont faible. • Les activités de maintenance peuvent être planifiées. • La logistique pour les pièce détachée est facile grâce à la détection précoce des pannes. 	<p>Des informations fiables sur la durée de vie restante des composants est nécessaire.</p> <p>De gros efforts pour la surveillance de l'état du matériel et logiciel est nécessaire.</p> <p>Ce n'est pas encore un marché mature pour les systèmes de contrôle dans l'énergie éolienne.</p> <p>L'identification des valeurs des seuils appropriés est difficile.</p>

TABLE 1.1 – Comparaison entre les différents types de maintenance (Rao 1996), (Giebhardt et al. 2004).

1.4 GESTION DE LA MAINTENANCE DES PARCS ÉOLIENS

Les parcs éoliens sont composés de grandes éoliennes complexes, nécessitant un haut niveau de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité. Actuellement, les coûts d'exploitation et d'entretien constituent une partie

importante du coût global du cycle de vie d'un projet éolien en particulier pour un parc offshore. En effet, des études ont montré que la disponibilité des parcs éoliens onshore se situe généralement entre 95% et 99%, alors qu'elle est estimée être de l'ordre de 60% et 70% pour les parcs éoliens offshore (Shafiee 2015b). La gestion de la maintenance des parcs éoliens joue un rôle important pour permettre aux exploitants de réduire les coûts de maintenance et de rendre l'énergie éolienne offshore compétitive face à l'onshore et aux autres énergies en général. Afin d'avoir une bonne stratégie de gestion de la maintenance, il est nécessaire pour les exploitants de parcs éoliens d'identifier et de prendre en considération un nombre important de paramètres relatifs au bon fonctionnement du parc. Ces paramètres influent directement sur les coûts de maintenances ainsi que la disponibilité et fiabilité des éoliennes. Pour ces raisons, la gestion de la maintenance dans les parcs éoliens est devenue depuis quelques années un axe de recherche très important.

1.4.1 Conception des installations éoliennes offshore

Si les premiers prototypes d'éoliennes offshore étaient de simples copies des éoliennes terrestres, les machines se sont peu à peu adaptées à la mer. Les premiers projets éoliens offshore ont consisté à installer des éoliennes en eaux peu ou moyennement profondes, de 5 à 40 mètres de profondeur (connaissancedesenergies 2017). Depuis, la taille et la puissance des éoliennes offshore ont constamment évolué (figure 1.15). En 2018, la capacité moyenne des éoliennes offshore nouvellement installées été de 6,8MW (Walsh *et al.* 2019). Cette tendance haussière ne va pas s'arrêter là, ainsi, Le groupe General Electric a lancé en octobre 2019 les phases de tests d'un nouveau modèle d'éolienne offshore "Haliade-X" d'une puissance de 12MW (Winters & Saunders 2018).

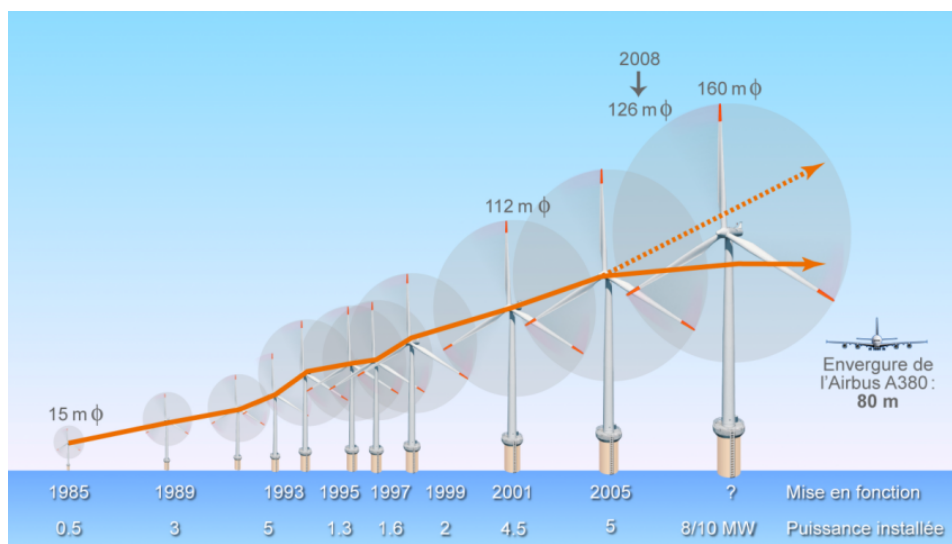


FIGURE 1.15 – Évolution de la taille et puissance des éoliennes offshore (connaissancedesenergies 2017)

L'évolution rapide de l'éolienne offshore a conduit à la nécessité de recherche de modèles de gestion intégrale pour la conception des instal-

lations éoliennes offshore. L'objectif est d'atteindre la viabilité technique, économique et environnementale, le tout dans un cadre de développement durable. De plus, la conception de pareil projet demande une compréhension accrue des phénomènes météo, de vents ainsi qu'en ingénierie marine. Compétences difficilement retrouvées chez une même personne.

La conception d'un parc éolien offshore (c'est-à-dire l'emplacement ou la disposition géographique, l'emplacement des installations par rapport à la direction du vent et des vagues) est un élément important qui peut fortement influencer les décisions logistiques de maintenance. Le placement fait référence à la position dans laquelle se trouve le parc éolien (par exemple, la distance du rivage, la profondeur de l'eau) et la disposition se réfère à la disposition des éoliennes dans un parc éolien (par exemple la forme de l'agencement, la distance entre les éoliennes). Dans un parc éolien offshore, les éoliennes sont souvent disposées ensemble sous la forme d'une ligne droite, d'un rectangle, d'un carré ou d'un cercle. En général, on s'attend à ce que les dépenses logistiques deviennent plus importantes lorsque les éoliennes sont installées dans des eaux ultra-profondes à de longues distances du rivage et entourées d'un environnement marin difficile. Par conséquent, une conception fiable et robuste des parcs éoliens offshore est cruciale pour éviter des maintenances coûteuse et réduire les pertes de production.

Une bonne conception des installations d'un parc éolien offshore permet dans un premier temps de bien positionner le parc afin de profiter au maximum des vents de la région et donc de produire un maximum d'énergie exploitant ainsi les éoliennes au mieux. Par la suite, une bonne conception permettra d'avoir plus de facilité pour la maintenance des éoliennes durant l'exploitation du parc. Dans ce cadre, nous trouvons de nombreuses recherches sur différents aspects de la conception. Parmi ces travaux nous pouvons citer (Esteban *et al.* 2009) qui élabore un modèle générale pour la conception de parcs éoliens. (González *et al.* 2013) quant à lui propose une conception de l'infrastructure électrique qui permet une optimisation du coût. (Giebel & Hasager 2016) identifie les facteurs qui doivent entrer en considération lors de la conception d'un parc éolien. (Marmidis *et al.* 2008) ont utilisé une simulation Monte Carlo pour optimiser le placement et l'agencement des éoliennes selon deux critères étant une production d'énergie maximale et des coûts d'installation minimaux. (Feng & Shen 2017) étudient la conception de parc éoliens offshore avec des éoliennes de puissance et de marque différentes. (Nandigam & Dhali 2008) propose une approche pour l'optimisation de la configuration et le positionnement des éoliennes dans un parc éoliens.

La conception des installations d'un parc éolien s'avère être aussi importante que la conception de l'éolienne elle même. Les travaux présentés ne représentent qu'une partie infime de tous les aspects qui sont étudiés pour la conception des installations offshore. Chaque détail a son importance lors de la conception et peut avoir un impact sur le long terme y compris sur la maintenance des éoliennes.

La conception des futurs parcs éoliens algériens doit être bien pensée pour prendre en compte tous les aspects liés à l'installation et à la maintenance des parcs. Dans le cas algérien, où le plus grand potentiel éolien se situe dans le désert, il est nécessaire de prévoir les routes qui permettront

le routage des grandes parties des éoliennes lors de l'installation ainsi que le réseau électrique qui les reliera. En raison de la pollution visuelle que peut représenter l'installation de grandes éoliennes, il est nécessaire de s'éloigner des habitations. Les éoliennes doivent également être conçues pour résister aux conditions météorologiques du désert en tenant compte des températures élevées et des vents de sable. Nous pouvons nous appuyer sur l'expérience acquise dans les éoliennes offshore pour la conception d'éoliennes et de parcs éoliens dans le désert.

1.4.2 Ressources humaines

Depuis près d'une décennie de nombreux rapports prospectifs ont cherché à mesurer l'impact de la filière de l'éolien offshore sur l'emploi et les besoins en compétences et en formations. Même si les métiers de l'éolienne sont considérés par certains comme des métiers nouveaux, les acteurs de l'industrie éolienne s'accordent à dire que ces métiers existent déjà. Cependant, ils ajoutent que, pour autant, ces métiers devront s'ajouter dans bien des cas des compétences additionnelles (Podevin 2017). La figure 1.16 donnent un aperçu du nombre de métiers qui peuvent constituer le paysage de l'éolienne offshore.



FIGURE 1.16 – Principaux métiers sur la chaîne de valeur de l'éolien offshore.(Podevin 2017)

Nous allons nous concentrer sur les métiers qui nous intéressent le plus dans le cadre de ce travail qui sont ceux de l'exploitation et la maintenance des parcs. Les techniciens et ingénieurs de maintenance sont les métiers les plus connus de l'industrie de l'éolienne offshore même s'il ne représentent qu'un petit pourcentage du total des emplois du secteur. La partie la plus importante de leur travail est d'accomplir les différentes maintenances nécessaires au bon fonctionnement des éoliennes (maintenances citées dans la section précédente). Ce qui signifie intervenir péri-

diquement sur les machines pour les nettoyer, les graisser, vérifier l'état des composants, remplacer les filtres et les petites pièces d'usure, de façon à ce qu'elles tournent correctement. Lors d'une panne, il doit en trouver l'origine et résoudre le problème dans les meilleurs délais : remplacement des éléments défectueux, essais et remise en service. Pour des questions de sécurité (tension électrique, hauteur), les techniciens de maintenance éolien exerce généralement en équipe. Les interventions se font à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Les éoliennes fonctionnant en permanence, les techniciens et ingénieurs peuvent être d'astreinte, et donc mobilisé d'urgence, de jour comme de nuit. Une bonne résistance est de mise : pluie, neige, froid, quelles que soient les conditions climatiques, une panne n'attend pas. Le transfert du bateau vers l'éolienne ou le poste électrique en mer étant une opération de précision, la maîtrise de la houle et, de manière plus générale, la sécurité en mer sont des éléments clés. Comme sur terre, la sécurité est capitale, l'exercice en milieu marin ne faisant qu'accroître les risques. Les compétences nécessaires pour la maintenances des éoliennes offshore font que ce métier est de plus en plus recherché et ce genre de compétences ont évidemment un coût. Un coût qui sera automatiquement répercuté sur les coûts de maintenances.

Malheureusement, ce type de compétences est quasiment inexistant en Algérie. Il est donc essentiel de lancer des formations centrées sur les métiers de l'éolien afin de doter le pays de techniciens et d'ingénieurs capables de gérer et d'entretenir les futurs parcs éoliens. Malgré la disponibilité de plusieurs formations universitaires, le manque de pratique rend ces formations plus concernées par l'aspect théorique que par l'aspect pratique. Un aspect plus pratique qui concernerait directement les énergies renouvelables devrait être envisagé afin d'améliorer les compétences des Algériens pour la conception, la maintenance d'éoliennes et le design de parcs éoliens.

1.4.3 Ressources matérielles

La maintenance des éoliennes offshore nécessite des ressources matérielles spécifiques adaptées aux différentes conditions de la maintenance en mer. Avec le développement de l'éolienne offshore, nous avons vu émerger de nouveaux équipements dédiés aux besoins de cette nouvelles industrie. Les bateaux et les grues sont les ressources matérielles qui nous intéressent le plus dans le cadre de la maintenance des éoliennes. Ainsi, à mesure que le secteur de l'éolienne offshore a évolué, les besoins en terme de matériaux sont devenus plus clairs pour les acteurs de l'industrie navale. Cela leur a permis de s'adapter pour offrir des navires qui répondent au mieux aux besoins de la maintenance des éoliennes offshore. Le choix du type et de la composition des navires a un grand impact sur les coûts de la maintenance des éoliennes offshore (Halvorsen-Weare *et al.* 2013). Cet aspect a conduit les producteurs d'éoliennes offshore à s'intéresser aux navires pour la maintenance, et les a amener à participer à la conception de navire conçu pour la maintenance d'éolienne offshore. Siemens a ainsi été en 2015 le premier groupe à commander ce nouveau type de navires destinés spécialement à l'exploitation et la maintenance des parcs équipés d'éoliennes de leur marque (Siemens 2015). La figure 1.17 montre le na-

vire en question "Ulstein SX175". Navire qui a été conçu par l'armateur Bernhard Schulte en étroite collaboration avec Siemens.

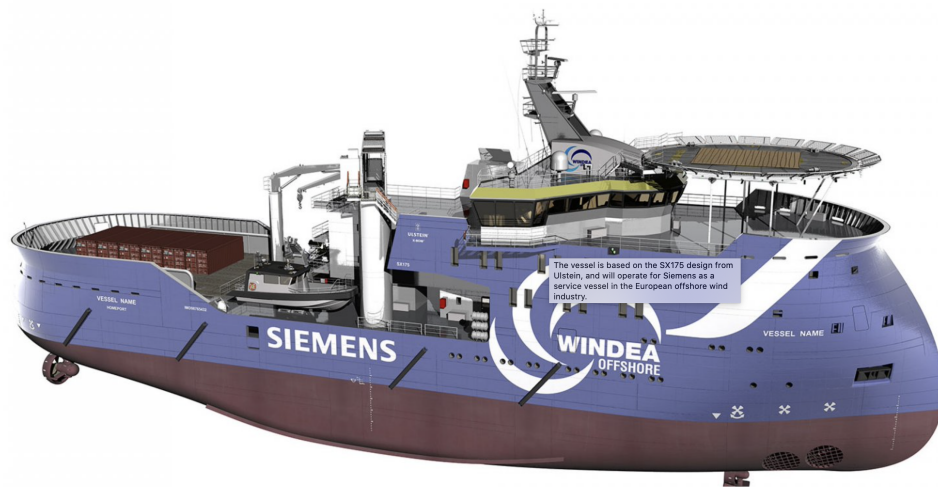


FIGURE 1.17 – Navire de maintenance d'éolienne offshore "Ulstein SX175" (Ulstein 2015).

Les maintenances préventives et correctives font appel à différentes activités ; le transport du personnel de maintenance, l'acheminement d'équipements et de pièces de rechanges et les activités de levage. Chaque activités nécessite un type particulier de navire. Parmi ces navires nous pouvons retrouver les navires de transfert d'équipage, les navires de ravitaillement et les grues. Les différents types de navires peuvent être achetés ou affrétés pendant la période de planification du projet. Chaque type de navire a une vitesse donnée, une capacité de chargement de pièces de rechange et une capacité de transport de personnel d'entretien. Les conditions météorologiques limitent les intervalles de temps pendant lesquels un type de navire peut fonctionner, et les caractéristiques des navires définissent les cas où les conditions météorologiques sont si difficiles que le navire doit retourner au port (Halvorsen-Weare *et al.* 2013).

1.4.4 Organisation de la chaîne logistique

Les transporteurs maritimes sont confrontés depuis quelques années à de plus en plus d'exigences de la part des clients. Dans un contexte aussi concurrentiel, il est devenu indispensable de livrer à temps quelque soit les conditions. De plus, les transporteurs doivent faire face à la hausse des prix du carburant et de la main d'oeuvre qualifié, cela réduit les marges bénéficiaires.

Au vue de l'importance que représente la gestion de la logistique en mer, plusieurs recherches ont été menées dans ce contexte afin de proposer des solutions plus économiques et plus adaptées à la complexité de cette tâche. Ainsi, (Ziebuhr & Kopfer 2017) proposent de considérer différents types de demandes qui ne peuvent pas être sous-traitées pour des raisons contractuelles (ce qui est souvent fait par les petits transitaires) en fonction des ressources externes applicables pour répondre à ces demandes. Une

heuristique basée sur la génération de colonnes est appliquée. Elle utilise une procédure de composition stricte et une procédure de génération stricte pour traiter les demandes obligatoires. (Bäumler & Kotzab 2017) présentent un état de l'art des systèmes de transport intelligents (STI) pour le transport de marchandises, et un aperçu des applications télématiques pour les routes de transport de marchandises. En outre, une analyse sur la manière dont les différents acteurs d'une chaîne de transport perçoivent les évolutions des STI est fournie. (Schopka & Kopfer 2017) proposent une stratégie de présélection des demandes de transport (de fret) basée sur les enchères, dans laquelle les demandes sont sélectionnées en fonction de leur potentiel approximatif à augmenter les bénéfices des transporteurs. La capacité des stratégies à réaliser des économies est analysée.

Le plus intéressant dans le cadre de ce travail est la gestion logistique de la maintenance dans l'industrie de l'énergie éolienne offshore qui est une tâche très critique. L'incapacité de fournir des services de maintenance appropriés peut nuire à la disponibilité du parc éolien et réduire ainsi la production d'électricité ainsi que la rentabilité.

La logistique de maintenance est connue comme étant un facteur concurrentiel important dans l'industrie de l'énergie éolienne en mer et ayant un impact significatif sur la rentabilité des projets éoliens. Les statistiques existantes montrent que les dépenses de soutien à la maintenance (y compris les coûts de main-d'oeuvre de maintenance, de location de navires et de commande des pièces de rechange) constituent une part importante des coûts de maintenance. En revanche, les activités d'aide à la maintenance comme la fourniture et la distribution de pièces de rechange contribuent le plus aux émissions de gaz à effet de serre provenant de l'énergie éolienne (10 g CO₂-eq./kWh ou équivalent 28% des émissions totales) (Arvesen *et al.* 2013).

La gestion logistique de la maintenance devient plus cruciale encore pour les parcs éoliens situés dans des zones froides, verglacées ou éloignées où l'accessibilité pour la maintenance est restreinte (Shafiee 2014). Une fois qu'un signal d'alerte est détecté par le système de surveillance, une tâche de maintenance est planifiée pour l'équipement défectueux. Les pièces de rechange nécessaires sont commandées auprès des dépôts du parc éolien, les moyens de transport nécessaires et les navires de service sont loués et un certain nombre de techniciens de maintenance sont affectés à l'exécution des tâches de réparation. Toute incapacité à fournir une logistique de maintenance adéquate en raison du manque de pièces de rechange, de l'indisponibilité des moyens de transport ou du personnel insuffisant peut nuire à la disponibilité du parc éolien et réduire ainsi la puissance et la rentabilité. À cette fin, une logistique de maintenance bien organisée est nécessaire non seulement pour réduire les coûts d'exploitation et de maintenance, mais aussi pour garantir que la production d'électricité correspond à la demande et que les émissions de gaz à effet de serre soit réduites de manière durable (Shafiee 2015b).

les organisations logistiques existantes n'ont pas été conçues pour faire face aux défis de maintenance des parcs éoliens offshore, et par conséquent, il subsiste un fossé entre les modèles académiques et leur application dans la pratique. De nombreux chercheurs ont montré leur intérêt pour l'étude de la gestion de la chaîne logistique pour les énergies

renouvelables offshore. dans l'étude de (Oelker *et al.* 2017), une modélisation des processus de maintenance d'un parc éolien offshore au moyen d'un modèle de simulation basé sur des événements et des agents discrets est faite. L'objectif étant de planifier les tâches de maintenance en tenant compte de toutes les restrictions réelles en fonction des données historiques afin de déterminer les facteurs importants et les améliorations opérationnelles potentielles. Une simulation est utilisée pour déterminer le nombre optimal de ressources nécessaires pour exécuter les activités de maintenance en maintenant l'utilisation des ressources à un niveau acceptable. (Jin *et al.* 2012) ont développé un modèle d'optimisation non linéaire pour déterminer la stratégie de maintenance optimale et la politique d'inventaire des pièces de rechange pour les fournisseurs de logistique tiers dans les parcs éoliens. (Dewan 2014) a développé un modèle stochastique de logistique et de service pour analyser l'organisation de soutien des parcs éoliens pour la maintenance et la gestion des pièces de rechange. Nous finissons avec le travail de (Shafiee 2015b) qui fait un état de l'art de la logistique de maintenance dans l'industrie de l'énergie éolienne offshore et identifie les principaux problèmes et défis dans le domaine. L'auteur présente une méthode de classification visant à identifier les différents enjeux et défis liés à la logistique de maintenance des parcs éoliens offshore.

1.5 CONCLUSION

Les énergies fossiles sont appelées à disparaître tôt ou tard. De plus, l'Algérie ne pourra pas compter indéfiniment sur les hydrocarbures comme recette principale d'exportation. Il est nécessaire de se tourner vers les énergies renouvelables dès maintenant et de se préparer aux changements à venir. Nous avons présenté dans (Allal *et al.* 2021b) les obstacles que l'Algérie devait surmonter pour développer l'énergie éolienne tout en mettant l'accent sur les similarités des conditions dans l'éolienne dans le désert avec l'éolienne offshore. Nous avons parcouru dans ce chapitre les différents concepts qui entrent en considération pour situer le domaine de cette thèse. Au passage nous avons mis en évidence que l'Algérie disposait d'un potentiel d'énergie éolienne important, en particulier dans le désert. Il est donc particulièrement intéressant d'explorer d'avantage l'exploitation de cette ressource. De plus, les dernières études ont montré que l'installation de parcs éoliens dans le désert pouvait avoir des avantages imprévus. En effet, (Li *et al.* 2018) montre que l'installation de grande éolienne peut entraîner une augmentation de plus de 50% des précipitations. L'augmentation de la végétation qui en résulterait augmenterait encore les précipitations, créant une rétroaction positive d'albédo – précipitations – végétation qui contribuerait à environ 80% de l'augmentation des précipitations pour les parcs éoliens. Il reste, toutefois, nécessaire d'approfondir les analyses sur le potentiel de l'énergie éolienne en Algérie et de former le personnel qui devra gérer l'exploitation et la maintenance des futurs parcs éoliens.

SIMULATION MULTI-AGENTS

2

SOMMAIRE

2.1	INTRODUCTION	37
2.2	HISTORIQUE	37
2.3	DÉFINITION D'UN AGENT	38
2.3.1	Agent cognitif	40
2.3.2	Agent réactif	40
2.3.3	Agent hybride	41
2.3.4	Agent BDI	41
2.4	LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS	42
2.5	PROPRIÉTÉS DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS	43
2.5.1	Interaction et coopération	44
2.5.2	Communication entre agents	45
2.5.3	Environnement	47
2.6	DOMAINES D'APPLICATION DES SMA	48
2.7	MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES	50
2.7.1	Système	50
2.7.2	Système complexe	51
2.7.3	Modèle	52
2.7.4	Modélisation	53
2.8	PROBLÉMATIQUE DE SIMULATION DE SYSTÈMES COMPLEXES	54
2.9	MODÈLES DE SIMULATION	57
2.9.1	Simulation par événements discrets (Discrete Event Simulation, "DES")	58
2.9.2	Simulation continue	58
2.9.3	Simulation discrète-continue combinée	58
2.10	SIMULATION MULTI-AGENTS	59
2.11	CONCLUSION	60

2.1 INTRODUCTION

Le domaine de l'informatique ne se résume plus à des recherches théoriques et expérimentales isolées comme se fut le cas lors de son avènement. En effet, depuis quelques années, on tente d'utiliser les outils informatiques dans pratiquement tous les domaines afin d'aider à accomplir des tâches difficiles pour l'homme. L'intégration de l'informatique à différents domaines scientifiques a permis l'émergence de nouvelles disciplines comme la bio-informatique, la domotique, l'imagerie informatique, l'automatique,... C'est devenu un outil indispensable d'aide à la décision qui permet aux décideurs d'avoir à portée de main, très rapidement, des données et des métriques très difficile à avoir auparavant.

Néanmoins, comme cette utilisation de l'informatique est récente, il subsiste un grand nombre d'obstacles. Afin de pouvoir impliquer l'informatique dans n'importe quel domaine, il faut dans un premier temps appréhender l'ensemble de ce domaine, aussi complexe soit-il. Plusieurs axes de l'informatique ont émergé afin de palier à cette complexité. Parmi eux, on peut citer les systèmes multi-agents (SMA) qui sont l'objet de ce chapitre.

Les systèmes multi-agents (SMA) ont montré leur pertinence pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes (Sahnoun *et al.* 2015). Ils intéressent un grand nombre de domaines de l'informatique tels que l'intelligence artificielle, les systèmes distribués, la robotique, ou encore la vie artificielle (Chaib-Draa *et al.* 2001) et couvre un éventail de recherche très vaste (Ferber 1999).

Ces systèmes sont idéaux pour représenter des problèmes possédant de multiples méthodes de résolution, de multiples perspectives et/ou de multiples résolveurs (Chaib-Draa *et al.* 2001). Avant d'en faire un quelconque usage, nous devons d'abord comprendre les concepts, d'agent, de SMA, les notions sur lesquels ils se basent et celles qui en découlent (Badsì 2018). Dans notre travail, l'intérêt que nous portons aux SMA entre dans le cadre de la simulation. Nous allons donc présenter, dans ce chapitre, les différents concepts relatifs au domaine, avant de nous pencher sur les SMA en tant qu'outil de simulation. Nous nous concentrerons par la suite sur la modélisation et la simulation de systèmes complexes.

2.2 HISTORIQUE

Depuis les premiers balbutiements des programmes expérimentaux de Newell, Shaw et Simon (Newell *et al.* 1957) sur la démonstration automatique de théorèmes, le terme "intelligence artificielle" a été utilisé pour désigner un projet de recherche consistant à concevoir une machine intelligente, c'est-à-dire capable de réussir aussi bien qu'un être humain dans des tâches jugées complexes.

Le domaine de l'intelligence artificielle classique (IA) a pour objectif de créer des entités rationnelles autonomes, capables de remplacer l'être humain dans certaines tâches complexes. Des programmes comme les systèmes experts s'acquittent de ce travail, autant que faire se peut, en faisant preuve d'une certaine expérience, savoir-faire et raisonnement

(Ferber 1999). Cependant, la conception centralisée et séquentielle des systèmes experts se heurte à une complexité toujours grandissante, le problème est similaire à celui de la programmation procédurale classique, qui trouva ses limites face à sa propre complexité, ce qui donna lieu à l'apparition de la Programmation Orientée Objet et par analogie à Intelligence Artificielle Distribuée (IAD)(Badsı 2018).

Les SMA ont vu le jour avec l'avènement de l'intelligence artificielle distribuée (IAD). À ses début toutefois, l'IAD ne s'intéressait qu'à la coopération entre résolveurs de problèmes afin de contribuer à résoudre un but commun. Pour y parvenir, on divisait en général, un problème en sous problèmes, et on allouait ces sous-problèmes à différents résolveurs qui sont appelés à coopérer pour élaborer des solutions partielles. Celles-ci sont finalement synthétisées en une réponse globale au problème de départ. Ainsi donc, l'IAD au départ privilégiait le "problème à résoudre" tout en mettant l'accent sur la résolution d'un tel problème par de multiples entités intelligentes. Dans les SMA d'aujourd'hui, les agents sont (entre autres) autonomes, possiblement préexistants et généralement hétérogènes. Dans ce cas, l'accent est plutôt mis sur le fait de savoir comment les agents vont coordonner leurs connaissances, buts et plans pour agir et résoudre des problèmes (Chaib-Draa *et al.* 2001).

L'approche distribuée trouve en effet son fondement dans une critique radicale de l'informatique séquentielle et de l'IA classique, en considérant que les activités simples ou complexes, telles que la résolution de problèmes, l'établissement d'un diagnostic, la coordination d'action ou la construction de systèmes sont le fruit d'une interaction entre entités relativement autonomes et indépendantes, appelées agents, qui travaillent au sein de communautés selon des modes parfois complexes de coopération, de conflit et de concurrence, pour survivre et se perpétuer. De ces interactions émergent des structures organisées qui, en retour, contraignent et modifient les comportements de ces agents(Ferber 1999).

2.3 DÉFINITION D'UN AGENT

Comme pour beaucoup de domaines, nous trouvons dans la littérature un nombre important de définitions pour le concept d'agent. Ainsi, l'une des premières définitions de l'agent est donné par (Ferber 1987) qui le définit comme : "Une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec les autres agents."

Quelques années plus tard, Ferber affinera sa définition dans (Ferber 1995) et proposera la définition suivante :

" On appelle agent une entité physique ou virtuelle

- a. qui est capable d'agir dans un environnement,
- b. qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- c. qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs

- individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- d. qui possède des ressources propres,
 - e. qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
 - f. qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
 - g. qui possède des compétences et offre des services,
 - h. qui peut éventuellement se reproduire,
 - i. dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit."

La même année, (Hayes-Roth 1995) insiste sur le fait que les agents raisonnent pendant le processus de sélection des actions. Si le raisonnement est interprété au sens large, son architecture d'agent permet des actions réflexes ainsi que des actions planifiées. Elle donne la définition suivante : "Les agents intelligents remplissent en permanence trois fonctions : la perception des conditions dynamiques de l'environnement, l'action visant à modifier les conditions de l'environnement et le raisonnement pour interpréter les perceptions, résoudre les problèmes, tirer des inférences et déterminer les actions."

Nous nous sommes également intéressés à la définition de (Jennings *et al.* 1998) qui ajoute en plus des propriétés des agents qu'on retrouve dans les définitions précédentes (l'autonomie, l'action, la perception, la communication et le raisonnement), de nouvelles propriétés : "Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu." Les notions "situé", "autonomie" et "flexible" sont définies par (Chaïb-Draa *et al.* 2001) comme suit :

- *situé* : l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement. Exemples : systèmes de contrôle de processus, systèmes embarqués, etc.
- *autonome* : l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers (humain ou agent) et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne ;
- *flexible* : l'agent est dans ce cas :
- *capable de répondre à temps* : l'agent doit être capable de percevoir son environnement et élaborer une réponse dans les temps requis ;
- *proactif* : l'agent doit exhiber un comportement proactif et opportuniste, tout en étant capable de prendre l'initiative au "bon" moment ;
- *social* : l'agent doit être capable d'interagir avec les autres agents (logiciels et humains) quand la situation l'exige afin de compléter ses tâches ou aider ces agents à accomplir les leurs.

Pour notre part, comme notre intérêt pour les agents se porte sur la simulation, nous reprenons la définition de (Boissier 2001) : " Un pro-

gramme informatique autonome, plongé dans un environnement (médium commun aux agents du système) qu'il est capable de percevoir et sur lequel il est capable d'agir"

La question qui se pose maintenant est de savoir s'il faut voir les agents comme des entités déjà "intelligentes" qui sont capables de résoudre certains problèmes par eux-mêmes, ou bien faut-il les assimiler à des êtres simples réagissant directement aux modifications de l'environnement ?

2.3.1 Agent cognitif

Le concept d'agent cognitif est celui que préfèrent les adeptes de l'IA classique, qui le considèrent comme la manière appropriée de concevoir un agent (Shardlow 1990). Les agents cognitifs possèdent des connaissances et sont capables d'adapter leur réaction et de choisir un comportement parmi plusieurs possibilités (Carron 2001). Ils disposent d'une représentation de l'environnement et d'une mémoire locale du passé. Étant des agents complexes à modéliser, le nombre d'agents de ce type dans un environnement est souvent réduit (Kpakpo & Itmi 2016).

Dans ce cadre, un système multi-agents est composé d'un petit nombre d'agents "intelligents". Chaque agent dispose d'une base de connaissances comprenant l'ensemble des informations et des savoir-faire nécessaires à la réalisation de sa tâche et à la gestion des interactions avec les autres agents et avec son environnement (Ferber 1995). C'est cette capacité d'anticipation qui différencie les agents cognitifs des agents réactifs, ils sont capables de représentation partielle de l'environnement grâce à leur mémoire.

Les processus internes des agents cognitifs peuvent également s'orienter vers une architecture BDI (Belief-Desire-Intention pour : croyance, désir et intention). Cette architecture permet à un agent de raisonner en tenant compte de ses états mentaux mais aussi de ceux des autres agents du système.

2.3.2 Agent réactif

Les agents dit "réactifs" possèdent uniquement des mécanismes basiques de réaction aux événements. Généralement, un unique agent de ce type n'est pas considéré comme "intelligent", mais le système constitué d'un ensemble de ces agents se révèle avoir un comportement émergent intelligent (Drogoul & Ferber 1992). Ce type d'agents ne peut que réagir à des stimuli simples provenant de leur environnement, et leur comportement est alors simplement dicté par leur relation avec leur entourage sans que ces agents ne disposent d'une représentation des autres agents ou de leur environnement. Cependant, du fait, de leur nombre, ces agents réactifs peuvent résoudre des problèmes qualifiés de complexes (Le Tableau 2.1 résume ces différences).

AGENTS COGNITIFS	AGENTS REACTIFS
Représentation explicite de l'environnement	Pas de représentation explicite
Peut tenir compte de son passé	Pas de mémoire locale
Agents complexes	Fonctionnement stimulus/action
Nombre d'agents réduit	Nombre d'agents élevé

TABLE 2.1 – Les agents cognitifs vs réactifs (Wooldridge & Jennings 1995).

Les travaux sur ces agents s'intéressent plus à la modélisation d'une société d'agents qu'à l'agent lui-même. L'exemple le plus manifeste d'intelligence collective est celle de la fourmilière. Alors que toutes les fourmis se situent sur un plan d'égalité et qu'aucune d'entre elles ne possède de pouvoir d'autorité stricte sur les autres, les actions des fourmis se coordonnent de manière que la colonie survive et fasse donc face à des problèmes complexes tels que ceux posés par la recherche de nourriture, les soins à donner aux œufs et aux larves, la construction de nids, la reproduction, etc (Ferber 1995).

2.3.3 Agent hybride

Étant donné le fait qu'un agent puisse être capable d'un comportement réactif et cognitif, une décomposition évidente implique la création de sous-systèmes séparés pour faire face à ces différents types de comportements. Cette idée a conduit naturellement à une classe d'architectures dans laquelle les différents sous-systèmes sont disposés en une hiérarchie de couches en interaction (Wooldridge 2009). Ainsi, les agents dit "hybrides" possèdent à la fois des caractéristiques ou des comportements relevant des agents réactifs et cognitifs permettant éventuellement de passer de l'un à l'autre. Ce troisième type d'agents recouvre évidemment toutes les gradations possibles entre agent réactif et agent délibératif.

Dans ce cas, un agent est composé de plusieurs couches, arrangées selon une hiérarchie, la plupart des architectures considérant que trois couches suffisent amplement. Ainsi, au plus bas niveau de l'architecture, on retrouve habituellement une couche purement réactive, qui prend ses décisions en se basant sur des données brutes en provenance des senseurs. La couche intermédiaire fait abstraction des données brutes et travaille plutôt avec une vision qui se situe au niveau des connaissances de l'environnement. Finalement, la couche supérieure se charge des aspects sociaux de l'environnement, c'est à dire du raisonnement tenant compte des autres agents (Chaib-Draa *et al.* 2001).

2.3.4 Agent BDI

Les processus internes des agents cognitifs peuvent s'orienter vers une architecture dite "**BDI**" (Belief-Desire-Intention pour : croyance, désir et intention). Cette architecture permet à un agent de raisonner en tenant compte de ses états mentaux mais aussi de ceux des autres agents du système. Ces agents sont généralement représentés par un « état mental » ayant les attitudes mentales suivantes :

- *Les croyances* : Ce que l'agent connaît de son environnement ;
- *Les désirs* : Les états possibles envers lesquels l'agent peut vouloir s'engager ;
- *Les intentions* : Les états envers lesquels l'agent s'est engagé, et envers lesquels il a engagé des ressources.

Un agent BDI doit donc mettre à jour ses croyances avec les informations qui lui proviennent de son environnement, décider quelles options lui sont offertes, filtrer ces options afin de déterminer de nouvelles intentions et poser ses actions au vu de ses intentions (Chaib-Draa *et al.* 2001).

2.4 LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

La communauté des systèmes concurrents étudie depuis plusieurs décennies les propriétés des systèmes contenant de multiples composants en interaction, et développe des théories, des langages de programmation et des outils pour expliquer, modéliser et développer de tels systèmes. Les systèmes multi-agents sont - par définition - une sous-classe de systèmes concurrents, et certains membres de la communauté des systèmes distribués se demandent si les systèmes multi-agents sont suffisamment différents des systèmes distribués / concurrents «standard» pour mériter une étude séparée. Néanmoins, des questions telles que la manière dont les agents peuvent parvenir à un accord par la négociation sur des questions d'intérêt commun, et comment les agents peuvent coordonner dynamiquement leurs activités avec des agents dont les objectifs et les motifs sont inconnus montrent la différence des SMA avec les autres systèmes concurrents (Wooldridge 2009). Il est donc naturel que nous ayons vu émerger un grand nombre de définitions pour les systèmes multi-agents. Ce domaine a connu son essor à partir des années 90 et des travaux de (Ferber 1995) qui appelle système multi-agent (ou SMA), un système composé des éléments suivants :

1. Un environnement E , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
2. Un ensemble d'objets O . Ces objets sont situés, c'est-à-dire que, pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E . Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
3. Un ensemble A d'agents, qui sont des objets particuliers ($A \subseteq O$), lesquels représentent les entités actives du système.
4. Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
5. Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O .
6. Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers

Selon (Gasser 1991), une société d'agents est constituée de trois éléments : un ensemble d'agents, un ensemble de tâches à réaliser, et un ensemble d'objets associés à l'environnement. Un agent peut prendre la responsabilité d'effectuer une tâche s'il en a la capacité. Il prend alors un rôle dans le groupe. La réalisation d'une tâche suppose la manipulation d'objets de l'environnement.

Pour (Chaib-Draa *et al.* 2001), un système multi-agents est un système distribué composé d'un ensemble d'agents. Contrairement aux systèmes d'IA, qui simulent dans une certaine mesure les capacités du raisonnement humain, les SMA sont conçus et implantés idéalement comme un ensemble d'agents interagissants, le plus souvent, selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence

(Demazeau 1995) présente l'approche dite "Voyelles" et met l'accent sur deux autres axes caractérisant les SMA qui sont les Interactions et les Organisations. Il découpe les SMA suivant 4 axes (A-E-I-O) :

- Agents
- Environnement
- Interactions
- Organisations

Comme nous utilisons les SMA dans le cadre de la modélisation et la simulation d'un système complexe, la définition qui nous convient le plus est celle de (Carron 2001) : "Un système multi-agents est un ensemble de processus autonomes organisés appelés agents plongés dans un environnement commun et capables d'interagir afin de réaliser des tâches complexes."

Les SMA sont des systèmes idéaux pour représenter des problèmes possédant de multiples méthodes de résolution, de multiples perspectives et/ou de multiples solveurs. Ces systèmes possèdent les avantages traditionnels de la résolution distribuée et concurrente de problèmes comme la modularité, la vitesse (avec le parallélisme), et la fiabilité (dûe à la redondance).

2.5 PROPRIÉTÉS DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

De par leur nature répartie, les SMA offrent des propriétés intéressantes comme (Mili 2008) :

- *l'efficacité des traitements* : les agents travaillent en parallèle et communiquent de façon asynchrone.
- *la robustesse et la sûreté de fonctionnement* : la mise hors fonctionnement de quelques agents ne modifie pas sensiblement le comportement global du système.
- *la flexibilité et le traitement des systèmes à grandes échelles* : on peut toujours augmenter le nombre d'agents pour traiter des systèmes de plus en plus gros ; sans pour autant perturber le travail des agents existants.
- *un coût de fonctionnement faible* : en principe la répartition des traitements, entre de nombreuses unités simple (agents), conduit à des coûts faibles en fait cette propriété est une contrainte de l'approche.
- *un coût de développement et de réutilisation intéressant* : là encore en théorie il devrait être plus simple de faire développer par des spécialistes des agents indépendamment les uns des autres, pour la réutiliser dans divers scénarios applicatifs ; sauf que la différence essentielle entre les agents et les objets est justement dans les notions d'autonomie et de flexibilité liées aux comportements des agents.
- *les schémas d'interactions sophistiquées* : ils incluent la coopération, la coordination et la négociation.

la présence de plusieurs agents autonomes dans un système conduit à une multiplicité de prises de décision qui s'expriment sous la forme du concept d'interaction centrale dans les systèmes multi-agents. Il concentre ce qui crée la relation entre les comportements individuels et le comportement collectif issu de ces comportements individuels.

Ce concept revêt trois significations. Chacune d'entre elles est liée à la présence de plusieurs agents dans le système :

- la situation d'interaction provenant du fait que les agents peuvent adopter des attitudes différentes les uns vis à vis des autres.
- l'interaction à long terme qui représente les couplages possibles entre les comportements des agents du système.
- les moyens d'interaction, qui peuvent être classés en deux catégories : les interactions directes et les interactions indirectes.

Le concept d'interaction implique que les conséquences d'une action ou d'une interaction envisagée par un agent dépendent des autres agents du système et de leurs comportements (Thomas 2005).

2.5.1 Interaction et coopération

Un système multi agents se distingue d'une collection d'agents indépendants par le fait que les agents interagissent en vue de réaliser conjointement une tâche ou d'atteindre conjointement un but particulier. Les agents peuvent interagir en communiquant directement entre eux ou par l'intermédiaire d'un agent ou même en agissant sur leur environnement. Le réel intérêt dans la réalisation de SMA se trouve dans les phénomènes obtenus suite à l'interaction des agents dans le but de réaliser un objectif global.

Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques. Pour un agent, interagir avec un autre constitue à la fois la source de sa puissance et l'origine de ses problèmes (Ferber 1995).

La coopération est la forme générale de l'interaction (Kabachi 1999). Elle peut être considérée comme une attitude intentionnelle adoptée par les agents qui décident de travailler ensemble. Dans ce cas les agents s'engagent dans une action après avoir identifié et adopté un but commun considéré comme un élément essentiel de l'activité sociale (Mili 2008).

(Durfee & Montgomery 1991) proposent quatre buts génériques de coopération :

- Augmenter la vitesse de résolution des tâches par leur parallélisation ;
- Augmenter le nombre ou la portée des tâches réalisables par le partage de ressources ;
- Augmenter la probabilité d'achever des tâches par leur duplication et si possible par l'utilisation de méthodes différentes pour les réaliser ;
- Diminuer l'interférence entre tâches en évitant les interactions négatives.

(Chaib-Draa *et al.* 2001) distingue deux types d'interactions entre les agents.

Interactions entre agents coopératifs

Des agents totalement coopératifs peuvent changer leurs buts pour répondre aux besoins des autres agents afin d'assurer une meilleure coordination entre eux. Ainsi, selon (Ferber 1999), on peut considérer la co-

opération comme une attitude adoptée par les agents qui décident de travailler ensemble, sinon on peut adopter le point de vue d'un observateur extérieur au système multi-agents qui interprète à posteriori les comportements des agents pour les qualifier de coopératifs ou non suivant des critères préétablis tels que l'interdépendance des actions ou le nombre de communications effectuées. Dans le cas de la coopération vue comme une attitude intentionnelle, les agents s'engagent dans une action après avoir identifié et adopté un but commun.

Interactions entre agents égo-centrés

Les interactions entre agents égo-centrés se basent principalement sur la négociation. Cette dernière devient donc une méthode de coordination et de résolution de conflits. Elle a également été utilisée comme métaphore pour la communication de changements dans les plans, l'allocation de tâches ainsi que la résolution centralisée de violation de contraintes. On peut donc voir que la définition de la négociation est aussi imprécise que celle du concept d'agent (Chaib-Draa *et al.* 2001).

La plupart des systèmes réels se situe entre les deux types d'interactions. La coopération totale est mise en oeuvre par exemple dans les approches de résolution coopérative de problèmes distribués ("cooperative distributed problem solving" ou CDPS). Dans ces approches, les agents coopèrent pour résoudre des problèmes qu'ils ne peuvent pas résoudre individuellement. Tout d'abord chaque agent utilise ses connaissances et ressources pour résoudre localement un ou plusieurs sous-problèmes. Les solutions partielles à tous les sous-problèmes sont par la suite intégrées. C'est par exemple le cas des avions qui volent dans un même espace aérien et qui, de ce fait, ont différentes perceptions de leur espace environnant obtenues par leurs senseurs respectifs. Ce n'est qu'en combinant ces différentes perceptions que ces avions peuvent obtenir une vue globale afin de résoudre les conflits potentiels qui peuvent se produire entre eux.

2.5.2 Communication entre agents

La communication désigne l'ensemble des processus physiques et psychologiques par lesquels s'effectue l'opération de mise en relation d'un émetteur avec un ou plusieurs récepteurs avec l'intention d'atteindre certains objectifs. Elle est considérée comme une forme d'action particulière qui, au lieu de s'appliquer à la transformation de l'environnement, agit sur (modifie) les représentations mentales des agents (buts, croyances, etc.). La communication dans l'univers multi-agents n'est plus une simple tâche d'entrée-sortie, mais doit être modélisée comme un acte pouvant influencer sur l'état des autres agents (Kabachi 1999).

Au sens de (Ferber 1995), la communication est un moyen ou une méthode de coopération (d'interaction), à côté de la :

- collaboration qui s'intéresse à la manière de répartir le travail et les ressources entre plusieurs agents ;
- coordination d'actions qui analyse la manière d'organiser les actions des différents agents dans le temps et l'espace pour atteindre les objectifs ;

- résolution de conflit par arbitrage et négociation en établissant par exemple des compromis, etc..

Les agents peuvent interagir soit en accomplissant des actions linguistiques (en communiquant entre eux), soit en accomplissant des actions non-linguistiques qui modifient leur environnement. En communiquant, les agents peuvent échanger des informations et coordonner leurs activités. (Chaib-Draa *et al.* 2001) identifie quatre approches pour la communication entre agents :

Transfert de plans ou de messages

Si les agents communiquent par envoi de messages ils se rapprochent du modèle d'acteur proposé par (Hewitt 1977). Ce premier modèle définissait un acteur comme une entité active et autonome qui a une vue partielle de l'univers. Cet acteur était décrit au moyen de deux éléments : des accointances (qui correspondent aux acteurs connus d'un autre acteur), et un **comportement** décrit par un **script**, ensemble de méthodes qui indiquent les différentes actions que peut accomplir cet acteur en réponse aux messages qu'il reçoit.

Dans l'approche de transfert de messages, un agent X communique son plan en totalité à un agent Y et Y communique son plan en totalité à X. Cette approche présente plusieurs inconvénients : le transfert de plans est coûteux en ressources de communication et c'est une approche difficile à mettre en oeuvre dans des applications réelles car il y a en général un fort degré d'incertitude au sujet des états actuel et futurs du monde. Dans un SMA la complexité des communications dépend des caractéristiques des agents. Des agents réactifs utilisent un ensemble de règles de communication qui sont déclenchées quand des états spécifiques sont vérifiés ou quand des événements prédéterminés se produisent. Ces événements peuvent être des messages reçus ou des changements dans l'environnement. Les types de messages combinés avec les réponses attendues conduisent à la spécification de protocoles d'interaction.

Échange d'informations grâce à un tableau noir

En intelligence artificielle la technique du tableau noir ("blackboard") est très utilisée pour spécifier une mémoire partagée par divers systèmes. Dans un SMA utilisant un tableau noir, les agents peuvent écrire des messages, insérer des résultats partiels de leurs calculs et obtenir de l'information. Le tableau noir est en général partitionné en plusieurs niveaux qui sont spécifiques à l'application. Le transfert de messages et les communications basées sur un tableau noir sont souvent combinés dans des systèmes complexes. Dans de tels systèmes, chaque agent est composé de plusieurs sous-systèmes (ou "sous agents") qui communiquent à travers un tableau noir. Les agents communiquent entre eux par échange de messages.

Actes de discours et conversations

Ce mode de communication s'inspire des travaux sur la compréhension du langage naturel et la communication entre les êtres humains. Les

philosophes du langage ont développé au cours des 25 dernières années la théorie des actes de discours qui considère que "dire quelque chose c'est en quelque sorte agir". Les chercheurs en intelligence artificielle ont très tôt pensé à étudier comment les actes de discours peuvent être utilisés pour influencer les états mentaux des agents. Ainsi, dans les SMA, on considère que les agents sont dotés de structures de données appelées "états mentaux" à partir desquelles ils peuvent raisonner. Diverses catégories d'états mentaux ont été retenues par les chercheurs dont notamment les croyances, les désirs, les intentions ou buts, les capacités, etc. Lorsqu'un agent X communique avec un autre agent Y, c'est pour influencer les états mentaux de Y. Ainsi, X peut transférer à Y une information qui va changer les croyances de Y ou bien lui proposer d'adopter un but que Y va transformer en une de ses intentions.

Communication utilisant KQML, ACL et les conversations

Dans les SMA, deux protocoles principaux ont été utilisés pour supporter la communication entre agent (Mili 2008) :

- **Le langage de communication KQML** "Knowledge Query and Manipulation Language" (KQML) est un langage "extérieur" de haut niveau pour les agents, orienté sur l'échange des messages, indépendant de la syntaxe et de l'ontologie du contenu des messages. Le langage KQML est indépendant aussi du mécanisme de transport (TCP/IP, e-mail, objets CORBA etc.) et du langage utilisé pour coder le contenu des messages (e.g. Prolog, STEP, SQL, KIF etc.). Le langage KQML spécifie le format des messages échangés par les agents, sans être concerné par le format de l'information transportée. Un message KQML peut être vu comme un objet, défini par l'information clé, la 'performative', (la classe) et un nombre
- **Le langage de communication ACL** Ces dernières années, KQML semble perdre du terrain au profit d'un autre langage plus riche sémantiquement ACL. Un langage mis en avant par la FIPA qui s'occupe de standardiser les communications entre agents. ACL est basé également sur la théorie du langage et a bénéficié grandement des résultats de recherche de KQML. Si toutefois, les deux langages se rapprochent au niveau des actes du langage, il n'en est rien au niveau de la sémantique et il semble qu'un grand soin ait été apporté au niveau de ACL.

2.5.3 Environnement

L'environnement est un élément dont l'agent peut difficilement être dissocié. Les modèles manipulés dans l'environnement représentent et gèrent par exemple, l'ensemble des ressources ainsi que les possibilités de perception et d'action disponibles pour un agent. L'environnement est très dépendant du domaine d'application. Il est donc difficile d'en avoir une vue générale et de proposer des modèles d'environnements. (Russell & Norvig 2002) présentent la classification suivante :

- **Accessible contre inaccessible** Un environnement accessible est celui où l'agent peut obtenir des informations complètes, exactes et à

jour sur l'état de l'environnement. La plupart des environnements du monde réel (par exemple : le monde physique de tous les jours ou l'Internet) ne sont pas accessibles dans ce sens.

- **Déterministe contre non-déterministe** Un environnement déterministe est celui dans lequel une action a un effet unique garanti, il n'y a aucune incertitude sur l'état qui résultera de l'exécution d'une action.
- **Statique contre dynamique** Un environnement statique est celui qui est supposé rester inchangé excepté par l'action de l'agent. En revanche, un environnement dynamique est celui sur lequel fonctionnent d'autres processus, et qui change donc de façon indépendante de la volonté de l'agent. Le monde physique est un environnement très dynamique, tout comme l'Internet.
- **Discret contre continu** Un environnement est discret s'il dispose d'un nombre fixe et fini d'actions et de perceptions.

2.6 DOMAINES D'APPLICATION DES SMA

Les domaines d'application des systèmes multi-agents sont particulièrement riches. (Ferber 1995) identifie cinq grandes catégories d'applications (figure 2.1) des systèmes multi-agents :

- **La résolution de problèmes** La résolution de problèmes concerne toutes les situations dans lesquelles des agents logiciels accomplissent des tâches utiles aux êtres humains. Cette catégorie s'oppose aux applications de robotique distribuée dans le fait que les agents soit purement informatiques et n'aient pas de structure physique réelle.
- **La robotique distribuée** La robotique distribuée porte sur la réalisation non pas d'un seul robot, mais d'un ensemble de robots qui coopèrent pour accomplir une mission. La robotique distribuée utilise des agents concrets qui se déplacent dans un environnement réel.
- **La conception kénétique de programmes** La kénétique a pour ambition de prôner un nouveau mode de conception de systèmes informatiques, cherchant à dépasser les techniques informatiques actuelles pour réaliser des logiciels distribués fonctionnant avec une grande souplesse et une grande adaptabilité à leur environnement. L'objectif est de donner naissance à des systèmes informatiques capables d'évoluer par interaction, adaptation et reproduction d'agents relativement autonomes et fonctionnant dans des univers physiquement distribués.
- **La construction de mondes synthétiques** Bien qu'il ne s'agisse pas d'applications à proprement parler, puisqu'elles ne permettent pas de résoudre un problème concret, n'utilisent pas d'agents physiques et ne simulent aucun monde réel, la construction de mondes synthétiques tient une large part dans les recherches portant sur les systèmes multi-agents parce qu'elle permet d'analyser certains mécanismes d'interactions de manière plus fine que ne pourrait le faire une véritable application.

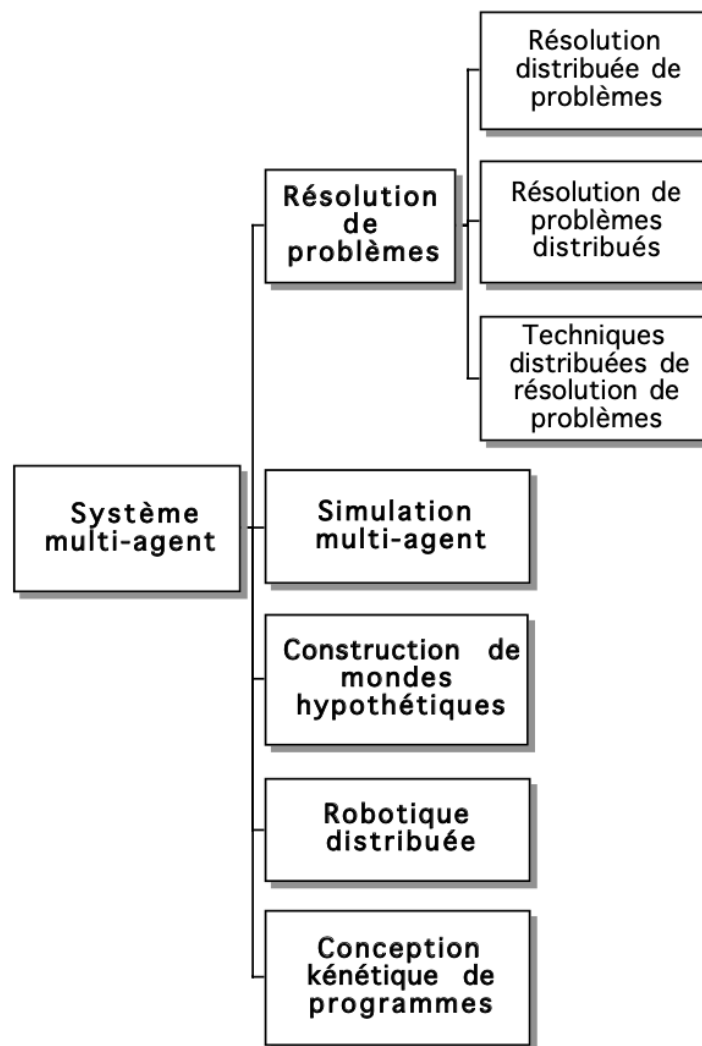


FIGURE 2.1 – Une classification des différents types d'application des systèmes multi-agents (Ferber 1995)

- **La simulation multi-agents** Les systèmes multi-agents apportent une solution radicalement nouvelle au concept de modèle et de simulation dans les sciences de l'environnement, en offrant la possibilité de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions. La simulation multi-agents est fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter sous forme informatique le comportement des entités qui agissent dans le monde et qu'il est ainsi possible de représenter un phénomène comme le fruit des interactions d'un ensemble d'agents disposant de leur propre autonomie opératoire.

Les domaines d'application des SMA ne se limitent évidemment pas à ceux présentés par (Ferber 1995), nous pouvons retrouver chez d'autres auteurs d'autres exemples d'application : les systèmes financiers, la gestion des systèmes industriels, la collecte d'informations, les domaines de transport (contrôle de trafic aérien, trafic automobile, transport de marchandises,...),...

Toutes ces applications peuvent être considérées comme la première vague d'applications à base d'agents. En plus de fournir des solutions pour répondre aux besoins du monde réel, ils démontrent que les systèmes à base d'agents sont une solution technologique utile et puissante. Les applications d'agents sont en cours de déploiement dans les environnements de production de plus en plus complexes.

La simulation multi-agents est le domaine qui nous intéresse le plus dans le cadre de notre travail, nous la détaillerons dans la suite de ce chapitre.

2.7 MODÉLISATION DE SYSTÈMES COMPLEXES

2.7.1 Système

Avant de discuter de la modélisation de systèmes complexes, il convient de donner quelques définitions. Nous commençons d'abord par définir la notion de système. Compte tenu du cadre de notre travail (la modélisation d'un système complexe), l'une des définitions qui pourrait nous intéresser pour le concept de "système" est celle de la théorie générale des systèmes ou systémique : "La théorie des systèmes... ", ou systémique, "...s'efforce d'établir le cadre le plus général à l'intérieur duquel on peut étudier le comportement d'une entité complexe analysable..." (Ladrière 2008). L'approche systémique apparaît essentiellement comme une amorce de rapprochement des langages et des méthodologies des sciences physiques et des sciences humaines, en passant par les sciences biologiques et technologiques.

(Fishwick 1995) de son côté la définition suivante : « Un système est une partie de réalité où opèrent le temps et l'espace et des relations causales entre les différentes parties de ce système. Nous posons nécessairement des frontières en fabriquant un monde fermé et en identifiant clairement les éléments qui font partie du système et ceux qui l'affectent de l'extérieur. » Cette définition fait intervenir le temps et l'espace comme opérant sur l'évolution du système. Dans notre approche, nous nous intéressons principalement au rôle du temps sur la dynamique d'un système. Cette définition convient aussi à notre vision d'un système.

Nous pouvons ajouter à cela, la notion d'interaction qui est apparue avec des travaux comme ceux de (Morin 2013), (DUMOUCHEL *et al.* 1989) ou (Prigogine & Stengers 1979). Ces travaux mettent l'accent sur la notion d'auto-organisation des systèmes comme le reflet des interactions des parties. Cette évolution a donné naissance au concept d'autopoïèse (un système auto-organisé tend à garder constante son organisation) (Duboz 2004). Cette vision rénovée de la systémique a elle-même donné naissance à la kénétique (Concept cité dans la section précédente) (Ferber 1995), qui centre son objet d'étude sur les interactions entre entités et l'organisation qui en résulte dans les systèmes. Dans notre approche nous centrons notre étude sur les interactions entre les composants d'un système et ses conséquences sur les propriétés d'un système.

(Feliot 1997) aborde la possibilité de découper un système en sous-systèmes. Il identifie deux attitudes pouvant s'opposer : la première insiste sur l'existence de sous-systèmes relativement individualisables qui

interagissent de différentes façons selon leur organisation en réseau, la seconde au contraire considère un système comme un tout indissociable qui impose des contraintes aux sous-systèmes dont les comportements varient sensiblement une fois isolés. Ces approches, dans la terminologie systémique, portent respectivement le nom d'approche **réductionniste** et d'approche **globaliste** ou **intégriste**. En pratique, ces deux approches se complètent plus qu'elles ne s'opposent dans la mesure où, généralement des propriétés émergentes n'excluent pas l'existence de propriétés de certains sous-systèmes ou de caractéristiques structurelles permettant d'en rendre compte.

2.7.2 Système complexe

Nous passons maintenant à la notion de "complexité d'un système" qui semble défier toute tentative de définition. Cette notion, souvent intuitive, permet de qualifier des systèmes qui, par certains de leurs comportements, par leur taille, et par la diversité des natures des phénomènes mis en jeu, présentent des difficultés d'analyse. Certains systèmes présentent la particularité d'être en évolution (changement, naissance ou disparition, de comportements, de relations, d'interactions, au sein du système), ils sont le siège de phénomènes d'émergence (d'un comportement collectif, d'une propriété de la collectivité que ne possèdent pas les constituants, les individus), d'instabilités, de sensibilités aux conditions initiales (systèmes chaotiques...) (Feliot 1997).

(Emden 1971) tente de définir une mesure de la complexité en termes d'ordre et par là même d'entropie. Par le biais de la formulation statistique de l'entropie, la complexité fut également reliée à la quantité d'informations et aux notions dérivées comme celles de neugentropie et de redondance. Ces évaluations de la complexité, en termes d'information et d'ordre, furent largement utilisées en chimie et en biologie.

(Le Moigne 1990) ne donne pas de définition absolue de la complexité des systèmes, mais une définition relative en opposant complexité et complication. Pour lui, un système "simplement" compliqué se prête alors à l'analyse par une méthode analytique "sans compromis". On entend par méthode analytique le fait de découper un problème, un système, ou une situation en éléments plus simples. L'analyse de chacune des parties de ce système suffit alors à la résolution du problème dans son ensemble ou à la compréhension et à la connaissance du comportement du système global. Ce n'est plus le cas pour un système complexe pour lequel une telle analyse mènerait non pas à une réduction de la taille du problème mais à une simplification. Il faut donc se garder d'appliquer une méthode analytique à la résolution d'un problème complexe sans être conscient des simplifications qu'elle entraîne.

Comme le suggère (Le Moigne 1990), cette problématique de la complexité des systèmes est, avant celle de sa définition et de sa maîtrise, celle de son appréhension, de sa représentation ; en d'autres termes celle de sa modélisation.

Dans notre travail, nous sommes proches de la définition de (Neumann *et al.* 1966). Nous qualifions un système de complexe si : l'ensemble des comportements possibles du système considéré est très

difficile (ou impossible) à caractériser à partir de ses règles de fonctionnement.

(Feliot 1997) propose une échelle de classification pour les systèmes complexes :

- Un système est à **complexité émergente**, si l'on ne peut qu'en concevoir une représentation. Cela suppose que le système est observable et qu'il est alors possible de rendre compte de ces observations, de les communiquer, et éventuellement de les expliquer ou plus précisément de les justifier (généralement en termes de fonctions). Le modèle d'un tel système doit remplir une fonction cognitive avec éventuellement une fonction pédagogique.
- Un système est à **complexité aléatoire** si l'on peut, non seulement le représenter et justifier son comportement, mais aussi prédire ses comportements possibles. (On ne peut prédire de façon certaine son évolution mais seulement un ensemble de comportements possibles). Le modèle doit alors remplir une fonction prévisionnelle ou de simulation. Cela suppose une certaine stabilité, un certain niveau de reproductibilité de son comportement. La maintenance des parcs éoliens offshore qui est le système que nous abordons dans le cadre de notre thèse rentre dans cette catégorie de système complexe.
- Un système est à **complexité maîtrisable**, s'il peut être représenté et simulé où il est en outre possible de décider de son évolution et d'agir en conséquence sur son comportement. Le fait qu'il soit "contrôlable" suppose que puissent être identifiés certains paramètres d'action pour amener le système dans un certain état. Le modèle doit alors remplir une fonction décisionnelle et normative

2.7.3 Modèle

Démocrite avec son modèle de l'atome ou Platon avec son «monde des idées» faisaient déjà de la modélisation. La compréhension du réel passe évidemment par le filtre de notre pensée qui construit des abstractions du monde sensible (Duboz 2004). Il y a même des thèses qui avancent que l'intelligence elle-même procède par modélisation et/ou simulation, c'est-à-dire par construction d'une image stylisée et dynamique du réel, puis création de scénarios sur la base de ce modèle pour se plonger dans l'avenir et prendre des décisions (Dupuy 2013). Dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, physique ou mentale, exprimée sous une forme verbale, graphique ou mathématique (Feliot 1997).

Le terme de "modèle" a trop souvent été réservé à des constructions relativement formalisées, voire à des systèmes d'équations, il est cependant souhaitable d'adopter une conception moins restrictive. Ainsi, (Duboz 2004) présente trois définitions contemporaines qui sont proches de nos activités :

1. Pour (Pavé 1994) : «Un modèle est une représentation symbolique de certains aspects d'un objet ou d'un phénomène du monde réel.»
2. Pour (Ferber 1995) : «Un modèle, en sciences, est une image stylisée et abstraite d'une portion de réalité.»

3. Pour (Fishwick 1995) : «Modéliser c'est décrire la réalité sous la forme d'un système dynamique, à l'aide d'un langage de description, à un certain niveau d'abstraction.»

Les deux premières définitions nous rappellent qu'un modèle représente le monde réel à l'aide d'une symbolique, c'est-à-dire d'un ensemble de signes. La troisième définition introduit la notion de niveau d'abstraction ou de hiérarchie.

Dans la construction du modèle, nous apprenons des choses sur le système et nous identifions les limites de notre connaissance du système. Ensuite, c'est la simulation qui permet de répondre aux questions sur le fonctionnement et la dynamique du système. En informatique, la simulation correspond à la résolution pas à pas d'équations mathématiques dont on ne connaît pas la solution ou de moteurs d'inférences à base de règles (réalisation d'automates). Ainsi, la simulation correspond au modèle plongé dans le temps et/ou dans l'espace (Coquillard & Hill 1997).

2.7.4 Modélisation

la problématique de la modélisation d'un système complexe repose sur l'élaboration d'une spécification acceptable de celui-ci. La nature de ces spécifications n'est pas la même suivant les connaissances que l'on a sur le système. De plus, un système peut être spécifié de nombreuses manières et avec des formalismes différents. (Duboz 2004) définit le paradigme de la modélisation comme étant l'ensemble des définitions et formalismes, des méthodes, des outils et techniques qui caractérisent une activité de modélisation. Il existe beaucoup de paradigmes de modélisation. Parmi les plus connus, nous pouvons citer les modèles stochastiques, engendrant des simulations dites de «Monte Carlo». Nous pouvons également citer les algorithmes évolutionnaires ou les techniques d'apprentissage comme les réseaux de neurones ou le Q-learning.

Les premiers modèles mathématiques utilisés pour représenter des systèmes dynamiques modélisant une population d'entités individuelles, ont été critiqués pour l'étanchéité de leur niveau d'analyse. En effet, dans ce type de modèles l'ensemble du système est globalement représenté par des équations définies au niveau macroscopique qui ne permettent pas de prendre en compte les caractéristiques individuelles des entités qui composent le système (Ferber 1999). De plus, ce niveau d'analyse pose la question du réalisme et de la complexité des paramètres utilisés pour formuler les équations qui modélisent le système et met en cause la validité de l'approche (Buettner & Siler 1976).

La première approche qui a tenté d'apporter une réponse à ce problème, en introduisant plusieurs niveaux d'analyse dans l'élaboration du modèle, est celle proposée par la micro-simulation (Orcutt 1957). On trouve une description des différentes techniques liées à cette approche dans (Gilbert & Troitzsch 2005). Le principe de base de cette technique consiste à intégrer le niveau microscopique en élaborant des équations stochastiques qui utilisent des caractéristiques individuelles pour modéliser des prises de décision. Bien que la micro-simulation trouve son origine dans l'analyse des systèmes sociaux, cette démarche peut être considérée comme le point de départ des approches dites individus-centrées (dont

on peut considérer que la simulation multi-agents est une sous-classe particulière)(Michel 2004).

L'approche multi-agents se fonde elle aussi sur une démarche individus-centrée mais elle va plus loin. En effet, elle considère qu'il est possible de modéliser non seulement les individus et leurs comportements, mais aussi les interactions qui se déroulent entre ces individus. Elle considère ainsi que la dynamique globale d'un système au niveau macroscopique, résulte directement des interactions entre les individus qui composent ce système au niveau microscopique. Ainsi, alors que les modèles classiques modélisent les relations qui existent entre les différentes entités identifiées d'un système à l'aide d'équations mathématiques, l'approche multi-agents modélise directement les interactions engendrées par des comportements individuels (Parunak *et al.* 1998), (Michel 2004).

les systèmes multi-agents apparaissent comme une métaphore efficace pour décrire des composants en interaction dans un système, dès lors que l'on cherche des modèles explicatifs pour comprendre des phénomènes globaux. C'est pourquoi nous voyons une utilisation croissante de ce type de modèles pour les systèmes où la complexité est une caractéristique essentielle qui doit être appréhendée pour comprendre la dynamique du système.

2.8 PROBLÉMATIQUE DE SIMULATION DE SYSTÈMES COMPLEXES

Avant de présenter la simulation multi-agents qui est celle que nous utilisons dans notre approche, il convient de poser un cadre plus général qui est celui de la simulation de systèmes complexes. La problématique de la simulation informatique est donc d'étudier un système réel de manière à comprendre son fonctionnement interne et/ou à en prévoir son évolution sous certaines conditions. De plus, pour atteindre ces objectifs, cette étude se fait nécessairement à travers un modèle du système réel qui est utilisé pour réaliser les expérimentations. (Shannon 1977) définit la simulation comme étant fondamentalement constituée, d'une part par la construction du modèle et, d'autre part, par l'utilisation analytique qui est faite de celui-ci pour étudier le système. La simulation informatique est en effet indissociable du processus expérimental qui se rattache à son objectif. (Fishwick *et al.* 1997) définit la simulation informatique comme la discipline consistant à concevoir un modèle d'un système physique réel ou théorique, à exécuter le modèle sur un ordinateur numérique et à analyser le résultat de l'exécution. Il illustre ses propos par le schéma de la figure 2.2.

La simulation est une discipline connexe et complémentaire à la modélisation. Dans une simulation, l'ordinateur est utilisé pour évaluer un modèle numériquement, et les données sont collectées afin d'estimer les vraies caractéristiques souhaitées du modèle. Si les relations qui composent le modèle sont assez simples, il peut être possible d'utiliser des méthodes mathématiques (comme l'algèbre, le calcul ou la théorie des probabilités) pour obtenir des informations exactes sur des questions d'intérêt; c'est ce qu'on appelle une solution analytique. Cependant pour (Law *et al.* 2000) la plupart des systèmes du monde réel sont trop complexes pour permettre une évaluation analytique de modèles réalistes, et

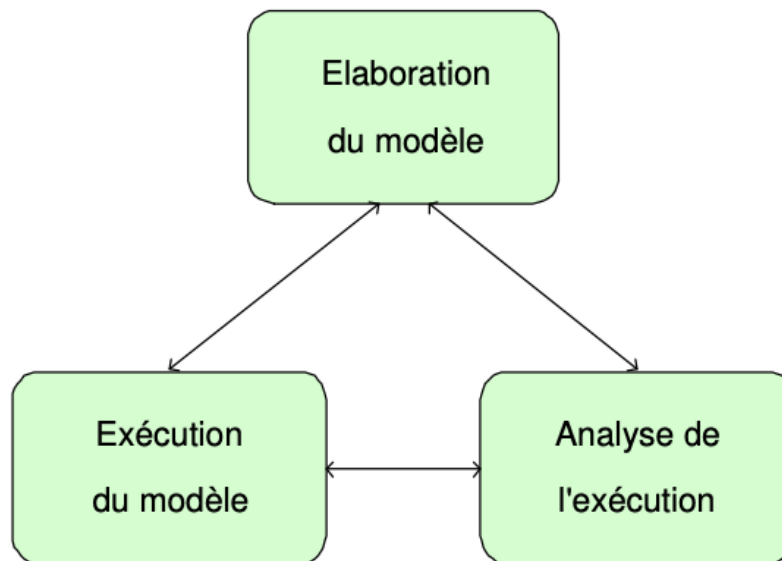


FIGURE 2.2 – La simulation informatique selon (Fishwick et al. 1997)

ces modèles doivent être étudiés au moyen de la simulation. Il affirme que la simulation est l’une des techniques de recherche opérationnelle et de science de gestion les plus largement utilisées, se ce n’est la plus utilisée. Par ailleurs, Il donne un nombre important de domaines d’application dans lesquelles la simulation s’est avérée être efficace :

- Conception et analyse des systèmes de fabrication,
- Évaluation des systèmes d’armes militaires ou de leurs besoins en logistiques,
- Détermination des exigences matérielles ou des protocoles pour les réseaux de communication,
- Détermination de la configuration matérielle et logicielle requise pour un système informatique,
- Conception et exploitation des systèmes de transport tels que les aéroports, les autoroutes, les ports et les métros,
- Analyse des chaînes d’approvisionnement,
- Détermination des politiques de commande pour un système d’inventaire,
- Analyse des opérations minières

La simulation est l’un des outils d’aide à la décision les plus efficaces à la disposition des concepteurs et des gestionnaires de systèmes complexes. Elle est l’une des méthodes les plus adaptées pour résoudre les problèmes posés par l’évaluation des performances de ces systèmes (Kabachi 1999). La simulation de la maintenance et du fonctionnement des éoliennes dans un parc éolien offshore couvre un vaste ensemble de problèmes étudiés par différents experts opérant sur une part délimitée du système. Par exemple, pour l’étude de notre système, nous faisons intervenir des experts en conception de parcs éoliens, experts dans la conception de l’éolienne elle même, des techniciens et ingénieurs de maintenance, des gestionnaires de parcs éoliens, etc. Dès lors que la simulation prétend décrire les phénomènes réels, cette observation peut être faite pour toute tentative

de modélisation d'un système complexe (Huraux 2015). L'intérêt d'utiliser une approche descriptive est de faciliter une correspondance directe entre ce qui est observé et ce qui est modélisé, la validation des modèles en est facilitée. Notre thèse s'inscrit dans la lignée de cette approche à l'aide des SMA qui offrent un paradigme approprié pour la production de modèles descriptifs de phénomènes complexes.

La marche à suivre lors de la réalisation d'un simulateur est de traduire la connaissance acquise par les divers domaines d'expertise en code exécutable par la machine. Nous reprenons les trois rôles autour de la réalisation d'un SMA en partant du système réel que présente (Drogoul *et al.* 2002). Cette méthodologie est illustrée sur la figure 2.3.

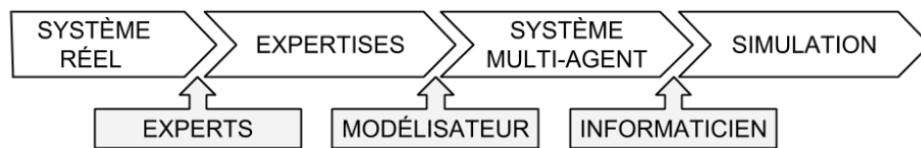


FIGURE 2.3 – Les trois rôles de réalisation des SMA (Drogoul *et al.* 2002)

Les trois rôles sont :

- **les experts (ou parfois appelés thématiciens)** d'un certain domaine ou dans un thème particulier du système étudié. Ils fournissent les objectifs applicatifs de la simulation (phénomène à prédire, théorie qui nécessite des explications, etc.). Nous considérons qu'ils fournissent pour cela les informations sur les concepts propres à leur expertise.
- **le modélisateur** qui fait le lien entre les experts et les informaticiens. Il modélise les agents à partir de la connaissance des experts.
- **l'informaticien** qui propose un modèle opérationnel et implémente les agents en écrivant un programme informatique.

Dans notre approche, nous avons évidemment joué le rôle de l'informaticien. Néanmoins, il faut noter que la modélisation avait été faite dans un travail antérieure de (Sahnoun *et al.* 2014) avec l'aide d'experts dans le domaine. Au vu des changements effectués par rapport à ce modèle, nous avons du faire de nouveau appel, à des experts pour pouvoir avoir plus de réalisme dans notre simulation et qu'elle puisse représenter de manière aussi fidèle que possible notre système.

Même si les avantages de la simulation sont indéniables, (Law *et al.* 2000) donne plusieurs obstacles à une acceptation encore plus large de celle-ci. Premièrement, les modèles utilisés pour étudier les systèmes à grande échelle ont tendance à être très complexes et l'écriture de programmes informatiques pour les exécuter peut être une tâche ardue. Cette tâche a été grandement facilitée ces dernières années par le développement d'excellents produits logiciels qui fournissent automatiquement de nombreuses fonctionnalités nécessaires pour «programmer» un modèle de simulation. Un deuxième problème avec la simulation de systèmes complexes est qu'une grande quantité de temps de calcul est parfois nécessaire. Cependant, cette difficulté est devenue beaucoup moins grave à mesure que les ordinateurs deviennent plus rapides et moins chers. Enfin, il semble y avoir une fâcheuse impression que la

simulation ne soit qu'un exercice de programmation informatique. Cela a conduit aux faits que de nombreuses simulations ne se soient basées que sur une seule exécution du programme pour obtenir «la réponse». Cette attitude a sans doute conduit à des conclusions erronées dans de nombreuses simulations.

2.9 MODÈLES DE SIMULATION

La sélection de l'approche de la modélisation de la simulation la plus appropriée pour le cas d'étude est souvent tributaire de sa facilité d'utilisation aux dépens des critères d'adéquation ou d'efficacité (Liotta 2012). Nous retrouvons dans la littérature un nombre important d'approches de simulation, nous pouvons en citer quelques unes : la simulation de trafic, la simulation distribuée, la simulation virtuelle, les réseaux de Pétri, la simulation de Monte-Carlo et la simulation intelligente... Dans la suite de cette section, nous allons présenter les modèles de simulation selon la classification de (Law *et al.* 2000). Nous donnerons ensuite plus de détails sur la simulation par événements discrets, la simulation continue, la simulation discrète-continue combinée. Nous détaillerons dans la section suivante la simulation multi-agents qui est le cadre général de notre approche.

(Law *et al.* 2000) classifie les modèles de simulation selon trois dimensions différentes :

- **Modèles de simulation statiques Vs dynamiques.** Un modèle de simulation statique est une représentation d'un système à un moment donné, ou un modèle qui peut être utilisé pour représenter un système dans lequel le temps ne joue tout simplement aucun rôle. Un exemple de simulations statiques est la simulation Monte Carlo. D'un autre côté, un modèle de simulation dynamique représente un système tel qu'il évolue dans le temps, comme un système de convoyage dans une usine.
- **Modèles de simulation déterministes Vs stochastiques.** Si un modèle de simulation ne contient aucune composante probabiliste (c'est-à-dire aléatoire), il est appelé déterministe. Un système compliqué (et insoluble sur le plan analytique) d'équations différentielles décrivant une réaction chimique pourrait être un exemple de ce type de modèles. Dans les modèles déterministes, la sortie est «déterminée» une fois que l'ensemble des entrées et des relations dans le modèle ont été spécifiées, même si cela peut prendre beaucoup de temps de calcul pour évaluer de quoi il s'agit. Cependant, de nombreux systèmes doivent être modélisés comme ayant au moins quelques composantes d'entrée aléatoires, et celles-ci donnent lieu à des modèles de simulation stochastique. La plupart des systèmes de mise en file d'attente et d'inventaire sont modélisés de manière stochastique. Les modèles de simulation stochastique produisent des sorties qui sont elles-mêmes aléatoires et doivent donc être traités uniquement comme une estimation des véritables caractéristiques du modèle.
- **Modèles de simulation continus Vs discrets.** Un modèle discret n'est pas toujours utilisé pour modéliser un système discret, et

vice versa. La décision d'utiliser un modèle discret ou continu pour un système particulier dépend des objectifs spécifiques de l'étude. Par exemple, un modèle de flux de trafic sur une autoroute serait discret si les caractéristiques et le mouvement des voitures individuelles sont importants. Alternativement, si les voitures peuvent être traitées «dans l'ensemble», le flux de trafic peut être décrit par des équations différentielles dans un modèle continu. Ces deux modèles de simulation seront détaillés d'avantage dans la suite de cette section.

2.9.1 Simulation par événements discrets (Discrete Event Simulation, "DES")

La simulation à événements discrets est historiquement la plus commune. Elle concerne la modélisation d'un système tel qu'il évolue dans le temps par une représentation dans laquelle les variables d'état changent instantanément à des moments distincts. (En termes plus mathématiques, nous pourrions dire que le système ne peut changer qu'à un nombre fini de points dans le temps). Ces points dans le temps sont ceux pendant lesquels un événement se produit. Un événement est défini comme une occurrence instantanée qui peut changer l'état du système. Bien que la simulation d'événements discrets puisse conceptuellement être effectuée par des calculs manuels, la quantité de données qui doivent être stockées et manipulées pour la plupart des systèmes du monde réel impose que les simulations d'événements discrets soient effectuées sur un ordinateur.

2.9.2 Simulation continue

Elle concerne la modélisation dans le temps d'un système par une représentation dans laquelle les variables d'état changent continuellement par rapport au temps. En règle générale, les modèles de simulation continue impliquent des équations différentielles qui donnent des relations pour les taux de changement des variables d'état avec le temps. Si les équations différentielles sont particulièrement simples, elles peuvent être résolues analytiquement pour donner les valeurs des variables d'état pour toutes les valeurs de temps en fonction des valeurs des variables d'état au temps 0. Cependant, la distinction la plus importante est que la simulation continue utilise des mises à jour calculées par équation pour les variables d'état, tandis que la simulation par événement discrets planifie des événements pour mettre à jour les variables d'état.

2.9.3 Simulation discrète-continue combinée

Étant donné que certains systèmes ne sont ni complètement discrets ni complètement continus, il peut être nécessaire de construire un modèle avec des aspects à la fois d'événement discret et de simulation continue, résultant en une simulation discrète-continue combinée. (Pritsker 1984) décrit les trois types fondamentaux d'interactions qui peuvent se produire entre des variables d'état à changement discret et à changement continu :

- Un événement discret peut provoquer une modification discrète de la valeur d'une variable d'état continue.

- Un événement discret peut entraîner le changement de la relation régissant une variable d'état continu à un moment donné.
- Une variable d'état continu atteignant une valeur de seuil peut provoquer la survenue ou la planification d'un événement discret.

2.10 SIMULATION MULTI-AGENTS

Il y a eu un grand intérêt pour la simulation multi-agents (Agent-Based Simulation "ABS") dans la communauté DES depuis (au moins) 2005 et la "Winter Simulation Conférence", bien que l'intérêt général pour l'ABS remonte beaucoup plus loin. Cependant, nous avons constaté qu'il n'y avait pas de définition généralement acceptée de la simulation multi-agents. En outre, il y avait un grand nombre de termes que l'on associaient souvent à l'ABS (par exemple, systèmes adaptatifs complexes et émergence), et il n'était pas du tout clair lesquels étaient vraiment au cœur de l'ABS. Nous présentons dans ce qui suit quelques définitions que nous avons trouvées dans la littérature.

Ainsi, (Law *et al.* 2000) définit une simulation à base d'agents comme une simulation par événements discrets (DES) où les entités (agents) interagissent en fait avec d'autres entités et leur environnement de manière majeure. Il affirme que la simulation multi-agents est une variation du DES, car dans pratiquement toutes les simulations multi-agents existantes, les changements d'état se produisent à un nombre dénombrable de points dans le temps. Cette position sur la relation entre ABS et DES est soutenue par plusieurs auteurs comme (Beeker & Page 2006) et (Macal & North 2014).

(Ferber 1999) identifie la simulation multi-agent comme l'un des principaux domaines d'application des agents. Pour lui, Les systèmes multi-agents apportent une solution radicalement nouvelle au concept même de modèle et de simulation dans les sciences de l'environnement, en offrant la possibilité de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions. Il donne la définition suivante dans (Ferber 1995) : " La simulation multi-agents est fondée sur l'idée qu'il est possible de représenter sous forme informatique le comportement des entités qui agissent dans le monde et qu'il est ainsi possible de représenter un phénomène comme le fruit des interactions d'un ensemble d'agents disposant de leur propre autonomie opératoire."

Comme nous l'avons indiqué dans la section 2.7.4, on utilise parfois le terme de "simulation individu-centrée" pour bien indiquer que les représentations dans l'ABS se situent au niveau de l'individu, ces derniers interagissant aussi bien entre eux qu'avec l'environnement simulé. Ce sont des constructions de "micro-mondes artificiels", dont il est possible de contrôler toutes les caractéristiques et de reproduire des séries d'expérimentations comme s'il s'agissait de situations de laboratoire. On se trouve donc en présence d'une modélisation analogique, semblable aux maquettes de format réduit utilisées en aéronautique ou en construction navale, la différence essentielle provenant du fait que le modèle réduit est exprimé sous la forme d'une entité informatique et non d'une structure physique.

De ce fait, l'utilisateur d'un tel simulateur a un rôle actif. Il emploie un système multi-agents comme s'il s'agissait d'un laboratoire miniature, déplaçant des individus, changeant leur comportement et modifiant les conditions environnementales. Chaque agent est évidemment "marqué" comme pourrait l'être un être naturel, mais ce marquage est évidemment plus facile, puisque l'individu peut être suivi à tout moment dans son évolution et avec le degré de finesse désiré. On exploite alors les capacités des ordinateurs pour traiter les données obtenues, les agréger et les exploiter à l'aide de techniques statistiques afin de vérifier les hypothèses émises. Ainsi, à la différence des approches classiques, la simulation multi-agents ne se réduit pas à l'implémentation d'un modèle puis à l'analyse de la réponse de ce modèle en fonction des paramètres d'entrées, mais participe au processus de recherche de modèles (Ferber 1995).

Les principales qualités des modélisations multi-agents sont leur capacité d'intégration et leur flexibilité. En effet, il est possible d'intégrer dans la même modélisation des variables quantitatives, des équations différentielles, et des comportements fondés sur des règles symboliques. Il est aussi très facile d'intégrer des modifications, chaque enrichissement du modèle étant réalisé par l'adjonction de règles comportementales qui agissent au niveau de l'individu. De plus, les individus étant toujours distingués les uns des autres, il est possible d'ajouter de nouveaux types d'agents disposant de leur propre modèle de comportement, qui viennent interagir avec les agents déjà définis (Ferber 1995).

Enfin, les systèmes multi-agents permettent la modélisation de situations complexes dont les structures globales émergent des interactions entre individus, c'est-à-dire de faire surgir des structures du niveau macro à partir de modélisations du niveau micro, brisant ainsi la barrière des niveaux, si criante dans les modélisations classiques. C'est dans ce contexte que nous avons employé les SMA. En effet la maintenance d'éoliennes offshore est catégorisée comme étant un système complexe (Shafiee 2015b).

2.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cadre qui nous a permis de développer notre approche. Dans un premier temps, nous avons présenté le concept d'agent. Nous nous sommes ensuite attachés à décrire les systèmes multi-agents ainsi que leurs propriétés. Dans les sections 2.7 et 2.8, nous abordons la modélisation et la simulation des systèmes complexes. Ainsi, nous avons introduit les notions de système, système complexe, modèle et modélisation. Cela nous a permis de présenter la problématique de la modélisation et de la simulation de notre système. Pour finir, nous présentons différents modèles de simulation tout en nous concentrons sur la simulation multi-agents.

La maintenance des éoliennes offshore est un système complexe impliquant plusieurs paramètres dynamiques. Les exigences de tels systèmes ont prouvé l'obsolescence des approches traditionnelles de modélisation et de simulation, car celles-ci reposent sur des structures centralisées et rigides et manquent de flexibilité. Afin de surmonter ce problème, nous proposons dans notre travail d'adopter une approche basée sur des systèmes multi-agents.

ÉTAT DE L'ART SUR LES APPROCHES DE SIMULATION MULTI-AGENTS ET DE MAINTENANCE DES PARCS ÉOLIENS OFFSHORE

3

SOMMAIRE

3.1	INTRODUCTION	62
3.2	APPROCHES DE SIMULATION BASÉ SUR LA SIMULATION MULTI-AGENTS	62
3.3	MAINTENANCE D'ÉOLIENNE OFFSHORE	65
3.4	PROBLÈME D'ORDONNANCE DE LA MAINTENANCE ET DU ROUTAGE	66
3.4.1	Optimisation de l'ordonnancement	66
3.4.2	Route optimale pour la maintenance	67
3.5	CONCLUSION	73

3.1 INTRODUCTION

Une grande variété d'approches et de modèles a été développée afin d'accomplir la maintenance des éoliennes offshore. La gestion de la maintenance est non seulement importante, mais elle constitue également un problème complexe. Les exploitants de parcs éoliens doivent tenir compte de la disponibilité de diverses ressources telles que les pièces de rechange, le personnel qualifié approprié, ainsi que des conditions météorologiques, tout en minimisant les perturbations de la production d'énergie et en réduisant les coûts de maintenance (Kovacs *et al.* 2011). Pour faire face à ce problème, plusieurs recherches se sont concentrées sur différents aspects de la maintenance des parcs éoliens. L'optimisation du routage et de l'ordonnancement sont parmi les problèmes les plus traités en recherche. Ce chapitre donne un aperçu de travaux existants sur des applications de la simulation multi-agents dans différents domaines avant de s'orienter vers la maintenance des parcs éoliens offshore, l'optimisation de l'ordonnancement de la maintenance et se termine en mettant l'accent sur l'optimisation du routage pour la maintenance des parcs éoliens offshore.

3.2 APPROCHES DE SIMULATION BASÉ SUR LA SIMULATION MULTI-AGENTS

Les approches de simulation multi-agents "ABS" sont soumises à une utilisation intensive dans l'analyse de systèmes complexes. En fait, la technologie multi-agents doit son succès à une capacité efficace de modélisation et de résolution de problèmes complexes à partir du monde réel (Buşoniu *et al.* 2010). La simulation multi-agents est de plus en plus utilisée dans plusieurs domaines. Nous citons dans cette section des travaux dans lesquelles les multi-agents sont utilisés pour la simulation.

Les recherches de (Zhou *et al.* 2016) ont impliqué l'utilisation d'une approche de modélisation et de simulation multi-agents pour construire un modèle de simulation des émissions régionales de carbone en Chine pour analyser les politiques liées au contrôle total des émissions, l'attribution des quotas d'émission, les enchères de quotas d'émission et les amendes pour émissions excessives. Les auteurs évaluent comment les politiques pertinentes de réduction des émissions de carbone affectent les émissions annuelles totales réelles.

(Hörl 2017) présentent une approche de simulation multi-agents pour capturer l'interaction dynamique entre une flotte de véhicules autonomes et une population de personnes artificielles basée sur un cadre de simulation de trafic multi-agents établi. Le cadre de simulation à base d'agents permet de simuler l'interaction dynamique entre les voyageurs et les moyens de transport fournis dans un scénario de trafic.

(Badsı *et al.* 2018) ont développé un simulateur multi-agents basé sur la plate-forme d'agent MaDKit. Ses recherches visent à évaluer l'impact de l'utilisation d'une ontologie sur les performances de l'entreprise. Une expérimentation de base a été réalisée en se concentrant sur la gestion de la relation client et sur une ontologie du modèle d'affaires.

(Fragapane *et al.* 2019) introduisent un modèle de simulation multi-

agents utilisant l'historique généré par un véhicule automatisé dans un hôpital pour analyser l'état du système de livraison de marchandises et les contre-mesures potentielles pour améliorer la logistique interne. L'objectif est d'étudier les impacts de l'environnement hospitalier et des caractéristiques des véhicules à guidage automatique sur les performances logistiques hospitalières.

(Leng & Corman 2020) proposent une description mathématique des effets de la disponibilité de l'information sur les passagers. Sur la base de différentes informations, les comportements des passagers sont simulés pour évaluer les avantages de la disponibilité des informations dans les perturbations des transports publics. Une approche de simulation multi-agents est appliquée pour la ville de Zurich, en Suisse, pour étudier les comportements des passagers lors des perturbations des transports publics. Plusieurs scénarios sont simulés pour étudier les choix d'itinéraires des agents en cas de perturbation des transports publics.

(Bezzaoucha *et al.* 2021) ont développé un simulateur multi-agents qui permet de représenter le comportement d'une éolienne dans différents scénarios de pannes en tenant compte de l'impact des dépendances stochastiques entre les composants, des conditions météorologiques et de la configuration du système. Une comparaison entre les paramètres de fiabilité est effectuée dans les deux conditions (composants dépendants et indépendants). Les résultats obtenus montrent l'utilité de considérer l'existence de dépendances stochastiques lors de la prédiction et de l'optimisation de la fiabilité et de la disponibilité des éoliennes.

Les systèmes multi-agents apportent une nouvelle solution au concept de modèle et de simulation dans différents domaines. La simulation multi-agents permet aux chercheurs de faire varier les conditions d'expérimentation et ainsi de vérifier la pertinence des approches proposées même pour des systèmes complexes. Le tableau 3.1 présente une comparaison entre les travaux que nous avons présenté sur la simulation multi-agents. Nous pouvons voir que les domaines d'application de l'ABS sont très variés. Cette revue sur les approches de l'ABS n'a pas pour but d'être exhaustive, nous n'avons évidemment présenté que quelques exemples d'utilisation possible de la simulation multi-agents. Les environnements de simulation à base d'agents sont très nombreux et le tableau 3.1 n'en présente que quelques uns. Nous présenterons plusieurs plate-formes de simulation multi-agents dans le chapitre 6 et nous donnerons plus de détails sur NetLogo qui est la plate-forme que nous utilisons pour notre approche. Dans notre travail, nous utilisons l'ABS pour simuler le fonctionnement d'un parc éolien offshore. Nous utilisons ce paradigme pour réduire la complexité de notre système et introduire plus d'intelligence dans le comportement des agents.

Travaux	Domaine d'application	Environnement de simulation	Objectif
(Zhou <i>et al.</i> 2016)	Émissions de carbone	AnyLogic	Un modèle de simulation des émissions régionales de carbone en Chine pour analyser les politiques liées au contrôle total des émissions, l'attribution des quotas et les enchères d'émission.
(Hörl 2017)	Véhicules autonomes	MATSim	Capturer l'interaction dynamique entre une flotte de véhicules autonomes et une population de personnes artificielles.
(Badsı <i>et al.</i> 2018)	Entreprise	MaDKit	Évaluer l'impact de l'utilisation d'une ontologie sur les performances de l'entreprise.
(Fragapane <i>et al.</i> 2019)	Logistique d'hôpital	AnyLogic	Étudier les impacts de l'environnement hospitalier et des caractéristiques des véhicules à guidage automatique sur les performances logistiques hospitalières.
(Leng & Corman 2020)	Transport publique	MATsim	Les comportements des passagers sont simulés pour évaluer les avantages de la disponibilité des informations dans les perturbations des transports publics.
(Bezzaoucha <i>et al.</i> 2021)	Éolienne offshore	NetLogo	Représenter le comportement d'une éolienne dans différents scénarios de pannes

TABLE 3.1 – Tableau comparatif entre les approches de simulation multi-agents

3.3 MAINTENANCE D'ÉOLIENNE OFFSHORE

Ces dernières années, l'industrie éolienne a pris conscience de l'importance de la maintenance sur la viabilité des projets actuels et futurs. Pour une durée de vie de 20 ans, les coûts d'exploitation et de maintenance d'une éolienne de 750 KW représentent environ 25 à 30 % du coût total de production d'énergie (Milborrow 2006) et 75 à 90 % des coûts d'investissement (Vachon 2002).

Les nouveaux parcs éoliens ont généralement une plus grande capacité et comprennent plus d'éoliennes. Les données collectées par (Tavner *et al.* 2008) suggèrent que les grandes éoliennes sont plus susceptibles de tomber en panne et nécessitent plus de maintenance. La réduction des coûts de maintenance est devenue de plus en plus importante, d'autant plus que la taille et le nombre d'éoliennes continuent d'augmenter. Dans ce contexte, la maintenance des éoliennes représente un axe de recherche actif sur différentes problématiques.

(Nilsson & Bertling 2007) ont effectué une analyse du coût du cycle de vie (Life Cycle Cost "LCC") pour deux études de cas avec des stratégies où les systèmes de surveillance de l'état "Condition Monitoring Systems" ont amélioré la planification de la maintenance. Les résultats montrent que les CMS améliorent la gestion de la maintenance des systèmes éoliens, en particulier pour la planification de la maintenance des parcs éoliens offshore.

(Nielsen & Sørensen 2011) présentent une étude où ils évaluent le coût d'une éolienne offshore à un seul composant. Les coûts de deux stratégies de maintenance sont comparés : la maintenance conditionnelle et la maintenance corrective. L'influence de différents paramètres est évaluée, y compris le taux de défaillance, la fiabilité des inspections, l'intervalle d'inspection et la règle de décision pour les réparations.

(Márquez *et al.* 2012) fournissent un aperçu de l'état de l'art en matière de surveillance de l'état des éoliennes, décrivant les différentes stratégies de maintenance, techniques et méthodes de surveillance d'état et soulignent dans un tableau les différentes combinaisons de maintenances qui ont été rapportées dans la littérature.

(Dinwoodie *et al.* 2013) ont développé un modèle combiné d'aide à la décision opérationnel et stratégique pour les opérations dans les parcs éoliens offshore. Le but du modèle est de permettre aux développeurs et aux opérateurs d'explorer divers scénarios d'exploitation attendus au cours de la durée de vie du projet afin de déterminer les stratégies d'exploitation optimales et les risques associés. Les résultats ont été utilisés en conjonction avec les réseaux de croyances bayésiennes et les arbres de décision afin de produire des profils de risque qui fournissent les coûts attendus, permettant une meilleure compréhension de la probabilité que des coûts inattendus soit générés et les incertitudes représentant les risques les plus importants.

(Zhu *et al.* 2019) proposent un regroupement de maintenances dynamique de plusieurs systèmes en pannes avec plusieurs actions de maintenance. L'approche est basée sur un modèle d'évaluation pour une sélection proactive de la meilleure stratégie de regroupement pour effectuer la maintenance des parcs éoliens offshore.

L'optimisation de la maintenance des éoliennes est un problème récurrent qui est abordé de différentes manières dans la littérature (Dahane *et al.* 2017). La plupart des travaux présentés minimisent les coûts en utilisant différentes stratégies de maintenance. Nous ferons une comparaison à la fin de ce chapitre entre les différents travaux que nous présentons, en tenant compte des stratégies de maintenance.

3.4 PROBLÈME D'ORDONNANCE DE LA MAINTENANCE ET DU ROUTAGE

La planification de la maintenance des parcs éoliens offshore est un problème complexe et difficile (Shafiee 2015b). en effet, plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de la planification des activités de maintenance d'un parc éolien offshore, notamment les conditions météorologiques, la disponibilité de diverses ressources (par exemple, les navires de service, les équipages et les pièces de rechange) ainsi que l'interruption de la production d'électricité (Irawan *et al.* 2017).

3.4.1 Optimisation de l'ordonnement

Dans (Sørensen 2009), une approche pour une planification optimale de l'exploitation et de la maintenance est proposée. Cette approche est basée sur la théorie de la décision bayésienne pré-postérieure et peut être utilisée pour les boîtes à vitesse, les générateurs, les fissures de fatigue, la corrosion, etc.

(Kovacs *et al.* 2011) présentent un système qui effectue la planification de la maintenance dans les parcs éoliens. Le problème d'ordonnement est modélisé et résolu comme un programme linéaire à nombres entiers mixtes.

(Besnard *et al.* 2013) présentent un modèle d'optimisation de l'organisation de la maintenance d'un parc éolien offshore. Le modèle comprend une analyse d'une stratégie de transport utilisant des moyens de transport alternatifs, un modèle de file d'attente des activités de maintenance et un modèle économique de l'organisation de la maintenance. Les résultats montrent le bénéfice des pertes de production des différentes options, ce qui permet d'identifier une organisation optimale de la maintenance basée sur la fiabilité, les coûts logistiques et le prix de l'électricité.

(dos Santos *et al.* 2013) proposent un réseau de Petri stochastique généralisé (generalized stochastic Petri Nets "GSPN") avec des prédicats couplés à une simulation de Monte Carlo pour modéliser le planning de maintenance d'une éolienne offshore. L'approche se révèle efficace pour modéliser la complexité de la maintenance, y compris les problèmes logistiques et les contraintes de conditions météorologiques.

(Nguyen & Chou 2018) proposent une approche pour déterminer les calendriers de maintenance optimaux pour un parc éolien offshore afin de minimiser les coûts de maintenance. Ils utilisent une stratégie de maintenance dynamique pour déterminer un calendrier de maintenance individuel optimal pour chaque composant d'une éolienne offshore. Ensuite, une stratégie d'optimisation de la maintenance regroupée est propo-

sée pour déterminer le calendrier de maintenance groupée. Les résultats montrent que l'approche proposée peut permettre d'économiser jusqu'à 4,56 % sur les coûts de maintenance par rapport au calendrier de maintenance de base.

(Zhong *et al.* 2018) ont développé un modèle de programmation non linéaire multi-objectifs avec treize familles de contraintes adaptées à la maintenance préventive des parcs éoliens offshore. Le but de cet algorithme est de minimiser les coûts de maintenance et de maximiser la fiabilité du système. L'algorithme génétique de tri non dominé II est utilisé et des solutions Pareto-optimales d'ordonnement sont obtenues pour offrir un soutien adéquat aux décideurs.

dans In (Stock-Williams & Swamy 2019), un modèle d'optimisation métaheuristique basé sur un algorithme génétique pour la planification de la maintenance quotidienne des parcs éoliens offshore est développé. La méthodologie décrite est mise en oeuvre et testée à l'aide des données historiques du parc éolien Princess Amalia aux Pays-Bas. Les résultats montrent un avantage financier important.

L'un des défis de la planification et l'ordonnement de la maintenance dans un système complexe consiste à capturer les caractéristiques des performances d'un système et à modéliser les dépendances et la dynamique des interactions entre les différents composants du système (Zio *et al.* 2006). La simulation multi-agents que nous proposons donne la possibilité de saisir la dynamique d'un tel système. De plus, les algorithmes méta-heuristiques sont connus pour donner de bons résultats pour l'optimisation des problèmes d'ordonnement.

3.4.2 Route optimale pour la maintenance

(Zhang 2014) proposent une méthode métaheuristique (Duo-ACO) pour la planification et le routage des ressources de maintenance afin de réduire les coûts d'exploitation et de maintenance. Un concept de «regroupement de maintenance» est appliqué pour permettre des tâches de maintenance de différents types planifiés en même temps. Les résultats montrent que l'approche aide les opérateurs à réduire le temps de planification de l'ordonnement et le routage.

(Dai *et al.* 2015) introduisent une formulation mathématique du problème de routage et d'ordonnement de la maintenance d'une flotte pour les parcs éoliens offshore. L'objectif global est de déterminer les affectations optimales des éoliennes et des routes aux navires en termes de coût. Le résultat de l'étude de cas montre une optimisation des coûts.

(Stålhane *et al.* 2015) étudient le problème de la recherche des itinéraires et de l'ordonnement d'une flotte de navires pour la maintenance d'un parc éolien offshore. Ils ont présenté deux modèles mathématiques, l'un basé sur l'arc-flow et l'autre basé sur le path-flow. Les expériences montrent que le modèle de path-flux avec l'algorithme d'étiquetage résout le problème avec une solution quasi-optimale avec un effort de calcul significativement plus petit que celui du modèle arc-flow.

Dans (Dawid *et al.* 2017), une nouvelle méthode heuristique est proposée pour le problème de l'optimisation du routage des navires pour les parcs éoliens offshore. L'optimisateur IBM CPLEX a été choisi comme

référence pour évaluer la méthodologie proposée. Il a été démontré que la méthode proposée produisait systématiquement des politiques quasi-optimales en quelques secondes, même le cas de problèmes avec 15 à 20 éoliennes nécessitant une intervention de maintenance.

(Raknes *et al.* 2017) proposent un nouveau modèle mathématique qui considère comment les tâches de maintenance doivent être planifiées et exécutées par des techniciens transportés à l'aide d'une flotte de navires dédiés. Le modèle est nouveau dans le fait qu'il combine le modélisation de plusieurs quarts de travail et l'inclusion des navires qui peuvent rester en mer pendant plusieurs quarts de travail, tout en gérant de grandes tâches de maintenance et un calcul précis des coûts des temps d'arrêt. Une simulation est utilisée pour évaluer les performances du modèle dans sa forme pure, ainsi que lorsqu'il est résolu de manière heuristique à l'aide d'une heuristique d'horizon glissant. Les résultats indiquent que les effets de fin d'horizon de la formulation mathématique sont gérés efficacement. Des expériences informatiques illustrent également comment le modèle mathématique couplé à la simulation peut être utilisé pour évaluer des décisions stratégiques concernant la composition d'une flotte de navires utilisée pour exécuter des tâches de maintenance.

(Irawan *et al.* 2017) proposent un modèle d'optimisation du routage et de la planification de la maintenance pour les parcs éoliens offshore. Le modèle trouve l'optimisation optimal pour la maintenance des éoliennes et les itinéraires optimaux pour les navires de transfert d'équipage à l'aide d'un algorithme basé sur la méthode de décomposition de Dantzig–Wolfe. Un modèle de programme linéaire entier est ensuite proposé pour trouver la configuration d'itinéraire optimale ainsi que les calendriers de maintenances qui minimisent les coûts d'entretien, y compris les frais de déplacement, de technicien et les pénalités. Les expériences montrent que l'approche proposée trouve des solutions optimales dans des temps de calcul raisonnables.

(Schrotenboer *et al.* 2018) abordent la problématique proposée par (Irawan *et al.* 2017) considérant le partage de techniciens entre plusieurs parcs éoliens. Ils étudient le partage des techniciens entre les parcs éoliens sur plusieurs périodes, tout en déterminant les itinéraires des navires par période pour la livraison et la prise en charge des techniciens. Le problème peut être considéré comme une nouvelle variante du problème de ramassage et de livraison multi-périodes multi-produits. Une heuristique de recherche de voisinage adaptative "ALNS" est développée et permet d'obtenir des solutions de haute qualité, et souvent optimales, sur des instances de référence de la littérature. L'heuristique est utilisée pour explorer les avantages de différentes politiques de partage. les auteurs apportent un éclairage sur l'impact du partage des techniciens dans le cadre des différentes politiques d'allocation des techniciens par simulation. Pour cela, il font varier les paramètres de la disposition géographique des parcs éoliens, des bases O&M et des caractéristiques de maintenance en réalisant une simulation Monte-Carlo qui intègre le ALNS pour l'estimation des coûts de maintenance et d'acheminement attendus. Les résultats ont montré qu'en partageant les techniciens, la flexibilité de la planification quotidienne est améliorée et les coûts de maintenance attendus sont réduits. En outre, la flexibilité accrue entraîne moins de voyages de navires

et augmente la capacité du décideur à faire face aux scénarios extrêmes rencontrés dans la planification de la maintenance à court terme.

(Fan *et al.* 2019) proposent une optimisation heuristique hybride du routage et de la planification de la maintenance pour les parcs éoliens offshore. Ils mélangent l'optimisation à essaims de particules (mix particle swarm optimization "MPSO") qui est utilisée pour cartographier la relation entre les navires et les parcs éoliens, avec une recherche discrète de la meute de loups (discrete wolf pack search "DWPS") appliquée pour optimiser l'itinéraire de maintenance. Les résultats montrent une optimisation du coût et donnent des arrangements détaillés, qui peuvent être utilisés pour la planification de la maintenance.

Dans un autre travail, (Irawan *et al.* 2019) proposent une méthode d'optimisation basée sur une méta-heuristique de recherche de grand voisinage (Large Neighbourhood Search "LNS") combinée à une simulation de Monte Carlo, pour résoudre le problème de routage de maintenance déterministe dans un parc éolien offshore. Ce travail nous intéresse particulièrement car c'est le seul à notre connaissance à avoir combiné l'optimisation et la simulation dans le cadre de la maintenance des éoliennes offshore. Ainsi, les auteurs développent un algorithme d'optimisation basé sur la simulation pour faire face aux incertitudes des activités de maintenance. Le modèle d'optimisation du problème de routage de maintenance déterministe (MRP) pour un parc éolien offshore est développé sur la base du modèle proposé par (Stålhane *et al.* 2015). Dans le modèle d'optimisation stochastique proposé, les auteurs considèrent plusieurs paramètres incertains, dont le temps de parcours du navire, le temps nécessaire pour la maintenance d'une éolienne et le temps de transfert des techniciens et des équipements vers l'éolienne. L'algorithme LNS proposé permet de résoudre le modèle déterministe pour trouver l'itinéraire de chaque navire pour visiter les éoliennes. Lors de la résolution de ce problème déterministe, les paramètres stochastiques sont transformés en leurs homologues déterministes. Une fois la route de chaque navire déterminée, la simulation de Monte Carlo est utilisée pour obtenir une estimation du coût total de maintenance prévu en tenant compte des paramètres stochastiques. La simulation de Monte Carlo est un processus itératif où à chaque itération, des nombres aléatoires sont générés pour représenter les paramètres stochastiques. Les auteurs proposent pour chaque itération, un coût de pénalité de navire pour les navires qui reviennent en retard.. Par conséquent, un paramètre supplémentaire est ajouté pour représenter le coût horaire de pénalité du navire pour le navire en retard. En d'autres termes, le problème stochastique a deux types de coût de pénalité. Le premier coût de pénalité est le coût de pénalité pour le fait de ne pas avoir visiter les éoliennes tandis que le second est pour les navires qui reviennent en dehors de la fenêtre météo / horaire. Les coûts totaux produits par l'algorithme d'optimisation basé sur la simulation sont légèrement supérieurs à ceux produits par le modèle MRP déterministe. Cependant, les solutions sur le modèle stochastique sont plus réalistes car des conditions incertaines sont prises en compte. De plus, une simulation de Monte Carlo est proposée pour prédire la défaillance des éoliennes. Sur la base des résultats de cette simulation, les auteurs obtiennent des informations sur les éoliennes qui

ont une forte probabilité de tomber en panne. Ces éoliennes sont alors considérées pour construire une solution de routage plus robuste.

Travaux	Méthode	Type de maintenance	Objectif
(Nilsson & Bertling 2007)	Analyse du coût "LLC"	Préventive, Corrective.	Optimisation de la gestion de la maintenance pour parcs éoliens offshore et onshore.
(Nielsen & Sørensen 2011)	Modèle mathématique	Corrective, Conditionnelle.,	Évaluation et comparaison du coût de deux stratégies de maintenance dans un OWF
(Márquez <i>et al.</i> 2012)	État de l'art	Préventive, Corrective, Conditionnelle.	Aperçu de l'état de l'art en matière de surveillance de l'état des éoliennes
(Dinwoodie <i>et al.</i> 2013)	Modèle d'aide à la décision, Réseaux bayésiens, Arbres de décision.	Non spécifié	Permettre aux opérateurs d'explorer divers scénarios d'exploitation attendus au cours de la durée de vie d'un OWF afin de déterminer les stratégies d'exploitation optimales et les risques associés.
(Zhu <i>et al.</i> 2019)	Modèle de panne	Préventive, Corrective.	Regroupement de maintenances pour la planification des tâches de maintenance dans un OWF
(Sørensen 2009)	Décision bayésienne pré-postérieure	Préventive, Corrective, Basée sur le risque.	planification optimale de l'exploitation et de la maintenance d'un parc éolien offshore.
(Kovacs <i>et al.</i> 2011)	Modèle mathématique	Préventive, Corrective, Conditionnelle.	Planification de la maintenance dans un parc éolien onshore.
(Besnard <i>et al.</i> 2013)	Optimisation, Modèle mathématique.	Préventive, Corrective.	Organisation optimale de la maintenance basée sur la fiabilité, les coûts logistiques et le prix de l'électricité.

(dos Santos <i>et al.</i> 2013)	Réseau de Petri "GSPN", Simulation.	Préventive, Corrective.	Une étude comparative entre plusieurs stratégies de maintenance. Modélisation efficace de l'ordonnancement de maintenance en prenant compte des problèmes logistiques et des conditions météo.
(Nguyen & Chou 2018)	Modèle mathématique	Non spécifié	Déterminer un planning de maintenance optimal pour un parc éolien offshore afin de minimiser les coûts.
(Zhong <i>et al.</i> 2018)	Optimisation méta-heuristique "NSGA-II"	Préventive	Optimisation de l'ordonnancement pour minimiser les coûts de maintenance et de maximiser la fiabilité d'un OWF.
(Stock-Williams & Swamy 2019)	Optimisation méta-heuristique "GA"	Non spécifié	Optimisation de la planification de la maintenance quotidienne des parcs éoliens offshore.
(Zhang 2014)	Optimisation méta-heuristique "Duo-ACO"	Non spécifié	Regroupement des maintenances et optimisation du routage des bateaux et de l'ordonnancement de la maintenance pour une réduction des coûts.
(Dai <i>et al.</i> 2015)	Modèle mathématique	Non spécifié	Déterminer les affectations optimales des éoliennes et des routes aux navires en termes de coût.
(Stålhane <i>et al.</i> 2015)	Modèle mathématique : Arc-flow, Path-flow	Préventive, Corrective.	Optimisation de l'acheminement et la planification des navires qui effectuent des tâches de maintenance dans les parcs éoliens offshore.

(Dawid <i>et al.</i> 2017)	Heuristique	Non spécifié	Optimisation du routage des navires pour les parcs éoliens offshore.
(Raknes <i>et al.</i> 2017)	Modèle mathématique, Simulation.	Préventive, Corrective	Modèle d'optimisation du planning de maintenance et du problème de routage prenant en compte de multiples quarts de travail
(Irawan <i>et al.</i> 2017)	Optimisation Dantzig–Wolfe	Préventive, Conditionnelle.	Un modèle d'optimisation pour l'acheminement et la planification de la maintenance dans les parcs éoliens offshore
(Schrotenboer <i>et al.</i> 2018)	Heuristique "ALNS", Simulation.	Planifiée	Optimiser conjointement l'affectation quotidienne des techniciens aux bases O&M et les itinéraires quotidiens des navires transportant ces techniciens vers les parcs éoliens offshore.
(Fan <i>et al.</i> 2019)	Optimisation "MPSO" & "DWPS"	Planifiée.	Optimisation heuristique hybride du routage et de la planification de la maintenance pour les parcs éoliens offshore.
(Irawan <i>et al.</i> 2019)	Simulation, Optimisation.	Préventive, Corrective.	Un algorithme basée sur une recherche de grand voisinage est combiné à une simulation Monte Carlo pour résoudre le problème de routage de maintenance déterministe dans un parc éolien offshore.
(Allal <i>et al.</i> 2021a)	Simulation multi-agents, Optimisation "ACS".	Préventive, Corrective, Conditionnelle.	Simulation optimisation du routage de la maintenance dans un parc éoliens offshore.

TABLE 3.2 – Tableau comparatif entre les approches de maintenance d'éoliennes offshore

Le tableau 3.2 représente un récapitulatif et une comparaison entre les travaux de maintenance d'éoliennes que nous avons présenté. Nous nous intéressons à 3 aspects en particulier lors de la comparaison : la méthode utilisée pour arriver à l'objectif, l'objectif et les types de maintenance abordés. Nous pouvons remarquer que différentes méthodes ont été utilisées au cours de ces années dans le cadre de la gestion de la maintenance dans les parcs éoliens offshore. Certains auteurs ne spécifient pas le type de maintenance qu'ils abordent, ne considérant ainsi que la notion de maintenance à proprement parlé. D'autres auteurs choisissent de travailler sur des maintenances planifiées avec un benchmark défini à l'avance. d'un autre côté, (Sørensen 2009) introduit la notion de maintenance basée sur le risque, qui est d'ailleurs l'objet de son approche. Nous constatons dans le reste des travaux que plusieurs combinaisons de type de maintenance sont abordées selon les travaux. Seul une étude en plus d'un état de l'art aborde les maintenances préventives, correctives et conditionnelles en même temps. (Kovacs *et al.* 2011) utilisent dans leurs travaux les trois types de maintenance, néanmoins, leur approche est orientée vers les parcs onshore. Nous adoptons dans notre approche une stratégie hybride combinant maintenance conditionnelle, préventive et corrective.

Tous les travaux présentés visent à définir un planning optimal d'opération de maintenance pour les parcs éoliens offshore. Les problèmes de routage en maintenance ont été étudiés par plusieurs travaux de recherche, mais seuls quelques-uns parmi eux ont pris en compte l'effet des conditions météorologiques et la limitation des moyens de transport. De plus, seuls (Irawan *et al.* 2019) ont utilisé la simulation pour calculer avec précision les paramètres opérationnels de l'algorithme d'optimisation. A notre connaissance, aucun travail n'a envisagé une approche intégrée de Simulation-optimisation pour définir simultanément le routage et la planification des opérations de maintenance dans un parc éolien offshore. De plus, aucun article n'a envisagé une interaction dynamique entre différents éléments du système et l'observation des performances pendant tout le cycle de vie du parc qui peut être fournie par la simulation multi-agents.

3.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons commencer par présenter quelques travaux sur la simulation multi-agents appliquée à différents domaines avant de dresser un état de l'art sur les approches de gestion de la maintenance des parcs éoliens offshore. Nous avons fait une classification de ces approches selon l'objectif abordé (Optimisation de l'ordonnancement, Optimisation du routage), la méthode utilisée pour atteindre l'objectif ainsi que les types de maintenances abordés. Nous présentons dans le chapitre suivant notre modélisation et simulation multi-agents pour la gestion de la maintenance d'un parc éolien offshore.

MODÉLISATION ET SIMULATION À BASE D'AGENTS POUR LA GESTION DE LA MAINTENANCE DES ÉOLIENNES OFFSHORE

4

SOMMAIRE

4.1	INTRODUCTION	75
4.2	ARCHITECTURE MULTI-AGENTS	76
4.2.1	Agents "Éolienne"	76
4.2.2	Agents "Maintenance"	81
4.2.3	Agents "Ressource"	81
4.2.4	Agent "Météo"	82
4.2.5	Agent "Monitoring"	82
4.3	FORMULATION DU PROBLÈME	83
4.4	MODÈLE DE COÛT	85
4.5	PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION DANS LE MODÈLE MULTI- AGENTS	87
4.6	CONCLUSION	88

4.1 INTRODUCTION

La maintenance des parcs éoliens offshore est un système complexe qui implique un grand nombre de paramètres, y compris les ressources matérielles et humaines, la météo, les types de maintenances et la vitesse du vent. Ces paramètres doivent être pris en compte par le manager avant de réaliser le plan de maintenance. Plus la maintenance est effectuée au temps opportun, plus les économies sont importantes. Le but de notre travail (Allal *et al.* 2021a) est d'offrir au gestionnaire du parc éolien un outil d'aide à la décision capable de proposer une solution optimale ou quasi optimale (la meilleure décision au meilleur moment).

Dans un premier temps, le système est divisé en plusieurs parties en utilisant une architecture multi-agents pour la modélisation et la simulation du système.

Afin d'obtenir un modèle de simulation plus précis capable de représenter tous les phénomènes intéressants pour l'étude, le pas de simulation est fixé à 15 minutes. Cela permet d'effectuer plusieurs tâches de maintenance au cours de la journée, ce qui était l'une des limites des travaux précédents (Sahnoun *et al.* 2015). De plus, un pas de simulation de 15 minutes nous permet d'effectuer des tournées de maintenance. Nous supposons que le temps moyen de réparation ne peut être inférieur à 15 minutes.

Le développement d'un modèle mathématique du système représentant une longue période de fonctionnement est compliqué en raison de son niveau dynamique élevé et de son comportement incertain, qui peuvent générer un grand nombre de scénarios de simulation possibles. Il est impossible de jouer tous ces scénarios et de les comparer pour sélectionner le meilleur. Pour pallier à ce problème, nous proposons de combiner la simulation et l'optimisation afin de fournir un outil d'aide à la décision plus réaliste capable d'optimiser la décision lors du processus de simulation. Cela permettra aux exploitants d'avoir une visibilité plus précise sur l'état du parc et la maintenance à effectuer. Un algorithme d'optimisation méta-heuristique est proposé pour générer une planification de maintenance optimisée en terme de coût plusieurs fois au cours du processus de simulation.

Nous supposons que le transport des pièces détachées et des équipes de maintenance vers le parc est assuré par une flotte hétérogène de navires. Au début de la planification, toute la flotte est située au port. Il a été prouvé que le regroupement des tâches de maintenance réduit les coûts (Pour & Benlic 2016). L'objectif de l'algorithme d'optimisation est de trouver le meilleur ensemble d'éoliennes à maintenir au cours d'une même tournée. En d'autres termes, trouver le meilleur itinéraire et planifier les éoliennes sélectionnées pour chaque navire, ce qui fournira les ressources nécessaires pour effectuer les tâches de maintenance (Figure 4.1).

La plupart des problèmes de prises de décision associées à ce type de systèmes peuvent être modélisées comme des problèmes d'optimisation combinatoire NP-complet (Juan *et al.* 2015). Les méta-heuristiques sont connues pour être des algorithmes appropriées pour traiter ce genre de problèmes. Comme nous pouvons considérer notre problème comme un problème de routage de véhicules avec ramassage et livraison (VRPDP),

nous avons privilégié l'utilisation d'un algorithme d'optimisation de colonies de fourmis qui sera détaillé dans la section suivante.

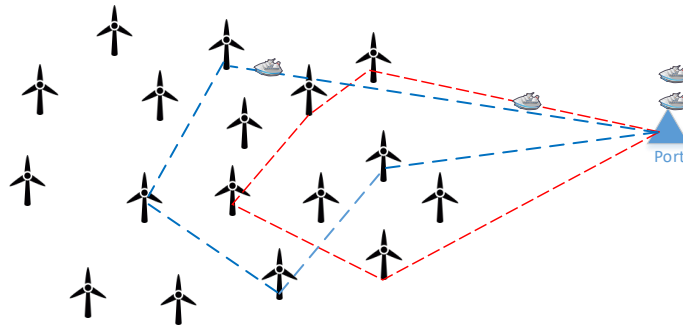


FIGURE 4.1 – Regroupement des tâches de maintenances

4.2 ARCHITECTURE MULTI-AGENTS

La décomposition multi-agents permet à chaque composant d'un système complexe d'être traité individuellement et ainsi d'appréhender plus facilement la complexité du problème (Reddy *et al.* 2017). Notre système a été divisé en cinq parties interconnectées dans un travail précédent (Sahnoun *et al.* 2015), chaque partie étant constituée d'un ou plusieurs agents autonomes. Nous avons considéré les cinq types d'agents suivants :

- Éolienne (plusieurs agents : un agent par éolienne)
- Monitoring (un seul agent)
- Maintenance (plusieurs agents, un agent par type de maintenance. Il peut y avoir des types différents selon les types de maintenances)
- Ressource (un agent par type de ressource : ingénieur, techniciens, bateau, ...)
- Météo (un seul agent)

Les sections suivantes expliquent le comportement, la composition et les interactions de ces agents.

4.2.1 Agents "Éolienne"

Chaque turbine est représentée par un agent indépendant avec plusieurs attributs qui permettent son contrôle et sa surveillance. Nous utilisons un indicateur appelé Equipment Health Factor (EHF) pour suivre la dégradation et la production de chaque turbine. La production d'électricité dépend de plusieurs paramètres dont : le niveau de l'EHF, la vitesse du vent et l'état de la turbine.

La figure (Figure 4.2) présente les paramètres spécifiques à l'agent «Éolienne» et leurs relations. Chaque agent «Éolienne» suit deux règles, à savoir, la dégradation de l'éolienne et la production de l'éolienne, qui sont influencées par plusieurs variables internes (la qualité des composants, la taille de l'éolienne et son âge) et des variables externes qui sont générées par les autres agents :

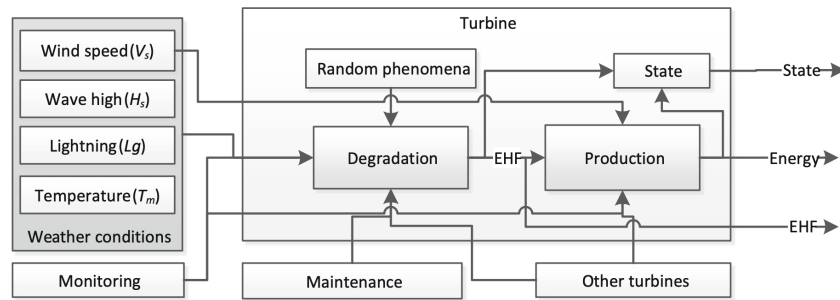


FIGURE 4.2 – La composition et le comportement de l'agent "Éolienne"

- Les conditions météorologiques déterminent l'énergie produite grâce à la vitesse et à la direction du vent. Elle affecte également la dégradation des éoliennes, où les conditions météorologiques sont l'une des principales causes de défaillance des éoliennes.
- L'agent «Maintenance» affecte directement la production et le niveau de dégradation de l'éolienne. En effet, l'éolienne est arrêtée pendant la tâche de maintenance. Cependant, après une tâche de maintenance, l'EHF reprend sa valeur maximale.
- Les autres éoliennes influencent la dégradation et la production de chaque agent «Éolienne» en sachant qu'elles partagent les ressources de maintenance limitées, ce qui influe sur l'activité de maintenance de l'éolienne. L'énergie produite par chaque éolienne est également influencée par l'effet de sillage généré par d'autres éoliennes (Petković *et al.* 2014). Il existe trois principaux modèles d'effet de sillage pour le vent, à savoir le modèle Jensen (Zhang & Wang 2009), le modèle Ainslie (Ainslie 1988) et le modèle Larsen (Larsen 1988). Tous les modèles tiennent compte de la variation de la vitesse du vent ou de la turbulence, mais aucun des modèles d'effet de sillage n'a établi la relation entre la dégradation de l'éolienne et l'effet de perte de sillage. De plus, l'effet de la perte de sillage sur la stratégie de maintenance n'est pas clairement défini dans la littérature (Kim *et al.* 2012). Dans notre travail, nous utilisons la même configuration de parc éoliennes et les mêmes conditions météorologiques, nous n'avons donc pas pris en compte cet effet dans notre modèle.

Production d'énergie

L'énergie produite par une turbine dépend de la vitesse du vent, de l'état de la turbine et de sa capacité de production. On considère plusieurs spécifications techniques associées à la production d'électricité en fonction de la vitesse du vent V_s , notamment :

- V_{cin} le seuil de vitesse du vent représentant la vitesse du vent la plus basse à laquelle l'électricité peut être produite.
- V_{cout} la vitesse du vent de coupure qui est le maximum admissible pour un fonctionnement en toute sécurité. L'éolienne est arrêtée si la vitesse du vent dépasse cette valeur.
- V_r la vitesse nominale du vent qui est la vitesse minimale du vent à laquelle chaque éolienne peut produire son énergie maximale.

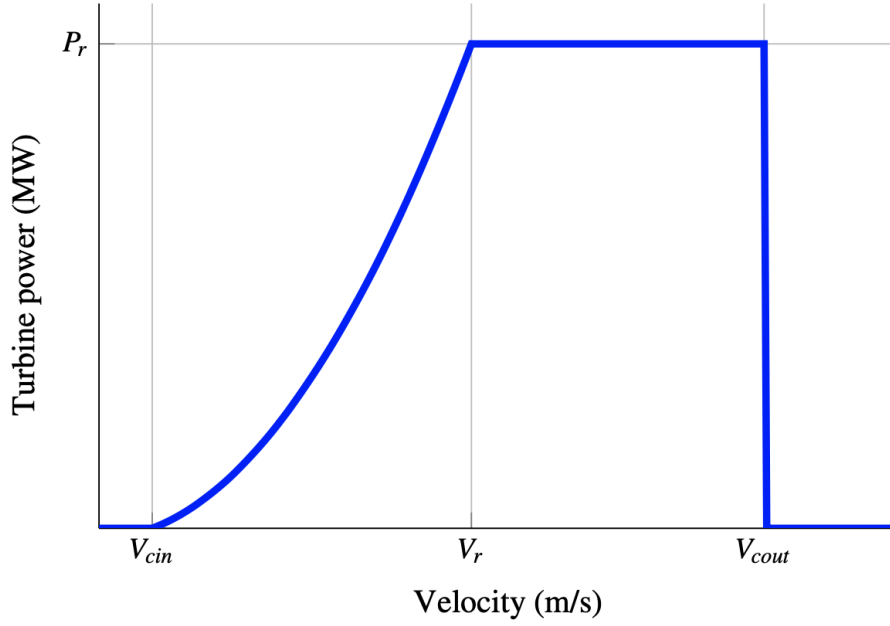


FIGURE 4.3 – La courbe de puissance d'une éolienne avec une production maximale $P_s = 6$ MW

La puissance générée par chaque éolienne suit un modèle classique de la courbe de puissance des éoliennes ((Karki & Patel 2009), (Sahnoun *et al.* 2014)) comme présenté sur la figure 4.3. Selon (Karki & Patel 2009), la puissance générée par une éolienne avec une vitesse du vent V_s est calculée par l'équation suivante :

$$P = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq V_s < V_{cin} \\ p_r \cdot (a + b \cdot V_s + c \cdot V_s^2) & \text{if } V_{cin} \leq V_s < V_r \\ p_r & \text{if } V_r \leq V_s < V_{cout} \\ 0 & \text{if } V_{cout} \leq V_s \end{cases} \quad (4.1)$$

où p_r est la puissance de sortie nominale de l'éolienne. Les paramètres a , b et c dans l'Eq. (4.1) sont obtenus à partir des équations suivantes :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[V_{cin}(V_{cin} + V_r) - 4V_{cin}V_r \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \\ b &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[4(V_{cin} + V_r) \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{cin} + V_r) \right] \\ c &= \frac{1}{(V_{cin} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{cin} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

$$V_s = V_0 * \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (4.3)$$

où :

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

Dégradation et changement d'état

La dégradation des éolienne est causée par plusieurs phénomènes et affecte plusieurs de ses composants. Du point de vue de la fiabilité, les parties de l'éolienne sont connectées en série, ce qui permet l'utilisation d'indicateurs globaux de dégradation, ces indicateurs sont affectés par les causes évoquées dans le chapitre précédent «Les causes de pannes des éoliennes» (Tavner 2012). Nous proposons plusieurs indicateurs de performance tels que le facteur de santé de l'équipement (EHF) et le temps écoulé depuis la dernière inspection ou la dernière maintenance pour estimer le niveau de dégradation de la turbine et définir son état.

L'EHF de chaque éolienne diminue avec le temps en raison de la dégradation et des effets météorologiques. Il varie entre 10 (l'éolienne est neuve ou «comme neuve») et 0 (l'éolienne est en panne). En outre, le modèle de l'EHF prend en compte la dégradation aléatoire due à une mauvaise installation, à la mauvaise qualité des composants de l'éolienne ou même à des événements rares tels que la foudre. Il varie également en fonction de la tâche de maintenance exécutée sur l'éolienne. L'EHF d'une turbine i donnée à l'instant $k + 1$ s'exprime comme suit :

$$EHF_i(k+1) \begin{cases} 0 & \text{if } f_i(k+1) = 1 \\ EHF_{max} & \text{if } M_i(k+1) = 1 \\ \gamma_i(k) * (EHF_i(k) - deg_{td}(k+1) - deg_{tr}(k+1)) & \text{Sinon} \end{cases} \quad (4.4)$$

où :

- $f_i(k+1)$: est la probabilité qu'une panne qui arrête l'éolienne i , se produise à l'instant $k+1$. Elle suit une distribution de probabilité exponentielle avec une moyenne de 5 ans qui représente le temps moyen entre les pannes (Mean Time Between Failures) de l'éolienne. Cette valeur représente une moyenne des pannes imprévues les plus importantes entraînant l'arrêt immédiat de l'éolienne, par exemple en raison de la panne de la boîte de vitesses, des pales de l'éolienne, du générateur ou du système hydraulique. Le calcul est basé sur les données disponibles dans (Burton et al. 2011).
- EHF_{max} : est la valeur de l'EHF lorsqu'une éolienne est neuve. Nous considérons une approche de maintenance «comme neuve» ((Cunha et al. 2004), (Byon et al. 2011), (Gundegjerde et al. 2015)),

c'est-à-dire qu'après une opération de maintenance la turbine devient aussi bonne que si elle été neuve au moins pour sa fonction principale. Dans notre cas, $EHF_{max} = 10$.

- $M_i(k+1)$: est une variable égale à 1 lorsqu'une tâche de maintenance est effectuée sur la turbine i (0 sinon).
- $deg_{td}(k+1)$: est la dégradation en fonction du temps par pas de simulation (15 minutes dans notre cas). Cela dépend de la dernière valeur de $EHF(k)$, où le taux de dégradation est proportionnel à la dégradation de l'éolienne, c'est-à-dire $(EHF_{max} - EHF(k))$. Par conséquent, la dégradation temporelle déterministe est définie comme suit :

$$deg_{td}(k+1) = \phi * (EHF_{max} - EHF(k)) \quad (4.5)$$

où : ϕ est défini empiriquement pour garantir une valeur EHF égale à 0 après 10 ans sans aucun phénomène externe.

- deg_{tr} : est la dégradation aléatoire dépendant de l'environnement par pas de simulation (15 minutes). Il en résulte une distribution uniforme avec les paramètres $a = 0$ et $b = \theta * deg_{td}$. θ représente le rapport maximal entre la dégradation déterministe et aléatoire. Dans cette étude, $\theta = 0$.
- $\gamma_i(k)$: représente le coefficient de l'effet des conditions météorologiques sur la dégradation de la turbine, il s'exprime comme suit :

$$\gamma_i(k) = \gamma_i^{Tm}(k) * \gamma_i^v(k) * \gamma_i^{lg}(k) \quad (4.6)$$

où :

$$\gamma_i^{Tm}(k) = \begin{cases} \gamma_i^{Tm} & \text{si la température degrade l'eolienne } i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\gamma_i^v(k) = \begin{cases} \gamma_i^v & \text{si la vitesse du vent degrade l'eolienne } i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\gamma_i^{lg}(k) = \begin{cases} \gamma_i^{lg} & \text{si la foudre degrade l'eolienne } i \\ 1 & \text{sinon} \end{cases}$$

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

$$\begin{aligned} EHF_{aprs\ effet\ du\ vent} &= \gamma_i^{Tm}(k) * \gamma_i^v(k) * \gamma_i^{lg}(k) * EHF_{avant\ effet\ du\ vent} \\ &= 1 * \gamma_v * 1 * EHF_{avant\ effet\ du\ vent} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Nous considérons que les conditions météorologiques peuvent dégrader l'éolienne si elles dépassent les valeurs nominales, c'est-à-dire $V_s > V_r$, $T_m < 0$ °C ou $T_m > 40$ °C. Dans le cas d'un coup de foudre, plusieurs éoliennes sont dégradées. L'EHF diminue avec le

temps et également en raison de changements aléatoires dus à l'effet des conditions météorologiques ou à des défaillances internes. Après chaque tâche de maintenance, l'EHF est rétabli à 10 (max). Chaque éolienne peut être dans l'une des situation suivantes (état) en fonction de son niveau de dégradation et de son fonctionnement :

- Situation 1 : $6 \leq EHF \leq 10$: le mode d'opération est "Normal".
- Situation 2 : $1 \leq EHF \leq 6$: le mode d'opération est "Dégradé".
- Situation 3 : $EHF \leq 1$: le mode d'opération est "En panne".

4.2.2 Agents "Maintenance"

L'agent de maintenance représente une équipe de maintenance en fonctionnement. Il est créé par l'agent "Monitoring" lorsque l'équipe de maintenance est composée. Il est éliminé lorsque l'équipe revient au port. Pendant la fenêtre de temps de travail, l'équipe de maintenance peut exécuter, au cours d'une même tournée, plusieurs types d'opérations de maintenance, telles que :

- Maintenance préventive systémique (SM) : elle est réalisée selon un calendrier défini et lorsque les conditions météorologiques le permettent. Si nous avons un modèle de dégradation régulier, cette stratégie est la plus efficace. Souvent, les lubrifiants et autres composants, tels que les joints et les flexibles, ont une durée de vie prévue de moins d'un an et sont remplacés. De plus, des inspections régulières sont effectuées pendant la maintenance préventive.
- Maintenance préventive conditionnelle (CBM) : il s'agit d'une stratégie pilotée par des informations sur les performances de l'éolienne fournies par le système de surveillance. Cette stratégie est généralement utilisée conjointement avec un arbre de défaillances pour diagnostiquer les causes profondes. Il est recommandé de profiter des maintenances conditionnelles (CBM) pour exécuter les tâches prévues pour la maintenance systémique.
- Maintenance corrective (CM) : ce type de maintenance est effectué pour réparer une panne significative lorsque l'éolienne est arrêtée. Il s'agit d'une stratégie très coûteuse qui nécessite du matériel important (ex : sous-traitants, grands bateaux, grandes grues). Par conséquent, cette stratégie n'est pas recommandée. Dans notre modèle, cette stratégie n'est utilisée que si l'éolienne est cassée.

Une tournée planifiée est définie par un algorithme d'optimisation exécuté par l'agent "Monitoring".

4.2.3 Agents "Ressource"

Nous considérons deux types de ressources pour la maintenance des éoliennes offshore. Les ressources humaines sont représentées par deux agents, à savoir les ingénieurs et les techniciens. La différence entre un ingénieur et un technicien réside dans le coût de chaque agent et le type de tâches effectuées par chacun. Les agents matériels sont les bateaux et les grues. Nous supposons que les agents "bateaux" ont des caractéristiques différentes en termes de capacité, de vitesse et de fiabilité, tandis

que les agents grues ont des caractéristiques similaires. L'agent ressource est composé d'un ensemble de deux techniciens, un ingénieur, un bateau contenant les pièces de rechange nécessaires et une grue capable de soulever 50 tonnes.

4.2.4 Agent "Météo"

Les variations des conditions météorologiques sont représentées par l'agent «météo». Il est caractérisé par la vitesse du vent, la hauteur des vagues, la foudre et la visibilité. Ces paramètres sont fournis par des données historiques réelles ou par une distribution statistique appropriée avec des paramètres adaptés en fonction des saisons.

4.2.5 Agent "Monitoring"

L'agent "monitoring" est l'agent le plus complexe de notre système multi-agents. En effet, il est en charge de coordonner le lancement de la maintenance et de l'établissement des plans de tournées. Le fonctionnement de cet agent a radicalement changé par rapport aux travaux précédents de (Dahane *et al.* 2017) (Sahnoun *et al.* 2015). Tout d'abord, l'agent de monitoring surveille le parc afin de détecter les pannes en fonction des règles suivantes :

- Si la date de la dernière maintenance dépasse le paramètre de maintenance préventive systémique défini (période entre deux maintenances), effectuer une maintenance systémique.
- Si l'EHF de la turbine atteint un seuil défini, effectuer une maintenance conditionnelle.
- Si la turbine tombe en panne, effectuer une maintenance corrective.

En cas de détection d'une panne, l'agent crée des équipes de maintenance via l'agent «maintenance» et démarre la tâche de maintenance. Contrairement au modèle proposé par (Sahnoun *et al.* 2015), où chaque équipe de maintenance est responsable d'effectuer une seule tâche de maintenance, le modèle actuel suppose qu'il est plus intéressant de saisir l'opportunité de maintenir une éolienne pour entretenir d'autres éoliennes voisines, même si ces derniers ne nécessitent pas nécessairement une maintenance immédiate. Ce qui signifie qu'une fois qu'une opération de maintenance est lancée, nous en profitons pour améliorer l'état des autres éoliennes. Le temps moyen de réparation (MTTR) de chaque type de maintenance est défini au hasard avec une distribution normale comme suit :

- La "maintenance corrective" suit une distribution normale avec une moyenne de 4 heures et un écart type de 1 heure
- La "maintenance conditionnelle" suit une distribution normale avec une moyenne de 3 heures et un écart type de 1 heure
- La "maintenance systémique" suit une distribution normale avec une moyenne de 2 heures et un écart type de 1 heure

La durée totale d'une tournée est limitée à 8 heures, ce qui représente une journée de travail complète pour les ingénieurs et techniciens en Algérie. Cela permet la maintenance de 2 à 5 éoliennes lors d'un tour.

Une fois qu'une éolienne est sélectionnée pour une maintenance, une

optimisation méta heuristique basée sur l'algorithme Ant Colony System (ACS) est lancée pour trouver le meilleur itinéraire en tenant compte de l'état des autres éoliennes, de la date de leur prochain entretien et de la distance nécessaire pour effectuer une tournée. L'objectif est de sélectionner un ensemble d'éoliennes à maintenir avec celle qui a été sélectionnée dans la première étape. Le fonctionnement de l'algorithme développé est expliqué dans les sections suivantes.

4.3 FORMULATION DU PROBLÈME

Dans ce travail, nous considérons plusieurs équipes de maintenance qui effectuent des tâches de maintenance sur des parcs éoliens offshore. Lors de chaque visite, les équipes visitent plusieurs éoliennes pour la maintenance et reviennent au port. Pour maintenir ces éoliennes, nous devons concevoir des itinéraires pour une flotte de K bateau de K accosté dans le port. Ce nombre change pendant la simulation, où il est possible d'atteindre la valeur maximale de K ou moins si certains bateaux sont déjà en tournée de maintenance. Nous supposons une flotte de bateaux homogène. Chaque itinéraire doit commencer au port, visiter un sous-ensemble d'éoliennes et retourner au port. Les éoliennes concernées par la maintenance ne peuvent être visitées qu'une seule fois au cours d'un même tournée. Chaque équipe de maintenance a une durée maximale de travail de 8 heures par jour limitant le nombre d'éoliennes à maintenir lors d'une tournée. Nous représentons le problème à l'aide d'un graphe orienté complet : $G = (V, A)$. Où V est l'ensemble des noeuds associés aux éoliennes ($noeud_1, \dots, noeud_n$) et au port $noeud_0$ et $noeud_{n+1}$. Nous utilisons deux noeuds pour représenter un déplacement de maintenance et imposons que toutes les routes doivent commencer par le $noeud_0$ et revenir à $noeud_{n+1}$. L'ensemble des arcs A représente les arêtes entre les éoliennes dans une tournée de maintenance. Chaque noeud a un coût de voyage associé c_{ij} , pour $(i, j) \in A$ supposé le même pour chaque bateau. La valeur de ce coût dépend des paramètres des éoliennes et des équipes de maintenance.

Le modèle peut être formulé comme suit :

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{n+1} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k c_{ij} \quad (4.8)$$

Sujet à :

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in V \text{ avec } 1 < j < n \quad (4.9)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in V \text{ avec } 1 < i < n \quad (4.10)$$

$$\sum_{\substack{i=0 \\ i \neq h}}^n x_{ih}^k - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq h}}^{n+1} x_{hj}^k = 0 \quad \forall h \in V \text{ avec } 1 < h < n; \forall k \in K \text{ avec } 1 < k < K \quad (4.11)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1}^{n+1} x_{ij}^k d_{ij} + \sum_{j=1}^{n+1} y_j^k m_j \leq D \quad \forall k \in K \text{ avec } 1 < k < K \quad (4.12)$$

$$\sum_{j=0}^n y_j^k b_j \geq 1 \quad \forall k \in K \text{ avec } 1 < k < K \quad (4.13)$$

$$D - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k d_{ij} + \sum_{j=0}^n y_j^k m_j \leq \min_{j \in V} (m_j) \quad \forall k \in K \text{ avec } 1 < k < K \quad (4.14)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq K \quad (4.15)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, k \in K \quad (4.16)$$

$$y_j^k \in \{0, 1\} \quad \forall j \in V, k \in K \quad (4.17)$$

Où :

- D : La durée de travail des équipes de maintenance au debut de la tournée.
- d_{ij} : Durée du trajet de l'éolienne i à l'éolienne j .
- m_j : Durée de la tâche de maintenance j .
- b_j : est une variable d'état binaire indiquant si l'éolienne j a besoin d'une intervention de maintenance urgente. c'est-à-dire qu'elle nécessite une maintenance corrective ou que ses indicateurs de maintenance préventive dépassent le seuil définis.
- x_{ij}^k : une variable de décision binaire permettant d'affecter une tâche de maintenance à un plan.

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si le bateau } k \text{ se deplace de l'eolienne } i \text{ a l'eolienne } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- y_j^k : une variable de décision binaire indiquant si l'éolienne j est incluse dans la tournée.

$$y_j^k = \begin{cases} 1 & \text{si l'eolienne } j \text{ est prevue pour la maintenance} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction objectif (4.8) vise à minimiser le coût total des déplacements des routes. Les contraintes (4.9) et (4.10) garantissent que chaque éolienne n'est maintenue qu'une seule fois au cours de la même tournée. La contrainte (4.11) garantit le bon flux des bateaux à travers les arcs, en déclarant que si un bateau arrive à un noeud $h \in V$, alors il doit partir de ce noeud. La contrainte (4.12) garantit que la durée de la tournée est inférieure à la durée de travail des équipes de maintenance. La contrainte (4.13) garantit qu'au moins une maintenance urgente est effectuée pendant la tournée exécuté par le bateau k . La contrainte (4.14) permet de continuer à effectuer des tâches de maintenance tant qu'il est possible d'effectuer une maintenance supplémentaire dans le temps de travail restant. La contrainte (4.15) limite le nombre maximum de routes à K , le nombre de bateaux disponibles sur la côte. Les contraintes 4.16 et 4.17 définissent la nature binaire de la variable de décision.

4.4 MODÈLE DE COÛT

Nous avons pris en compte un grand nombre de paramètres lors du calcul du coût. Lors du lancement d'une opération de maintenance, nous incluons deux coûts, le coût de création de l'équipe de maintenance et le coût des différentes opérations de maintenance. Le coût de maintenance est calculé en utilisant la même méthode pour les approches heuristiques et ACS. La maintenance corrective est considérée comme la plus coûteuse suivie de la maintenance conditionnelle et enfin de la maintenance systémique; selon (Rademakers *et al.* 2003). La formation d'une équipe de maintenance est également coûteuse, cependant, on observe une différence entre les deux approches utilisées pour ce paramètre, c'est-à-dire que pour l'approche heuristique une équipe est formée pour chaque opération de maintenance tandis que pour l'approche ACS, une équipe est formée pour toute la tournée. Cela signifie qu'une seule équipe sera formée pour effectuer toute la maintenance de la tournée. Nous supposons que les ressources humaines (techniciens et ingénieurs) sont rémunérées à la journée (8 heures de travail) et que la location des ressources matérielles se fait de la même manière (bateaux et grues). Le coût d'une panne est calculé selon la même méthode pour les deux approches. En fait, une éolienne arrêtée entraîne des pertes soit en raison d'une panne, soit pendant l'opération de maintenance. Une éolienne arrêtée est considérée comme source de perte puisqu'elle ne génère pas de profit. Le coût total (CT) de la maintenance sur une période donnée (période de simulation) peut être exprimé comme suit :

$$CT = C_{init} + \sum_{k=1}^{k=T} CT(k) \quad (4.18)$$

$$CT(k) = \sum_{te=1}^{te=st} C_{tour}(k, te) + \sum_{tr=1}^{tr=NT} (C_{down}(tr, k) + C_{deg}(tr, k)) \quad (4.19)$$

Où,

- C_{init} : le coût d'installation du système de surveillance pour la maintenance conditionnelle. Nous supposons que ce coût est égal à zéro lorsque la maintenance conditionnelle n'est pas utilisée. Dans notre cas, nous adoptons une stratégie de maintenance hybride.
- NT : le nombre d'éoliennes dans le parc éolien offshore considéré.
- T : la période totale de simulation.
- st : le nombre d'équipes au départ pendant la période $[k - 1, k]$, qui dépend des besoins en maintenance.
- $C_{down}(tr, k)$: le coût de la perte d'énergie due à l'arrêt de l'éolienne pour maintenance ou à cause d'une défaillance d'une éolienne tr à l'instant k .il peut être exprimé comme suit :

$$C_{down}(tr, k) = P_e(tr, k) \cdot Down(tr, k) \quad (4.20)$$

- $P_e(tr, k)$: est le profit généré par la turbine tr à l'état normal pendant la période $[k - 1, k]$ correspondant à un pas de simulation. Ce bénéfice dépend de la variation du vent pendant la période correspondante.

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

$$Down(tr, k) = \begin{cases} 1 & \text{si l'éolienne tombe en panne à l'instant } k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.21)$$

- $C_{deg}(tr, k)$: le coût de la perte d'énergie due au fonctionnement en mode dégradé de l'éolienne tr pendant la période $[k - 1, k]$. Il peut être exprimé comme suit :

$$C_{deg}(tr, k) = P_e(tr, k) \cdot Deg(tr, k) \quad (4.22)$$

- $Deg(tr, k)$: le coût de l'énergie perdue due à la dégradation de l'éolienne tr pendant la période $[k - 1, k]$. Il peut être exprimé comme suit :

$$Deg(tr, k) = \frac{EHF_{max} - EHF(tr, k)}{EHF_{max}} \quad (4.23)$$

- $C_{tour}(k, te)$: est le coût des actions de maintenance effectuées par l'équipe te lancée pendant la période $[k - 1, k]$. L'équipe n'effectue qu'une seule action de maintenance si l'approche heuristique est appliquée et un ensemble d'actions de maintenance dans le cas de l'algorithme ACS. Ce coût peut être exprimé comme suit :

$$C_{tour}(k, te) = (1 - X_{ACS}) \cdot RC_H(k, te) + X_{ACS} \cdot RC_{ACS}(k, te) + Nbr_{sm}(k, te) \cdot C_{sm} + Nbr_{cbm}(k, te) \cdot C_{cbm} + Nbr_{cm}(k, te) \cdot C_{cm} \quad (4.24)$$

- X_{ACS} : est une variable binaire qui détermine l'algorithme que nous utilisons et est définie comme suit :

$$X_{ACS} = \begin{cases} 1 & \text{si l'algorithme sélectionné est l'ACS.} \\ 0 & \text{si l'algorithme sélectionné est l'heuristique.} \end{cases}$$

- $RC_{ACS}(k, te)$: le coût des ressources humaines, des tâches de gestion de la composition des équipes et des ressources matérielles pour toutes les équipes lancées pendant la période $[k - 1, k]$ y compris le carburant, les bateaux et les grues, dans le cas de l'utilisation de l'algorithme ACS.
- $RC_H(k, te)$: le coût des ressources humaines, des tâches de gestion de la composition de l'équipe et des ressources matérielles pour toutes les opérations de maintenance effectuées au cours de la période $[k - 1, k]$ y compris le carburant, les bateaux et les grues. il est moins coûteux dans le cas où l'algorithme heuristique est utilisé, par rapport à l'utilisation de l'algorithme ACS.
- $Nbr_{sm}(k, te)$, $Nbr_{cbm}(k, te)$ and $Nbr_{cm}(k, te)$: sont respectivement le nombre de maintenance systémique, conditionnelle et corrective lancée pendant la période $[k - 1, k]$. Les variables sont binaires dans le cas de l'algorithme heuristique. Une tâche de maintenance peut être effectuée pendant une sortie dans le cas de l'algorithme heuristique alors que, dans le cas de l'ACS, plusieurs types de maintenance peuvent être exécutés pendant une tournée.
- C_{sm} , C_{cbm} and C_{cm} : sont respectivement le coût de la maintenance systémique, conditionnelle et corrective. Il comprend le coût des pièces de rechange.

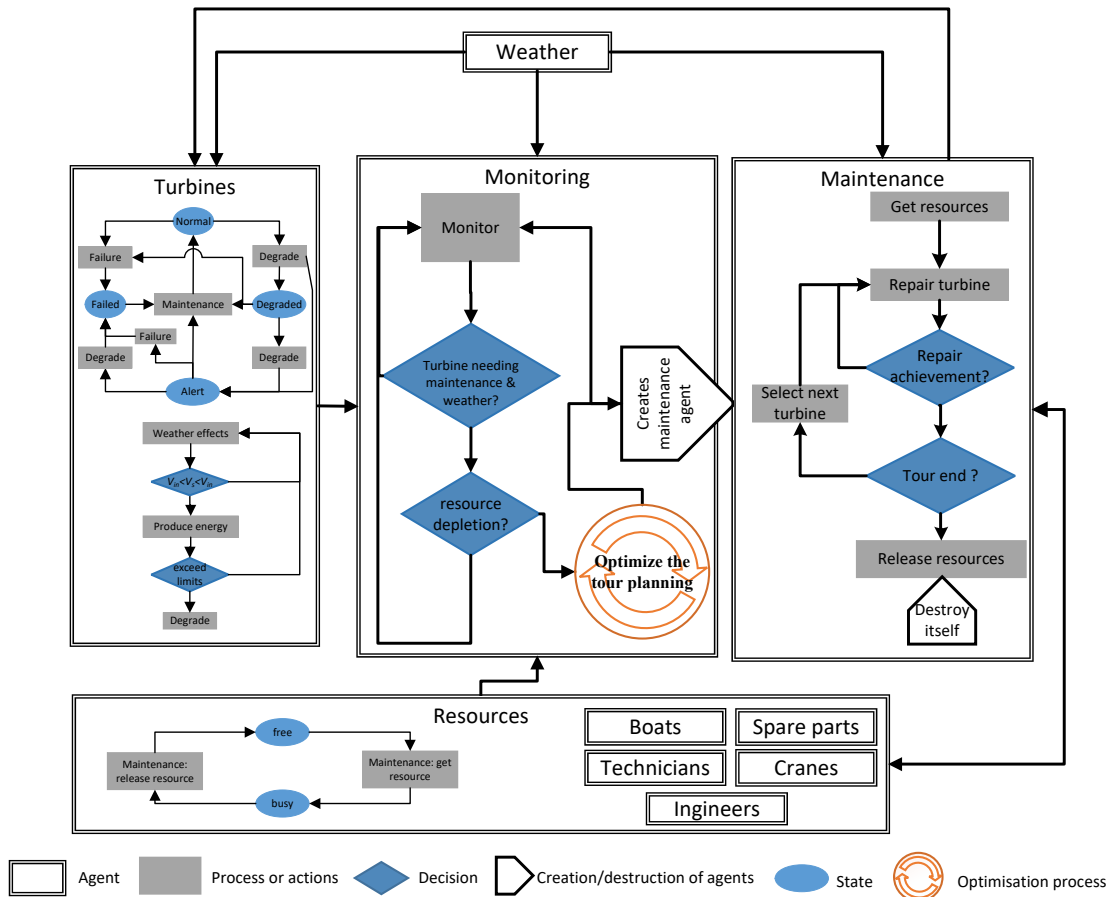


FIGURE 4.4 – diagramme de fonctionnement global

4.5 PROCESSUS DE PRISE DE DÉCISION DANS LE MODÈLE MULTI-AGENTS

La figure 4.4 montre les relations entre les agents et les décisions prises par chaque agent dans notre modèle. L'agent "Éolienne" : "Turbines" produit de l'énergie et se dégrade sous l'effet de l'agent "Météo" : "Weather", s'use et est également sujet à des pannes inattendues. L'agent "Monitoring" évalue tous les états des éoliennes et signale ceux qui sont en panne ou doivent être entretenus. Ensuite, l'agent établit un plan de tournée à l'aide de l'algorithme d'optimisation ACS et sélectionne les éoliennes à maintenir pendant la tournée ainsi que le type de maintenance à effectuer sur chaque éolienne. Le processus d'optimisation est illustré par un cercle dans l'agent "Monitoring". Si les conditions météorologiques de l'agent «Météo» sont appropriées et les ressources disponibles de l'agent «Maintenance» suffisantes, les éoliennes sont réparées par les agents «Maintenance» en changeant l'état de l'agent «Éolienne» en «aussi bon que neuf». Lorsque l'opération de maintenance est terminée, les ressources sont restituées avant l'autodestruction de l'agent «Maintenance». Les agents «Resource» sont alors mis à disposition et attendent une nouvelle demande de nouveaux agents «Maintenance».

4.6 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre notre modèle multi-agents pour la gestion de la maintenance d'éoliennes offshore. Comme nous l'avons constaté dans les chapitres précédents, Le gestion de la maintenance des parcs éoliens offshore constitue un système complexe et la modélisation et simulation multi-agents conviennent parfaitement à ces systèmes. Nous avons ainsi capté via notre modèle un grand nombre d'interactions de notre système. Nous avons également présenté une formulation mathématique de notre problème ainsi que le modèle de coût que nous utilisons dans notre simulation. Nous avons terminer ce chapitre en présentant les processus de prise de décisions dans notre modèle qui représente l'ensemble des interactions possibles entre nos agents. Nous présentons dans le chapitre suivant l'optimisation à base de colonie de fourmis que nous avons combiné avec notre simulation multi-agents dans notre approche.

OPTIMISATION DU ROUTAGE ET DE L'ORDONNANCEMENT DE LA MAINTENANCE : APPROCHE À BASE DE COLONIES DE FOURMIS

5

SOMMAIRE

5.1	INTRODUCTION	90
5.2	LES MÉTA-HEURISTIQUES	90
5.3	ALGORITHME DE COLONIES DE FOURMIS "ANT COLONY OPTI- MIZATION"	92
5.4	APPROCHE D'OPTIMISATION : "ANT COLONY SYSTEM"	93
5.4.1	Définition des phéromones et informations heuristiques	94
5.4.2	Règle de transition d'état de l'ACS	95
5.4.3	Mise à jour locale des phéromones	95
5.4.4	Mise à jour globale des phéromones	96
5.4.5	L'implémentation de l'ACS	96
5.5	CONCLUSION	97

5.1 INTRODUCTION

Une méta-heuristique est une méthode générique pour la résolution de problèmes combinatoires. La résolution de ces problèmes nécessite l'examen d'un très grand nombre (exponentiel) de combinaisons. Cette méthode s'est développée de manière spectaculaire depuis sa création au début des années 80. Les méta-heuristiques ont été conçues pour attaquer des problèmes d'optimisation complexes où les heuristiques classiques et d'autres méthodes d'optimisation n'ont pas réussi à être efficaces.

Les méta-heuristiques comprennent : la programmation logique de contrainte, les algorithmes génétiques, les procédures de recherche adaptative aléatoires gourmands (GRASP), les réseaux de neurones, les stratégies de recherche non-monotones, le recuit simulé, la recherche tabou, les algorithmes de seuil et de leurs hybrides. Ils ne sont pas limités à cela. Ces techniques sont basées sur des concepts empruntés à l'évolution biologique, à la résolution intelligente de problèmes, aux mathématiques, à la physique, au système nerveux et à la mécanique statistique. Cela explique le fait que les scientifiques de l'intelligence artificielle, de l'informatique et de la recherche opérationnelle réclament l'appartenance de cette méthode à leur discipline.

Un grand nombre de problèmes industriels sont confrontés au phénomène d'explosion combinatoire à cause du nombre de paramètres qui entrent en jeu et qui augmentent considérablement les combinaisons possibles. La maintenance des éoliennes offshore fait partie de ces problèmes.

L'optimisation méta-heuristique offre des solutions de haute qualité dans un effort de calcul raisonnable, pour des applications importantes dans l'entreprise, l'ingénierie, l'économie et les sciences. Trouver des solutions exactes pour ces applications reste toujours un véritable défi en dépit de l'impact des récents progrès de la technologie informatique et de la grande interaction entre l'informatique, les sciences de fonctionnement et de gestion de la recherche et des mathématiques.

5.2 LES MÉTA-HEURISTIQUES

Le terme « méta-heuristique » a d'abord été utilisé par (Lauriere 1978) pour définir un langage et un programme pour énoncer et résoudre des problèmes combinatoires. (Glover 1989) et (Hertz & de Werra 1990) ont utilisé ce terme pour décrire la recherche tabou.

Définition : Une méta-heuristique est un processus de génération itératif qui guide et modifie les heuristiques subordonnées en combinant intelligemment différents concepts pour explorer et exploiter l'espace de recherche en utilisant des stratégies d'apprentissage adaptées pour structurer l'information de la mémoire afin de trouver efficacement des solutions presque optimales.

Cette définition est basée sur (Osman & Laporte 1996), (Osman & Kelly 1997) et (Voß *et al.* 2012). Elle peut être résumée ainsi : une méta-heuristique est un processus maître qui guide et modifie les opérations d'heuristiques subordonnées pour produire des solutions de haute qualité de manière efficace. On peut manipuler de manière itérative une solution complète

(ou incomplète), un ensemble de solutions ou une collection d'heuristiques subordonnées. L'heuristique subordonnée peut être une procédure de haut (ou bas) niveau, une simple recherche locale, une procédure d'optimisation classique ou juste une méthode de construction. En bref, une méta-heuristique peut être considérée comme un cadre pour générer de nouveaux algorithmes approximatifs et efficaces pour les problèmes d'optimisation difficile.

Les méta-heuristiques peuvent être classées en trois catégories sans compter leurs hybrides (Osman 2004). La première est celle des méta-heuristiques orientées construction qui comprennent : les procédures de recherche adaptative aléatoire gourmande, la recherche de programmation de mémoire adaptative aléatoire gourmande (GRAMPS), l'optimisation de colonies de fourmis, la programmation de mémoire adaptative. La deuxième catégorie est celle des méta-heuristiques orientées recherche de voisinage, qui comprennent le recuit simulé, les méthodes bruyantes, les méthodes de recherche locale guidées, de recherche locale réitérées, les réseaux de neurones, la recherche tabou et la recherche à voisinage variable. La troisième catégorie est celle des méta-heuristiques orientées population, comprend les algorithmes évolutionnaires, algorithmes génétiques, les chemins de rétablissement de liens, et la recherche de points. La dernière catégorie est celle des méta-heuristiques hybrides. Cependant, Les méta-heuristiques n'étant pas, a priori, spécifiques à la résolution de tel ou tel type de problème, leur classification reste assez arbitraire. Ces classes ne sont pas mutuellement exclusives et de nombreux algorithmes méta heuristiques combinent des idées de classes différentes.

En résumé les différents algorithmes méta-heuristiques peuvent être classés en fonction du problème posé (figure 5.1).

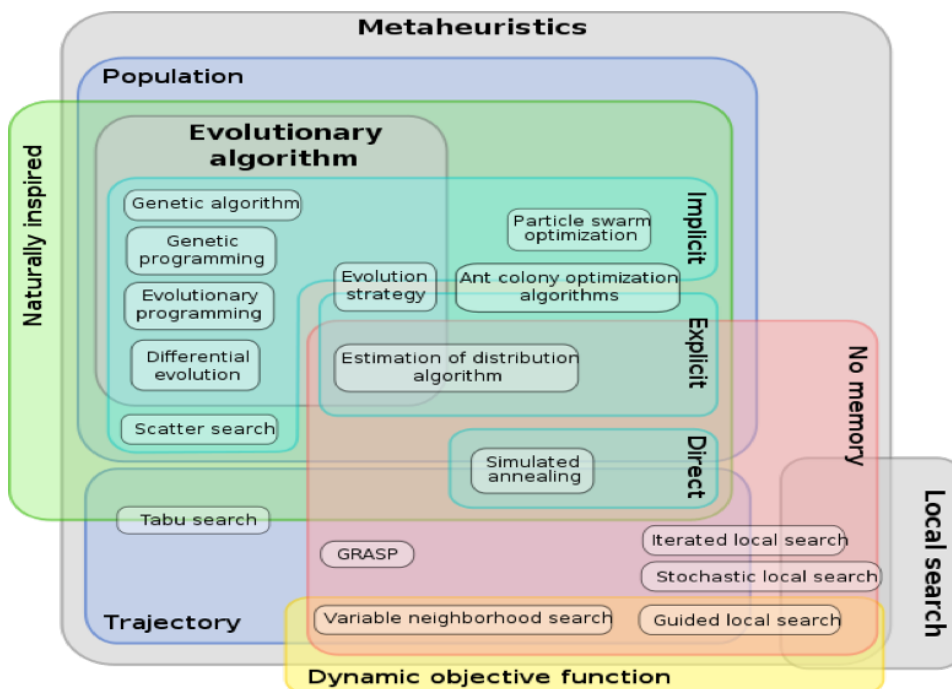


FIGURE 5.1 – Les différentes classifications des algorithmes méta heuristiques

Nous présentons dans la section suivante les algorithmes de colonies de fourmis "Ant Colony Optimization" qui sont des algorithmes inspirés

du comportement des fourmis et qui constituent une famille de méta-heuristiques d'optimisation.

5.3 ALGORITHME DE COLONIES DE FOURMIS "ANT COLONY OPTIMIZATION"

Initialement proposé par Marco Dorigo (Dorigo 1992), pour la recherche de chemins optimaux dans un graphe, le premier algorithme de colonie de fourmis s'est inspiré du comportement des fourmis à la recherche d'un chemin entre leur colonie et une source de nourriture. L'idée originale s'est depuis diversifiée pour résoudre une classe plus large de problèmes et plusieurs algorithmes ont vu le jour, s'appuyant sur divers aspects du comportement des fourmis.

D'une façon très générale, les algorithmes de colonies de fourmis sont considérés comme des méta-heuristiques à population, où chaque solution est représentée par une fourmi se déplaçant sur l'espace de recherche. Les fourmis marquent les meilleures solutions, et tiennent compte des marquages précédents pour optimiser leur recherche.

L'origine de l'ACO provient de l'observation de l'exploitation des ressources alimentaires chez les fourmis. En effet, celles-ci, bien qu'ayant individuellement des capacités cognitives limitées, sont capables collectivement de trouver le chemin le plus court entre une source de nourriture et leur nid. Des biologistes ont ainsi observé, dans une série d'expériences menées à partir de 1989, qu'une colonie de fourmis ayant le choix entre deux chemins d'inégale longueur menant à une source de nourriture avait tendance à utiliser le chemin le plus court. Un modèle expliquant ce comportement est illustré dans la (figure 5.2) et décrit dans ce qui suit :

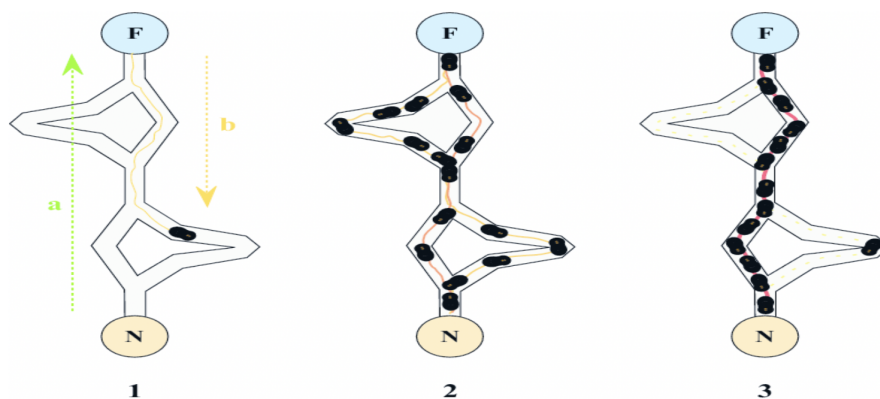


FIGURE 5.2 – Principe de Ant Colony Optimization

1. une fourmi (appelée « éclaireuse ») parcourt plus ou moins au hasard l'environnement autour de la colonie ;
2. si celle-ci découvre une source de nourriture (F), elle rentre plus ou moins directement au nid(N), en laissant sur son chemin une piste de phéromones ;
3. ces phéromones étant attractives, les fourmis passant à proximité

vont avoir tendance à suivre, de façon plus ou moins directe, cette piste ;

4. en revenant au nid, ces mêmes fourmis vont renforcer la piste ;
5. si deux pistes sont possibles pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera, dans le même temps, parcourue par plus de fourmis que la longue piste ;
6. la piste courte sera donc de plus en plus renforcée, et donc de plus en plus attractive ;
7. la longue piste, elle, finira par disparaître, les phéromones étant volatiles ;
8. à terme, l'ensemble des fourmis a donc déterminé et « choisi » la piste la plus courte.

Les fourmis utilisent l'environnement comme support de communication : elles échangent indirectement de l'information en déposant des phéromones, le tout décrivant l'état de leur « travail ». L'information échangée a une portée locale, seule une fourmi située à l'endroit où les phéromones ont été déposées y a accès. Ce système porte le nom de « stigmergie », et se retrouve chez plusieurs animaux sociaux (il a notamment été étudié dans le cas de la construction de piliers dans les nids de termites). Le mécanisme permettant de résoudre un problème trop complexe pour être abordé par des fourmis seules est un bon exemple de système auto-organisé. Ce système repose sur des rétroactions positives (le dépôt de phéromone attire d'autres fourmis qui vont la renforcer à leur tour) et négatives (la dissipation de la piste par évaporation empêche le système de s'emballer). Théoriquement, si la quantité de phéromone restait identique au cours du temps sur toutes les branches, aucune piste ne serait choisie. Or, du fait des rétroactions, une faible variation sur une branche va être amplifiée et permettre alors le choix d'une branche. L'algorithme va permettre de passer d'un état instable où aucune branche n'est plus marquée qu'une autre, vers un état stable où l'itinéraire est formé des « meilleures » branches.

Le comportement collectif des insectes sociaux reste une source d'inspiration pour les chercheurs. La grande diversité d'algorithmes (pour l'optimisation ou non) se réclamant de l'auto-organisation dans les systèmes biologiques a donné lieu au concept d'« intelligence en essaim », qui est un cadre très général, dans lequel s'inscrivent les algorithmes de colonies de fourmis.

5.4 APPROCHE D'OPTIMISATION : "ANT COLONY SYSTEM"

Le problème de routage et de planification des navires de maintenance dans les parcs éoliens offshore peut être considéré comme un routage de véhicule avec problème de ramassage et de livraison "Vehicle Routing with Pick-up and Delivery Problem" (VRPDP) selon (Berbeglia *et al.* 2007). Le VRPDP est souvent classé comme une extension du problème du voyageur de commerce "Travelling Salesman Problem" (TSP) (Berbeglia *et al.* 2007). L'ACS (Ant Colony System) est un algorithme qui s'est avéré efficace et qui donne de bonnes solutions aux problèmes de TSP. Il surpasse d'autres

algorithmes bio-inspirés tels que le recuit simulé et le calcul évolutif (Awad & Elshaer 2019).

L'ACS a été introduit dans (Dorigo & Gambardella 1997) pour améliorer les performances de l'algorithme traditionnel d'optimisation des colonies de fourmis (ACO), également appelé Ant system (AS). L'ACS diffère de l'AS sur trois aspects principaux. Premièrement, L'ACS utilise une règle de choix d'action plus agressive que L'AS. Deuxièmement, des phéromones sont ajoutées uniquement aux arcs appartenant à la meilleure solution globale. Troisièmement, à chaque fois qu'une fourmi utilise un arc (i, j) pour passer de la ville i à la ville j , elle supprime des phéromones de l'arc (Stützle & Dorigo 1999).

5.4.1 Définition des phéromones et informations heuristiques

L'algorithme ACS utilise deux fonctions pour guider la recherche vers la solution optimale du problème.

1. une fonction proportionnelle à la quantité de phéromones déposées ;
2. une information heuristique qui constitue une fonction auxiliaire qui aide à générer de meilleures solutions.

En général, les phéromones sont utilisées pour enregistrer l'historique des recherches et biaiser le comportement de recherche des fourmis à l'avenir. Au départ, nous définissons toutes les valeurs de phéromone sur une valeur initiale τ_0 . Où τ_0 est une petite constante. Comme notre objectif est de minimiser le coût des maintenances et de maximiser la production d'énergie, nous définissons les informations heuristiques η_{ij} pour éviter les pannes d'éoliennes, ce qui génèrent des coûts importants (5.1).

$$\eta_{ij} = \frac{1}{F_{ij}} \quad (5.1)$$

Où,

$$F_{ij} = (EHF_j^2 * Dist_{ij}) + Delay_j + \epsilon \quad (5.2)$$

Nous considérons que l' EHF est le paramètre le plus important pour le processus de sélection de chemin.

Chaque fourmi sélectionne l'éolienne suivante en fonction de la fonction F_{ij} , où l'éolienne j devient importante lorsque la valeur de F_{ij} est proche de zéro.

Le EHF^2 fait que les fourmis s'intéressent en premier à la santé de l'éolienne.

Lorsque deux éoliennes sont en panne ($EHF = 0$), les fourmis ne prendront en compte que le délai d'inspection, qui est la différence entre la date actuelle et la prochaine date d'inspection prévue. Nous supposons que ce délai est toujours positif et que la date d'inspection n'est jamais dépassée. D'un autre coté, la distance ne peut être nulle, de ce fait, quand le $EHF \neq 0$, la distance joue un rôle plus déterminant pour le choix des éoliennes par les fourmis.

Plus le jour d'inspection est proche, plus la valeur de $Delay$ diminue. Pour des raisons de calcul, nous ajoutons une petite valeur ϵ pour éviter la division par zéro lors du calcul.

La valeur de η_{ij} correspond au coût c_{ij} mentionné dans la fonction objectif du modèle d'optimisation (Equation 4.8).

5.4.2 Règle de transition d'état de l'ACS

Dans chaque itération de l'algorithme, un groupe de M fourmis entreprend de construire des solutions. A chaque étape, une fourmi sélectionne une éolienne en fonction des phéromones et des informations heuristiques (Figure 5.3).

Dans l'ACS, les fourmis choisissent la prochaine éolienne en utilisant la règle pseudo-aléatoire proportionnelle T_i^j : une fourmi positionnée sur l'éolienne i choisit de se déplacer vers la turbine j en se basant sur l'équation suivante (Equation (5.3)) :

$$T_i^j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{1 \leq j \leq m_i} \tau_{ij}(t) \cdot [\eta_{ij}]^\beta & \text{if } q < q_0 \\ \text{Roulette-wheel-scheme} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.3)$$

Où :

- q est un nombre aléatoire uniformément distribué dans $[0,1]$,
- $q_0 \in [0,1]$ est un paramètre qui définit l'importance de l'exploitation par rapport à l'exploration.
- α and β sont des paramètres qui déterminent l'importance relative des informations heuristiques et du niveau de phéromone.

Si $q < q_0$ les fourmis vont choisir l'éolienne avec le $\tau_{ij}(t) \cdot [\eta_{ij}]^\beta$ maximum sélectionnant ainsi le meilleur déplacement possible (exploitation), tandis que dans le cas contraire, la méthode de sélection "roulette wheel scheme" sera utilisée. Ainsi, le choix de la route se fait selon la règle de transition probabiliste $p_{ij}^k(t)$ donnée par l'équation (5.4)(exploration).

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} \quad (5.4)$$

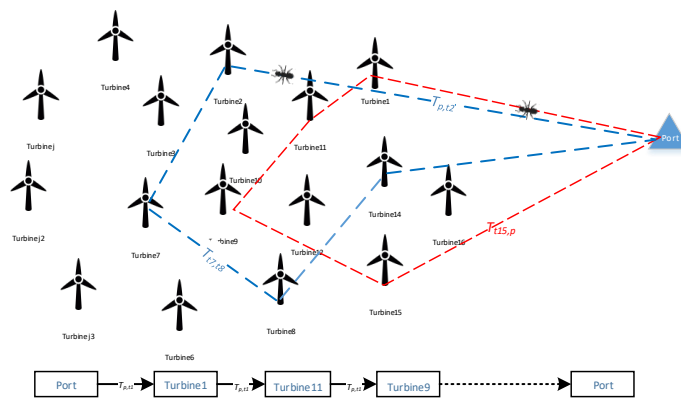


FIGURE 5.3 – Procédure de sélection d'éoliennes par des fourmis

5.4.3 Mise à jour locale des phéromones

Tout en construisant une solution, les fourmis modifient la quantité de phéromone $\tau_{ij}(t)$ sur les routes visitées (entre l'éolienne i et l'éolienne j)

en appliquant la règle de mise à jour locale (5.5). L'intensité des phéromones $\tau_{ij}(t)$ est modifiée lors de l'exécution de l'algorithme, où t est le compteur d'itérations.

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \rho \cdot \tau_0 \quad (5.5)$$

Où ρ est le coefficient de décroissance des phéromones et $0 < \rho < 1$. τ_0 est la valeur minimale de phéromones. La règle de mise à jour locale augmente la diversité de l'ACS.

5.4.4 Mise à jour globale des phéromones

Une fois que toutes les fourmis ont construit leurs solutions, la mise à jour globale des phéromones est appliquée à la meilleure solution (règle (5.6)). Les scores de toutes les solutions sont évalués et les valeurs de phéromones liées à la meilleure solution sont considérablement augmentées.

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (5.6)$$

$$\text{Ou } \Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} (F_{GB})^{-1} & \text{if } (i, j) \in \text{Meilleure - tournée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

F_{GB} est la somme de tous les F_{ij} (Eq (5.2)) sur les routes de la meilleure tournée.

La mise à jour globale des phéromones est destinée à fournir une plus grande quantité de phéromones à la meilleure solution.

5.4.5 L'implémentation de l'ACS

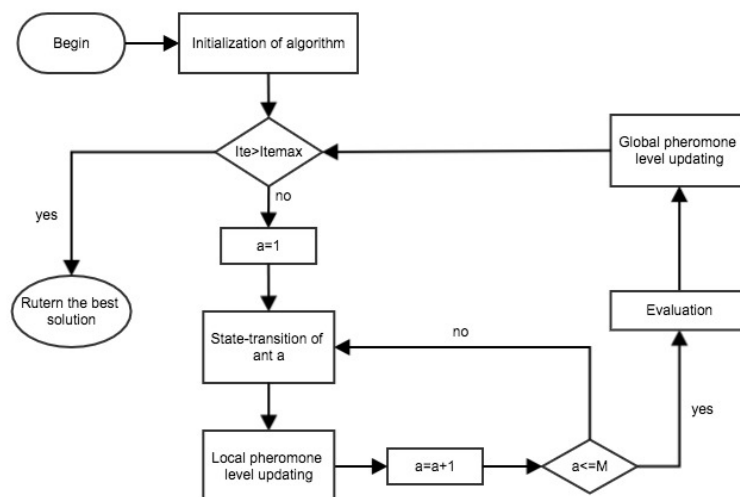


FIGURE 5.4 – Organigramme de l'algorithme ACS

l'implémentation de l'algorithme d'optimisation ACS proposé est illustrée sur la figure 5.4. Les procédures peuvent être décrites comme suit :

1. *Initialisation de l'algorithme* : Toutes les valeurs et paramètres de phéromones sont initialisés.
2. *Construction de la solution* : Un groupe de M fourmis commence à se déplacer aléatoirement du port vers les éoliennes. Ensuite, les fourmis construisent M solutions au problème en se basant sur les phéromones et les valeurs heuristiques en utilisant la règle de transition d'état de l'ACS.
3. *Mise à jour des phéromones locales* : Le niveau de phéromones est mis à jour entre les éoliennes visitées lors de la construction des solutions par chaque fourmi en utilisant la règle de mise à jour des phéromones locales (Règle. 5.5).
4. *Évaluation* : Une fois que toutes les fourmis ont construit leur solution pour cette itération, toutes les solutions générées sont évaluées.
5. *Mise à jour globale des phéromones* : Les valeurs des phéromones correspondant à la meilleure solution sont mises à jour par la règle de mise à jour globale des phéromones (Règle. 5.6).
6. *Test terminal* : Si le nombre d'itérations est inférieur au nombre maximum d'itérations prédéterminé $Itemax$, passez à l'étape (2) pour commencer une nouvelle itération. Sinon, l'algorithme se termine et renvoie la meilleure solution pour toutes les itérations.

5.5 CONCLUSION

Les méta-heuristiques sont très utilisées pour la résolution de problèmes complexes. Il ne faut pas perdre de vue le fait qu'ils ne garantissent pas de solutions optimales à un problème donné. Nous présentons dans ce chapitre notre approche d'optimisation du routage des navires pour la maintenance de parcs éoliens offshore. Nous avons utilisé l'algorithme "Ant Colony System" qui est connu pour être efficace pour ce genre de problème. Nous présentons dans le chapitre suivant l'expérimentation faite pour démontrer l'efficacité de notre approche.

EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS **6**

SOMMAIRE

6.1	INTRODUCTION	99
6.2	PLATEFORME DE SIMULATION	99
6.3	SIMULATION-OPTIMISATION	100
6.4	PARAMÈTRES DE L'ALGORITHME ACS	102
6.5	EXPÉRIMENTATION	102
6.6	MAINTENANCES	103

6.1 INTRODUCTION

La simulation et l'optimisation étaient traditionnellement considérées comme des approches distinctes (ou alternatives) dans le domaine de la recherche opérationnelle. Cependant, la grande capacité de puissance de calcul dont nous disposons depuis quelques années a favorisé l'apparition de méthodes combinant les deux. Ce domaine a suscité autant d'intérêt dans le monde académique que dans les contextes pratiques. En effet, la simulation-optimisation est particulièrement efficace pour de nombreux problèmes d'optimisation combinatoire rencontrés dans les applications réelles (logistique, transport, production, santé, finance, informatique,...) et qui sont de nature NP-difficile. Ces problèmes réels sont fréquemment caractérisés par leurs tailles importantes et la nécessité d'obtenir des solutions de haute qualité dans des temps de calcul courts.

La simulation-optimisation fournit une approche structurée pour déterminer les valeurs optimales des paramètres d'entrée, où l'optimum est mesuré par une fonction de variables de sortie (état stationnaire ou transitoire) associées à un modèle de simulation (Swisher *et al.* 2000).

Dans notre approche nous combinons une optimisation méta-heuristique avec une simulation multi-agents. Cela nous permet de capturer la complexité de notre système grâce aux multi-agents sans affecter les performances du processus d'optimisation. L'idée est donc d'explorer simultanément le grand détail apporté par la simulation multi-agents et la capacité des techniques d'optimisation méta-heuristique à trouver des solutions bonnes ou optimales. Nous présentons dans ce chapitre la simulation-optimisation que nous avons développé pour notre approche (Allal *et al.* 2021a) ainsi que les résultats expérimentaux obtenus à la suite de plusieurs simulations de cycle de vie moyen d'un parc éolien. Nous comparons nos résultats avec ceux obtenus par (Sahnoun *et al.* 2015).

6.2 PLATEFORME DE SIMULATION

La Modélisation et Simulation (M&S) de systèmes complexes est l'un des enjeux actuels majeurs de recherche (Paris *et al.* 2018). Les systèmes multi-agents sont souvent utilisés pour modéliser des systèmes complexes car ils reposent sur une description algorithmique d'agents qui interagissent et représentent ainsi bien le comportement attendu. Dans ce contexte, nous avons vu émerger un grand nombre de plateformes de simulation multi-agents. Plusieurs chercheurs ont présenté des états de l'art et des comparatifs entre des plateformes de simulation multi-agents (Berryman 2008), (Bordini *et al.* 2006), (Rousset *et al.* 2014). Parmi les plateformes qui reviennent le plus dans la littérature, nous pouvons retrouver : Swarm, Repast, MANSON, MadKit, GAMA, Jade, Anylogic et NetLogo.

Parmi toutes ces plates-formes, NetLogo tire son épingle du jeu de par sa simplicité d'utilisation. Un autre avantage est que beaucoup des plates-formes actuelles ont repris des concepts de NetLogo. Ainsi NetLogo offre une bonne base pour passer à une autre plate-forme telle que GAMA ou Repast (Becu *et al.* 2015).

La plateforme NetLogo, développée d'abord sous le nom de StarLogoT, puis en Java sous le nom de NetLogo, est un environnement libre et open source pour la simulation basée sur les agents, qui utilise une version modifiée du langage de programmation Logo . Elle est disponible sous licence publique générale (GPL) (North *et al.* 2013). Elle est multi-plateforme et fournit une API permettant de piloter son simulateur ce qui simplifie son intégration. Un modèle NetLogo est composé d'une interface graphique qui permet à l'utilisateur d'interagir avec la simulation et de voir son évolution, et d'un script (en langage NetLogo) qui décrit le comportement des agents (appelés turtles), la dynamique de l'environnement et, plus généralement, quelles actions seront réalisées à chaque pas de simulation (Wilensky 1999). NetLogo a été conçu pour fournir un laboratoire basique pour l'enseignement des concepts de complexité. En outre, il peut être utilisé pour développer des applications bien plus sophistiquées. Ainsi, le premier objectif de NetLogo est clairement la facilité d'utilisation. Il inclut un langage de programmation dédié qui permet de manipuler des structures de haut niveau et des primitives qui réduisent considérablement l'effort de programmation demandé aux modélisateurs. (Wilensky 1999) et (Tisue & Wilensky 2004) offrent plusieurs leçons du développement pour NetLogo, Car pour eux les environnements et langages de simulation à base d'agents devraient être assez faciles et les bibliothèques de modélisation d'agent ne devraient pas être un frein à ce que les utilisateurs pourraient faire.

Les dernières versions de NetLogo offrent, en plus des abstractions standard comme les places et les agents (patch et turtle), le concept de "lien" (link), que nous avons d'ailleurs utilisé lors du développement de notre simulation et qui a été très important pour la programmation de notre optimisation à base de colonies de fourmis.

Par convention, les paramètres de la simulation sont initialisés par la méthode "setup" et la simulation est déroulée par appels successifs à la méthode "go" qui fait évoluer la simulation pas à pas. L'interface graphique contient des boutons associés à ces commandes et des curseurs pour sélectionner les valeurs des paramètres.

6.3 SIMULATION-OPTIMISATION

Nous avons développé notre sim-optimiseur sous NetLogo 6.0.3 (Tisue & Wilensky 2004) basé sur le modèle et l'approche définis dans le chapitre 4. Le sim-optimiseur développé permet d'augmenter l'intelligence des agents et d'améliorer leur comportement pendant le processus de simulation. il est utilisé pour comparer l'approche proposée qui est basée sur une tournée optimisée pour la maintenance avec une approche heuristique considérant la maintenance d'une éolienne par sortie.

L'interface de simulation présentée dans la Figure 6.1 comprend une représentation du parc éolien offshore, des indicateurs clés de performance (coût, énergie produite, tâches de maintenance ...) et un ensemble de boutons, curseurs et interrupteurs qui permettent la configuration des paramètres de simulation suivants :

- La taille du parc éolien offshore (nombre d'éoliennes).

- La taille d’une équipe de maintenance composée du nombre d’ingénieurs, de techniciens, de bateaux et de grues.
- Le types de maintenances (correctives, conditionnelles et préventives) et leurs paramètres (délai d’inspection et seuil).
- Le choix de la stratégie de maintenance : approche heuristique avec la sélection d’une seule éolienne (décision basée sur un seuil sans le principe de tournée) ou maintenance de tournée optimisée (optimisation basée sur les colonies de fourmis incluant la planification de routage).
- Les paramètres de l’algorithme ACS.

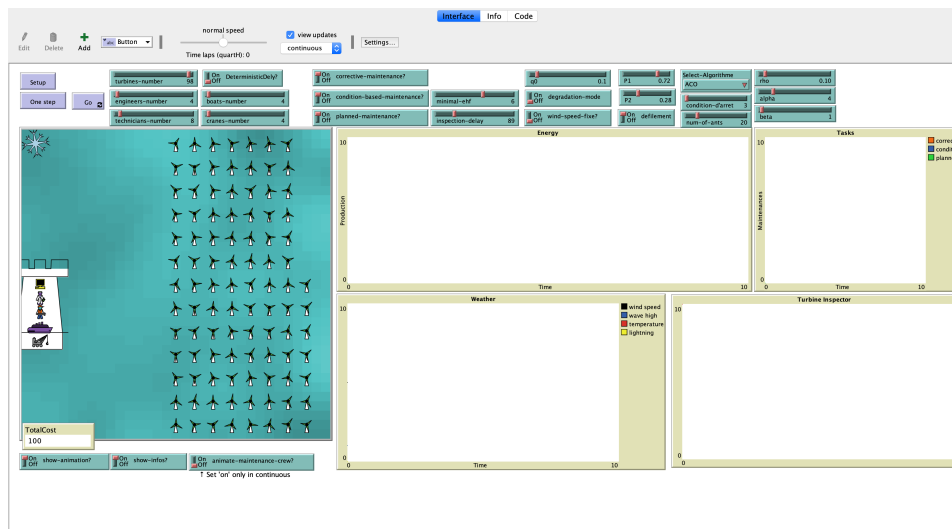


FIGURE 6.1 – Capture d’écran de l’interface du sim-optimiseur conçue à l’aide du logiciel NetLogo

Nous considérons un système composé de :

- Un parc éolien offshore de 80 éoliennes. La distance entre le parc et le port est d’environ 15 km. La distance entre chaque éolienne voisine est de 2 km pour réduire l’effet de sillage.
- Ressources humaines et matérielles, qui comprend 4 ingénieurs, 8 techniciens, 4 grues et 4 bateaux. La vitesse moyenne d’un bateau offshore est de 37KM/h. En effet, nous intégrons le temps de trajet du bateau d’une éolienne à une autre en plus du temps de maintenance afin d’avoir une estimation plus précise. Cela aura un impact sur la durée de la visite. Chaque équipe de maintenance est composée d’ 1 ingénieur, 2 techniciens, 1 bateau et 1 grue.
- Données météorologiques du port d’Oran, situé sur la côte algérienne.

Nous simulons 20 ans de fonctionnement du système, ce qui représente la durée de vie moyenne d’un parc éoliens offshore. Le pas de simulation utilisé dans cette étude est fixé à 15 minutes pour permettre d’effectuer plusieurs tâches de maintenance dans la même journée (visite). La durée de la maintenance dépend du type de maintenance à effectuer (comme décrit dans la section précédente) et de certains phénomènes aléatoires pouvant affecter la progression de la maintenance. Ainsi, le nombre de maintenances par jour dépend de la limite d’heures de travail des équipes fixée à 8 heures. Nous aurons donc de 2 à 5 opérations

de maintenance possibles par jour et par équipe. Nous supposons que la taille du stock de pièces de rechange sur les bateaux est illimitée et que l'opérateur et l'ingénieur ne prennent pas de pause pendant la période de travail.

Une fois que la simulation est lancée, les éoliennes commencent à se dégrader sous l'effet du temps et des conditions météorologiques jusqu'à l'apparition d'un déclencheur de maintenance (panne, temps d'inspection ou condition dégradée). Le déclenchement d'une tâche de maintenance lance l'algorithme d'optimisation, qui recherchera alors la meilleure tournée possible. Selon la fonction objectif, l'ACS retournera le meilleur itinéraire au simulateur à chaque fois qu'une tâche de maintenance est requise. L'interface du simulateur n'affiche pas le détail de l'algorithme ACS, ce dernier fonctionne en arrière-plan.

6.4 PARAMÈTRES DE L'ALGORITHME ACS

Nous avons d'abord étudié les paramètres de configuration de l'algorithme ACS, puis nous avons défini empiriquement les paramètres α , β , ρ et q_0 afin de fournir les meilleures performances de l'algorithme ACS en termes de temps de calcul et de qualité de la solution. Nous avons fait varier les valeurs des différents paramètres pendant que les autres sont maintenues fixes, jusqu'à atteindre la combinaison de valeurs donnant les meilleurs résultats. Nous avons testé plusieurs valeurs pour ρ et des ensembles de valeurs pour α et β où $\alpha \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, $\beta \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ et $\rho \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8\}$. Sur la base de ces tests, les poids des phéromones et des informations heuristiques sont fixés à $\alpha = 4$ and $\beta = 1$. Le nombre d'itération est défini à 3 pour limiter le temps de calcul de l'optimisation dans la simulation, et le nombre de fourmis est défini à $M = 20$. Nous avons défini le paramètre de taux d'exploration à $q_0 = 0,2$ afin de favoriser l'exploration compte tenu du nombre limité d'itérations. Le taux de mise à jour des phéromones est fixé à $\rho = 0,1$.

6.5 EXPÉRIMENTATION

Afin de prouver l'efficacité de la méthode proposée, nous allons exécuter deux stratégies de maintenance. Dans la première, nous déployons la stratégie de maintenance hybride développée par (Sahnoun *et al.* 2015) où une heuristique est utilisée pour sélectionner la meilleure éolienne à maintenir et le type de maintenance à utiliser. Dans cette méthode, uniquement une seule éolienne est maintenue par sortie. La seconde stratégie consiste à déployer l'algorithme ACS pour définir une tournée de maintenance, l'ACS peut choisir n'importe quel type de maintenance en fonction du besoin de l'éolienne sélectionnée. Le tableau 6.1 illustre les différences entre les deux stratégies dans notre expérimentation. En raison du grand nombre de paramètres aléatoires dans le modèle et le simulateur développés, chaque scénario doit être exécuté plusieurs fois pour permettre l'exploration de comportements rares et de phénomènes inattendus du système.

TABLE 6.1 – Comparaison des paramètres expérimentaux de l’approche heuristique et de l’approche ACS

	approche heuristique(Sahnoun <i>et al.</i> 2015)	approche ACS
Approche (\neq)	Simulation	Simulation-optimisation
Pas de simulation (\equiv)	15 minutes	15 minutes
Modèle de simulation (\equiv)	Modélisation basée sur les agents	Modélisation basée sur les agents
Algorithme (\neq)	Heuristique	Ant Colony System
Stratégie de maintenance (\neq)	Conditionnelle/systémique/hybride	Hybride
Nbr de maintenance par sortie (\neq)	1	≥ 1
Ressources humaines(\equiv)	4 ingénieurs & 8 techniciens	4 ingénieurs & 8 techniciens
Ressources matérielles (\equiv)	4 grues & 4 bateaux	4 grues & 4 bateaux
Durée de vie du parc (\equiv)	20 ans	20 ans

TABLE 6.2 – Nombre de maintenances pour chaque type de maintenance

	PM	CBM	CM	Maintenances
Optimisation (Heuristique)	3497	2258	358	6113
Sim-optimisation (ACS)	10736	2185	91	13012

Nous supposons un parc éolien offshore composé de 80 éoliennes avec une puissance nominale maximale de 6 MW. La vitesse du vent la plus basse permettant la production d’électricité est égale à 4 m/s. La vitesse du vent à laquelle chaque éolienne produit son énergie maximale est de 14 m/s. Le palier de sécurité de vitesse maximale du vent est fixé à 25 m/s (Kooijman *et al.* 2003). La simulation a été exécutée sur un ordinateur contenant un processeur Intel Core i7 @ 2,90 GHz, 16 Go de RAM et sous macOS Mojave. En raison de la nature aléatoire de plusieurs paramètres du modèle (par exemple, la durée de la maintenance, les conditions météorologiques ou l’occurrence de panne), nous avons lancé 100 simulations pour chaque stratégie de maintenance. Ce processus prend du temps en raison de la complexité du modèle et des fonctions d’optimisation utilisées. La simulation basée sur l’approche ACS dure 90 heures (environ quatre jours d’exécution) et celle basée sur l’approche heuristique dure 30 heures (environ un jour et demi). tous les résultats présentés sont les moyennes de 100 simulations pour chaque approche.

6.6 MAINTENANCES

Le tableau 6.2 représente le nombre des différents types de maintenance déployés pour les deux approches testées. Les chiffres mentionnés correspondent aux tâches de maintenance pendant 20 ans correspondant au cycle de vie moyen d’un parc éolien.

On observe que le nombre d’actions de maintenance est plus significatif pour l’approche ACS (13012) que celui de l’approche heuristique (6113). Ceci est principalement dû au nombre de maintenances préventives dans l’approche ACS qui augmente par rapport à l’approche heuristique (307%).

En effet, dans cette approche, à chaque fois qu’un événement déclenche une maintenance, nous en profitons pour maintenir d’autres éoliennes dans le temps restant. Cette stratégie permet une meilleure exploitation des équipes de maintenance et du matériel utilisé (bateaux et grues). La plupart de ces maintenances supplémentaires sont préventives, ce qui explique le nombre important de PM. Le nombre de CBM est presque le même pour les deux approches. Cependant, le nombre de CM est signi-

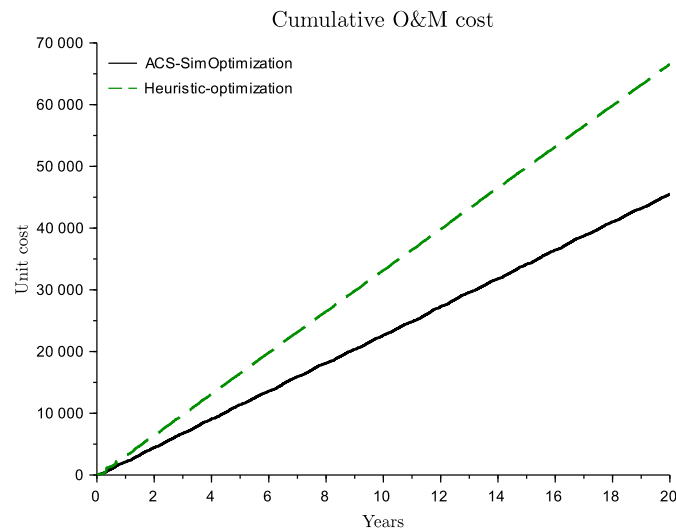


FIGURE 6.2 – Réduction du coût des maintenances en utilisant la stratégie de tournées et l’algorithme ACS par rapport à l’utilisation de l’heuristique

ficativement plus faible dans l’approche ACS, qui est le but de chaque stratégie de maintenance (Sahnoun *et al.* 2015). En effet, en effectuant des maintenances préventives qui sont plus abordables en terme de coûts, nous améliorons l’état du parc éolien, et réduisons en même temps le nombre de maintenances correctives qui sont coûteuses.

Nous avons également observé d’autres indicateurs importants du parc éolien ; à savoir la production d’énergie, le coût et le facteur de santé des équipements (EHF).

La figure 6.2 représente les coûts des opérations et maintenances cumulés pendant le cycle de vie d’un parc éolien pour les deux approches. Nous constatons que le coût cumulé de l’approche ACS est inférieur au coût généré par l’approche heuristique. Cela peut s’expliquer par le fait que l’approche ACS utilise moins de maintenance corrective, même si le nombre total de maintenances est plus important. Afin de démontrer la valeur ajoutée de l’ACS en termes de coût, nous présentons le coût moyen annuel sur la figure 6.3, qui représente clairement que l’ACS est moins coûteuse quelle que soit l’année, avec une différence significative de près de 1000 unités Coût.

L’EHF journalier et annuel du parc éolien sont présentés respectivement dans la Figure 6.4 et la Figure 6.5. les deux figures démontrent que l’EHF du parc éolien dans l’approche ACS est meilleure que celui dans l’approche heuristique. Cela démontre l’efficacité de l’approche ACS. En fait, le grand nombre de tâches de maintenance, notamment préventives, maintiennent les éoliennes en bon état avec un EHF supérieur à 9 la plupart du temps. De plus, la figure 6.4 montre que l’EHF dépend de la saison, où elle augmente pendant l’été car la météo permet d’effectuer des tâches de maintenance, et diminue en hiver en raison de l’impossibilité d’atteindre l’éolienne pour effectuer les maintenances. On observe que durant la première année, l’EHF de l’approche heuristique dépasse une fois l’EHF de l’approche à base d’ACS en raison de la nouveauté des

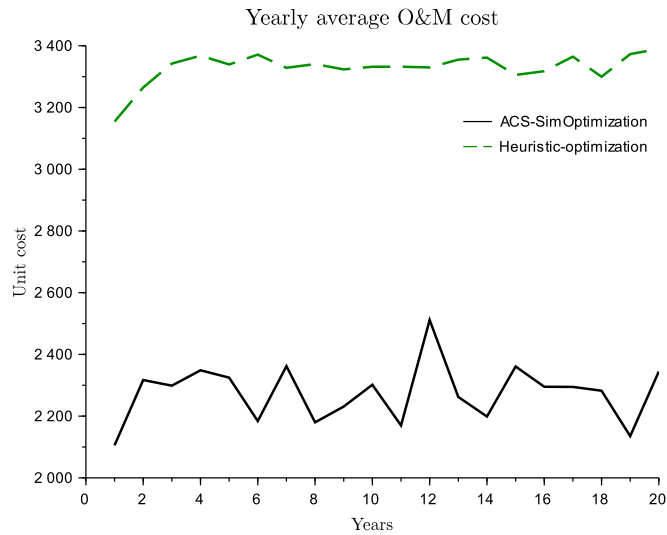


FIGURE 6.3 – Réduction du coût pour chaque année en utilisant l’approche proposée (ACS et stratégie de tournée)

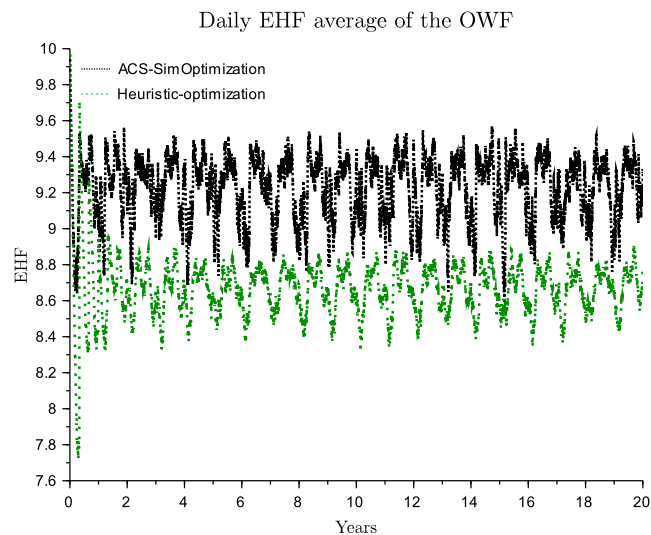


FIGURE 6.4 – Amélioration de la moyenne quotidienne de l’EHF en utilisant l’approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)

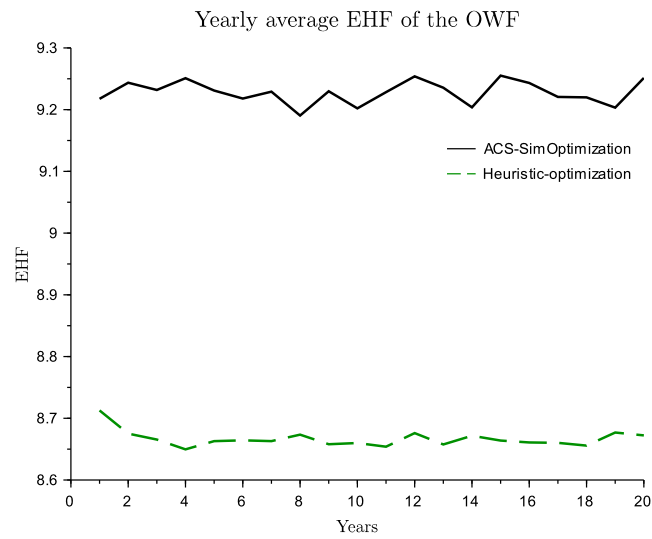


FIGURE 6.5 – Amélioration de la moyenne annuelle de l’EHF en utilisant l’approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)

éoliennes. La moyenne de la différence entre les deux EHF est d’environ 0,5 comme le montre la figure 6.5.

L’amélioration de l’EHF et l’augmentation du temps de disponibilité (en raison de la brièveté des actions de maintenance), grâce à l’approche proposée, améliore également la production d’énergie comme le montrent la Figure 6.6 et la Figure 6.7. La différence de production entre les deux approches testées est d’environ 100 MWh chaque année comme on peut l’observer sur la figure 6.7.

Pour conclure, le test des deux approches de maintenance démontre que l’ACS présente de meilleures performances pour les parcs éoliens offshore en termes de coût, de production et d’EHF. De plus, même si le nombre de tâches de maintenance augmente avec l’utilisation de l’ACS, le coût de la maintenance est réduit et la disponibilité des turbines est améliorée.

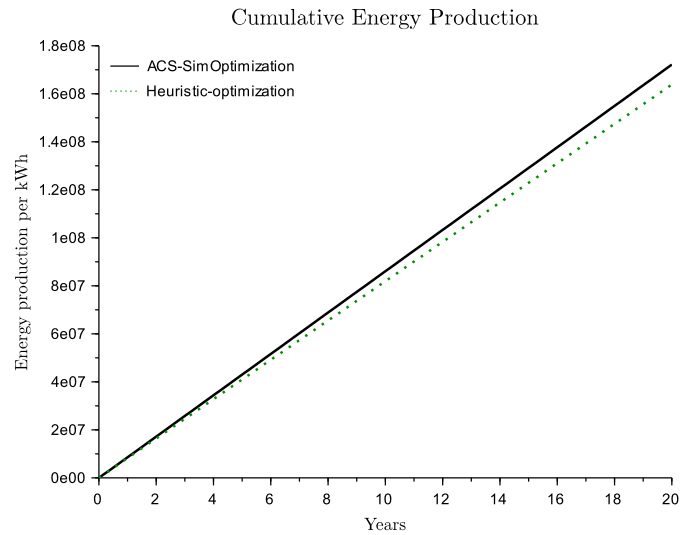


FIGURE 6.6 – Amélioration de la production cumulée en utilisant l’approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)

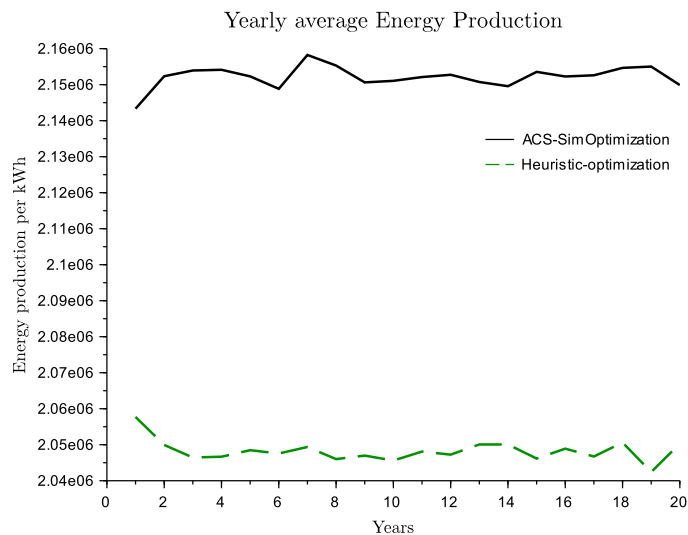


FIGURE 6.7 – Amélioration annuelle de la production d’énergie selon l’approche proposée (ACS avec stratégie de tournée)

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cet thèse, nous présentons une approche à base de colonies de fourmis "ACS" pour optimiser le routage des bateaux pour la maintenance d'un parc éolien offshore.

Nous avons développé un modèle multi-agents utilisant cinq types d'agents pour représenter le comportement du système.

Afin de prouver l'efficacité de la politique de maintenance proposée (avec routage), nous adoptons une approche basée sur une simulation-optimisation des tâches d'opération et de maintenance pour un parc éolien offshore en utilisant l'algorithme ACS fonctionnant sous le programme Netlogo. La stratégie que nous adoptons consiste à faire une tournée lorsqu'un événement déclenche une maintenance. L'algorithme ACS explore toutes les combinaisons des éoliennes et renvoie la tournée optimale pour les équipes de maintenance. Nous comparons l'approche proposée avec une approche heuristique proposée dans les travaux précédents ([Sahnoun et al. 2015](#)). Les résultats obtenus montrent que l'approche ACS surpasse l'approche heuristique.

En effet, la politique de tournée permet d'augmenter l'utilisation des ressources et de réduire le coût global de maintenance et d'augmenter l'EHF de chaque éolienne. Malgré l'augmentation du nombre de maintenances préventives dans la nouvelle approche, le nombre de maintenances coûteuses (corrective) est réduit, ce qui explique la réduction du coût global. Naturellement, la quantité d'énergie produite est augmentée également en raison de l'amélioration du taux de disponibilité des éoliennes.

Ces indicateurs (coût et EHF) sont importants pour les entreprises travaillant dans le domaine de l'énergie éolienne offshore en leur permettant d'utiliser des stratégies complexes et de maximiser l'utilisation des ressources de maintenance. Cela contribuera également au succès de la transition énergétique pour plusieurs pays.

De plus, ce travail prouve l'efficacité de l'approche simulation-optimisation pour résoudre des problèmes dynamiques, stochastiques et complexes où plusieurs processus d'optimisation sont exécutés à différents moments de la simulation. D'autre part, la modélisation et la simulation multi-agents est une méthode intéressante pour mettre en oeuvre la simulation et l'optimisation où les agents responsables de l'optimisation peuvent exécuter séparément les algorithmes d'optimisation. Les prochains travaux porteront sur la prise en compte d'un modèle de dégradation plus précis des turbines développé par ([Bezzaoucha et al. 2020](#)) et la prise en compte de l'empreinte carbone dans les indicateurs de performance d'un parc éolien offshore. Le même type d'approches de simulation-optimisation sera utilisé pour tester l'efficacité des parcs éoliens offshore et onshore dans le contexte algérien.

MES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES

A. Allal, M. Sahnoun, R. Adjoudj, SM. Benslimane, M. Mazar, Multi-agent based simulation-optimization of maintenance routing in offshore wind farms, *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 107342, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107342>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221002461>)

A. Allal and M. Sahnoun, SM. Benslimane, R. Adjoudj, Challenges facing the implementation of wind energy in Algeria : a review paper
2021 1st International Conference on Cyber Management and Engineering (CyMaEn)

BIBLIOGRAPHIE

- [3tier 2014] 3tier, 2014.
- [Ainslie 1988] John F Ainslie. *Calculating the flowfield in the wake of wind turbines*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 27, no. 1-3, pages 213–224, 1988.
- [Akdağ & Dinler 2009] Seyit A Akdağ et Ali Dinler. *A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications*. Energy conversion and management, vol. 50, no. 7, pages 1761–1766, 2009.
- [Allal et al. 2021a] A. Allal, M. Sahnoun, R. Adjoudj, SM. Benslimane et M. Mazar. *Multi-agent based simulation-optimization of maintenance routing in offshore wind farms*. Computers & Industrial Engineering, page 107342, 2021.
- [Allal et al. 2021b] A. Allal, M. Sahnoun, SM. Benslimane et R. Adjoudj. *Challenges facing the implementation of wind energy in Algeria : a review paper*. In 1st International Conference on Cyber Management and Engineering (CyMaEn). IEEE, 2021.
- [Arabian-Hoseynabadi et al. 2010] Hooman Arabian-Hoseynabadi, Hashem Oraee et PJ Tavner. *Failure modes and effects analysis (FMEA) for wind turbines*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 7, pages 817–824, 2010.
- [Arvesen et al. 2013] Anders Arvesen, Christine Birkeland et Edgar G Hertwich. *The importance of ships and spare parts in LCAs of offshore wind power*. Environmental science & technology, vol. 47, no. 6, pages 2948–2956, 2013.
- [Awad & Elshaer 2019] Hadeer Awad et Raafat Elshaer. *A Taxonomic Review of Metaheuristic Algorithms for Solving the Vehicle Routing Problem and Its Variants*. Computers & Industrial Engineering, page 106242, 2019.
- [Babu & Jithesh 2008] J RAMESH Babu et SV Jithesh. *Breakdown risks in wind energy turbines*. Pravartak, the journal of Insurance and risk Management from National Insurance Academy, Pun, vol. 3, no. 3, 2008.
- [Badsı et al. 2018] Hichem Benaissa Anouar Badsı, Abessamed Réda Ghomari et Leila Zemmouchi-Ghomari. *Agent Based Simulation of Business Model Ontologies Value in Enterprise Context*. In Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference, pages 718–736. Springer, 2018.

- [Badsı 2018] HBA Badsı. *Evaluation de l'Usage des BMOs (Business Model Ontologies) en Entreprise : Application au CRM (Customer Relationship Management)*. PhD thesis, Ecole nationale supérieure d'informatique, 2018.
- [Bäumler & Kotzab 2017] Ilja Bäumler et Herbert Kotzab. *Intelligent transport systems for road freight transport—an overview*. In *Dynamics in Logistics*, pages 279–290. Springer, 2017.
- [Becu *et al.* 2015] Nicolas Becu, Frédéric Amblard, Nicolas Brax, Benoit Gaudou et Nicolas Marilleau. *How to involve stakeholders in the modeling process*. In *Agent-Based Spatial Simulation with NetLogo*, pages 223–252. Elsevier, 2015.
- [Beeker & Page 2006] Emmet R Beeker et Ernest H Page. *A case study of the development and use of a MANA-based federation for studying US border operations*. In *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, pages 841–847. IEEE, 2006.
- [Belabes *et al.* 2015] B Belabes, A Youcefi, O Guerri, M Djamai et A Kaabeche. *Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pages 1245–1255, 2015.
- [Bellmer 2007] Horst Bellmer. *Standard konstruktive ausführung von offshore-windenergieanlagen*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 2007.
- [Berbeglia *et al.* 2007] Gerardo Berbeglia, Jean-François Cordeau, Irina Gribkovskaia et Gilbert Laporte. *Static pickup and delivery problems : a classification scheme and survey*. *Top*, vol. 15, no. 1, pages 1–31, 2007.
- [Berryman 2008] Matthew Berryman. *Review of software platforms for agent based models*. 2008.
- [Besnard *et al.* 2013] François Besnard, Katharina Fischer et Lina Bertling Tjernberg. *A model for the optimization of the maintenance support organization for offshore wind farms*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pages 443–450, 2013.
- [Bezzaoucha *et al.* 2018] Fatima Souad Bezzaoucha, M'hammed Sahnoun et Sidi Mohammed Benslimane. *Failure causes based wind turbine components classification and failure propagation : For proactive maintenance implementatio*. In *2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [Bezzaoucha *et al.* 2020] Fatima Souad Bezzaoucha, M'hammed Sahnoun et Sidi Mohamed Benslimane. *Multi-component modeling and classification for failure propagation of an offshore wind turbine*. *International Journal of Energy Sector Management*, 2020.

- [Bezzaoucha *et al.* 2021] Fatima Souad Bezzaoucha, M'hammed Sahnoun et Sidi Mohammed Benslimane. *Multi-agent modeling and simulation of wind turbine behavior with failure propagation consideration*. In 2020 2nd International Workshop on Human-Centric Smart Environments for Health and Well-being (IHSH), pages 97–102. IEEE, 2021.
- [Boissier 2001] Olivier Boissier. *Modèles et architectures d'agents Systèmes Multi-Agents Principes et architectures*, 2001.
- [Bordini *et al.* 2006] Rafael H Bordini, Lars Braubach, Mehdi Dastani, A El F Seghrouchni, Jorge J Gomez-Sanz, Joao Leite, Gregory O'Hare, Alexander Pokahr et Alessandro Ricci. *A survey of programming languages and platforms for multi-agent systems*. *Informatica*, vol. 30, no. 1, 2006.
- [Boukli Hacene *et al.* 2020] Mohammed el Amine Boukli Hacene, Dorin Lucache, Habib Rozale et Abbes Chahed. *Renewable Energy in Algeria : Desire and Possibilities*. *Journal of Asian and African Studies*, vol. 55, no. 7, pages 947–964, 2020.
- [Bouraiou *et al.* 2020] Ahmed Bouraiou, Ammar Necaibia, Nadir Bou-tasseta, Saad Mekhilef, Rachid Dabou, Abderrezzaq Ziane, Nordinine Sahouane, Issam Attoui, Mohammed Mostefaoui et Oussama Touaba. *Status of renewable energy potential and utilization in Algeria*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 246, page 119011, 2020.
- [Braam & Rademakers 2004] H Braam et LWMM Rademakers. *Models to analyse operation and maintenance aspects of offshore wind farms*. ECN report, 2004.
- [Brown & Hulot 2008] Lester R Brown et Nicolas Hulot. *Le plan b : Pour un pacte écologique mondial*. Hachette littératures, 2008.
- [Buettner & Siler 1976] Grace M Buettner et William Siler. *Variability in predator-prey experiments : simulation using a stochastic model*. In *Proceedings of the 14th annual Southeast regional conference*, pages 194–201, 1976.
- [Burton *et al.* 2011] Tony Burton, N Jenkins, D Sharpe et E Bossanyi. *Design loads for horizontal axis wind turbines*. *Wind Energy Handbook*, 2nd edn. John Wiley & Sons, Ltd : Chichester, UK, 2011.
- [Buşoniu *et al.* 2010] Lucian Buşoniu, Robert Babuška et Bart De Schutter. *Multi-agent reinforcement learning : An overview*. In *Innovations in multi-agent systems and applications-1*, pages 183–221. Springer, 2010.
- [Byon *et al.* 2011] Eunshin Byon, Eduardo Pérez, Yu Ding et Lewis Ntaimo. *Simulation of wind farm operations and maintenance using discrete event system specification*. *Simulation*, vol. 87, no. 12, pages 1093–1117, 2011.

- [Carron 2001] Thibault Carron. *Des Systèmes Multi-Agents temporels pour des systèmes industriels dynamiques*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean . . . , 2001.
- [Caselitz & Giebhardt 2005] Peter Caselitz et Jochen Giebhardt. *Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters*. *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 127, no. 2, pages 253–261, 2005.
- [Chaib-Draa *et al.* 2001] Brahim Chaib-Draa, Imed Jarras et Bernard Moulin. *Systèmes multi-agents : principes généraux et applications*. Edition Hermès, vol. 242, pages 1030–1044, 2001.
- [Chan & Mo 2017] Daniel Chan et John Mo. *Life cycle reliability and maintenance analyses of wind turbines*. *Energy Procedia*, vol. 110, pages 328–333, 2017.
- [Chellali *et al.* 2011] Farouk Chellali, Adballah Khellaf, Adel Belouchrani et Abdelmadjid Recioui. *A contribution in the actualization of wind map of Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pages 993–1002, 2011.
- [Chellali *et al.* 2012] F Chellali, A Khellaf, A Belouchrani et R Khanniche. *A comparison between wind speed distributions derived from the maximum entropy principle and Weibull distribution. Case of study; six regions of Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pages 379–385, 2012.
- [connaissancedesenergies 2017] connaissancesdesenergies, 2017.
- [Coquillard & Hill 1997] P Coquillard et DRC Hill. *Modélisation et Simulation d'Ecosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets* Masson. Paris, France, page 273, 1997.
- [Cunha *et al.* 2004] PF Cunha, JA Caldeira Duarte et L Alting. *Development of a productive service module based on a life cycle perspective of maintenance issues*. *CIRP Annals*, vol. 53, no. 1, pages 13–16, 2004.
- [Dahane *et al.* 2017] Mohammed Dahane, M'hammed Sahnoun, Belgacem Bettayeb, David Baudry et Hamza Boudhar. *Impact of spare parts re-manufacturing on the operation and maintenance performance of offshore wind turbines : a multi-agent approach*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, no. 7, pages 1531–1549, 2017.
- [Dai *et al.* 2015] Lijuan Dai, Magnus Stålhane et Ingrid B Utne. *Routing and scheduling of maintenance fleet for offshore wind farms*. *Wind Engineering*, vol. 39, no. 1, pages 15–30, 2015.
- [Dawid *et al.* 2017] Rafael Dawid, David McMillan et Matthew Revie. *Heuristic algorithm for the problem of vessel routing optimisation for offshore wind farms*. *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pages 1159–1163, 2017.

- [Demazeau 1995] Yves Demazeau. *From interactions to collective behaviour in agent-based systems*. In In : Proceedings of the 1st. European Conference on Cognitive Science. Saint-Malo. Citeseer, 1995.
- [Dewan 2014] Ashish Dewan. *Logistic and service optimization for O&M of offshore wind farms ; model development & output analysis*. 2014.
- [Ding & Tian 2012] Fangfang Ding et Zhigang Tian. *Opportunistic maintenance for wind farms considering multi-level imperfect maintenance thresholds*. *Renewable Energy*, vol. 45, pages 175–182, 2012.
- [Dinwoodie et al. 2013] Iain Dinwoodie, David McMillan, Matthew Revie, Iraklis Lazakis et Yalcin Dalgic. *Development of a combined operational and strategic decision support model for offshore wind*. *Energy Procedia*, vol. 35, pages 157–166, 2013.
- [Dorigo & Gambardella 1997] Marco Dorigo et Luca Maria Gambardella. *Ant colony system : a cooperative learning approach to the traveling salesman problem*. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 1, no. 1, pages 53–66, 1997.
- [Dorigo 1992] Marco Dorigo. *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD Thesis, Politecnico di Milano, 1992.
- [dos Santos et al. 2013] Fernando P dos Santos, Ângelo P Teixeira et C Guedes Soares. *Maintenance planning of an offshore wind turbine using stochastic Petri nets with predicates*. In ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pages V02BT02A059–V02BT02A059. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [Drogoul & Ferber 1992] Alexis Drogoul et Jacques Ferber. *Multi-agent simulation as a tool for modeling societies : Application to social differentiation in ant colonies*. In European workshop on modelling autonomous agents in a multi-agent world, pages 2–23. Springer, 1992.
- [Drogoul et al. 2002] Alexis Drogoul, Diane Vanbergue et Thomas Meurisse. *Multi-agent based simulation : Where are the agents?* In International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, pages 1–15. Springer, 2002.
- [Duboz 2004] Raphael Duboz. *Intégration de modèles hétérogènes pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes*. Application à la modélisation multiéchelles en écologie marine, 2004.
- [DUMOUCHEL et al. 1989] Paul DUMOUCHEL, Paul BOURGINE et Francisco J VARELA. *Autonomie et connaissance*, 1989.
- [Dupuy 2013] Jean-Pierre Dupuy. *Aux origines des sciences cognitives*. La découverte, 2013.
- [Durfee & Montgomery 1991] Edmund H Durfee et Thomas A Montgomery. *Coordination as distributed search in a hierarchical behavior space*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 21, no. 6, pages 1363–1378, 1991.

- [Echavarria *et al.* 2008] E Echavarria, B Hahn, GJ Van Bussel et T Tomiyama. *Reliability of wind turbine technology through time*. Journal of Solar Energy Engineering, vol. 130, no. 3, page 031005, 2008.
- [Edenhofer *et al.* 2011] Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Susanne Kadner, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, Steffen Schlömer, Christoph von Stechow *et al.* Renewable energy sources and climate change mitigation : Special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2011.
- [El-Thalji & Liyanage 2012] Idriss El-Thalji et Jayantha P Liyanage. *On the operation and maintenance practices of wind power asset : A status review and observations*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2012.
- [Emden 1971] Van Emden. An analysis of complexity. Mathematisch Centrum Amsterdam, 1971.
- [Esteban *et al.* 2009] MD Esteban, JJ Diez, JS López et V Negros. *Integral management applied to offshore wind farms*. Journal of Coastal Research, pages 1204–1208, 2009.
- [European-commission 2011] European-commission. *Energy roadmap 2050*. In Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels, 15,12., 2011.
- [Fan *et al.* 2019] Dongming Fan, Yi Ren, Qiang Feng, Bingyu Zhu, Yiliu Liu et Zili Wang. *A hybrid heuristic optimization of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 62, page 103949, 2019.
- [Feliot 1997] Claude Feliot. *Modélisation de systèmes complexes : intégration et formalisation de modèles*. PhD thesis, Lille 1, 1997.
- [Feng & Shen 2017] Ju Feng et Wen Zhong Shen. *Design optimization of offshore wind farms with multiple types of wind turbines*. Applied Energy, vol. 205, pages 1283–1297, 2017.
- [Ferber 1987] Jacques Ferber. *Des objets aux agents : une architecture stratifiée*. Actes 6ème Congrès AFCET de Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, 1987.
- [Ferber 1995] Jacques Ferber. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris, vol. 322, 1995.
- [Ferber 1999] Jacques Ferber. *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*, volume 1. Addison-Wesley Reading, 1999.
- [Fishwick *et al.* 1997] Paul A Fishwick *et al.* *Computer simulation : growth through extension*. Transactions of the Society for Computer Simulation, vol. 14, no. 1, pages 13–24, 1997.

- [Fishwick 1995] Paul A Fishwick. *Simulation model design and execution : building digital worlds*. Prentice Hall PTR, 1995.
- [Fragapane *et al.* 2019] GI Fragapane, Cevin Zhang, Fabio Sgarbossa et Jan Ola Strandhagen. *An agent-based simulation approach to model hospital logistics*. *Int J Simul Model*, vol. 18, no. 4, pages 654–665, 2019.
- [Gasser 1991] Les Gasser. *Social conceptions of knowledge and action : DAI foundations and open systems semantics*. *Artificial intelligence*, vol. 47, no. 1-3, pages 107–138, 1991.
- [Gertsbakh 2013] Ilya Gertsbakh. *Reliability theory : with applications to preventive maintenance*. Springer, 2013.
- [Giebel & Hasager 2016] Gregor Giebel et Charlotte Bay Hasager. *An overview of offshore wind farm design*. In *MARE-WINT*, pages 337–346. Springer, Cham, 2016.
- [Giebhardt *et al.* 2004] J Giebhardt *et al.* *Predictive condition monitoring for offshore wind energy converters with respect to the IEC61400-25 standard*. This paper had been presented at the DEWEK, vol. 2004, 2004.
- [Gilbert & Troitzsch 2005] Nigel Gilbert et Klaus Troitzsch. *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK), 2005.
- [Glover 1989] Fred Glover. *Tabu search—part I*. *ORSA Journal on computing*, vol. 1, no. 3, pages 190–206, 1989.
- [Goch *et al.* 2012] Gert Goch, Wolfgang Knapp et Frank Härtig. *Precision engineering for wind energy systems*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 2, pages 611–634, 2012.
- [González *et al.* 2013] J Serrano González, M Burgos Payán et J Riquelme Santos. *Optimum design of transmissions systems for offshore wind farms including decision making under risk*. *Renewable energy*, vol. 59, pages 115–127, 2013.
- [Guezgouz *et al.* 2021] Mohammed Guezgouz, Jakub Jurasz, Mohamed Chouai, Hannah Bloomfield et Benaissa Bekkouche. *Assessment of solar and wind energy complementarity in Algeria*. *Energy Conversion and Management*, vol. 238, page 114170, 2021.
- [Gundegjerde *et al.* 2015] Christian Gundegjerde, Ina B Halvorsen, Elin E Halvorsen-Weare, Lars Magnus Hvattum et Lars Magne Nonås. *A stochastic fleet size and mix model for maintenance operations at offshore wind farms*. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, vol. 52, pages 74–92, 2015.
- [GWEC 2014] Global Wind Energy Council GWEC. *Global Wind Report : Annual market update 2010*. URL <http://gwec.net/global-figures/graphs/>. [Accessed May 18, 2017], 2014.

- [Hafida 2018] D Nedjari Hafida. *‘L’énergie éolienne en Algérie’*. Bulletin des Energies Renouvelables, Centre du Développement et de la Recherche des Energies Renouvelables (CDER), no. 46, 2018.
- [Halvorsen-Weare *et al.* 2013] Elin E Halvorsen-Weare, Christian Gundegjerde, Ina B Halvorsen, Lars Magnus Hvattum et Lars Magne Nonås. *Vessel fleet analysis for maintenance operations at offshore wind farms*. Energy Procedia, vol. 35, pages 167–176, 2013.
- [Hau 2013] Erich Hau. *Wind turbines : fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [Hayes-Roth 1995] Barbara Hayes-Roth. *An architecture for adaptive intelligent systems*. Artificial intelligence, vol. 72, no. 1-2, pages 329–365, 1995.
- [Hertz & de Werra 1990] Alain Hertz et Dominique de Werra. *The tabu search metaheuristic : how we used it*. Annals of mathematics and artificial intelligence, vol. 1, no. 1, pages 111–121, 1990.
- [Hewitt 1977] Carl Hewitt. *Viewing control structures as patterns of passing messages*. Artificial intelligence, vol. 8, no. 3, pages 323–364, 1977.
- [Himri *et al.* 2008] Y Himri, Saeed Rehman, B Draoui et S Himri. *Wind power potential assessment for three locations in Algeria*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, no. 9, pages 2495–2504, 2008.
- [Himri *et al.* 2010] Y Himri, S Himri et A Boudghene Stambouli. *Wind power resource in the south-western region of Algeria*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 1, pages 554–556, 2010.
- [Himri *et al.* 2016] Youcef Himri, Shafiqur Rehman, Saliha Himri, Kasra Mohammadi, Besir Sahin et Arif S Malik. *Investigation of wind resources in Timimoun region, Algeria*. Wind Engineering, vol. 40, no. 3, pages 250–260, 2016.
- [Hörl 2017] S Hörl. *Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses*. Procedia Comput. Sci. 109, 899–904, 2017.
- [Huraux 2015] Thomas Huraux. *Simulation multi-agent d’un système complexe : combiner des domaines d’expertise par une approche multi-niveau- Le cas de la consommation électrique résidentielle*. PhD thesis, UPMC-Paris 6 Sorbonne Universités, 2015.
- [Hyers *et al.* 2006] RW Hyers, JG McGowan, KL Sullivan, JF Manwell et BC Syrett. *Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines*. Energy Materials, vol. 1, no. 3, pages 187–203, 2006.
- [Irawan *et al.* 2017] Chandra Ade Irawan, Djamila Ouelhadj, Dylan Jones, Magnus Stålhane et Iver Bakken Sperstad. *Optimisation of maintenance routing and scheduling for offshore wind farms*. European Journal of Operational Research, vol. 256, no. 1, pages 76–89, 2017.

- [Irawan *et al.* 2019] Chandra Ade Irawan, Majid Eskandarpour, Djamila Ouelhadj et Dylan Jones. *Simulation-based optimisation for stochastic maintenance routing in an offshore wind farm*. European Journal of Operational Research, 2019.
- [Jennings *et al.* 1998] Nicholas R Jennings, Katia Sycara et Michael Wooldridge. *A roadmap of agent research and development*. Autonomous agents and multi-agent systems, vol. 1, no. 1, pages 7–38, 1998.
- [Jin *et al.* 2012] Tongdan Jin, Zhigang Tian, Miguel Huerta et Jett Piechota. *Coordinating maintenance with spares logistics to minimize leveled cost of wind energy*. In 2012 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pages 1022–1027. IEEE, 2012.
- [Juan *et al.* 2015] Angel A Juan, Javier Faulin, Scott E Grasman, Markus Rabe et Gonçalo Figueira. *A review of simheuristics : Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems*. Operations Research Perspectives, vol. 2, pages 62–72, 2015.
- [Kabachi 1999] Nadia Kabachi. *Modélisation et apprentissage de la prise de décision dans les organisations productives : approche multi-agents*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean ... , 1999.
- [Karki & Patel 2009] R Karki et J Patel. *Reliability assessment of a wind power delivery system*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability, vol. 223, no. 1, pages 51–58, 2009.
- [Kim *et al.* 2012] Hagkwon Kim, Chanan Singh et Alex Sprintson. *Simulation and estimation of reliability in a wind farm considering the wake effect*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 2, pages 274–282, 2012.
- [Kobbacy & Murthy 2008] Khairy Ahmed Helmy Kobbacy et DN Prabhakar Murthy. *Complex system maintenance handbook*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [Komusanac *et al.* 2019] Ivan Komusanac, Daniel Fraile et Guy Brindley. *Wind Energy in Europe in 2018, Trends and statistics*. Wind Europe, 2019.
- [Kooijman *et al.* 2003] HJT Kooijman, C Lindenburg, D Winkelaar et EL Van der Hooft. *DOWEC 6 MW pre-design*. Energy Research Center of the Netherlands (ECN), 2003.
- [Kovacs *et al.* 2011] Andras Kovacs, Gábor Erdős, Zsolt Janos Viharos et László Monostori. *A system for the detailed scheduling of wind farm maintenance*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, vol. 60, no. 1, pages 497–501, 2011.
- [Kpakpo & Itmi 2016] Miguel Kpakpo et Mhamed Itmi. *A MAS model for O&M Cost simulation and optimization : case of a wind power operator*.

- In 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), pages 685–689. IEEE, 2016.
- [Ladrière 2008] Jean Ladrière. *Système (épistémologie)*. Encyclopaedia Universalis, vol. 19, pages 1029–1032, 2008.
- [Larsen 1988] G. C. Larsen. *A simple wake calculation procedure*. Risø National Laboratory. Riso-M No. 2760, 1988.
- [Lauriere 1978] Jena-Lonis Lauriere. *A language and a program for stating and solving combinatorial problems*. Artificial intelligence, vol. 10, no. 1, pages 29–127, 1978.
- [Law et al. 2000] Averill M Law, W David Kelton et W David Kelton. *Simulation modeling and analysis, volume 3*. McGraw-Hill New York, 2000.
- [Le Moigne 1990] Jean-Louis Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Paris : Bordas, 1990.
- [Leng & Corman 2020] Nuannuan Leng et Francesco Corman. *The role of information availability to passengers in public transport disruptions : An agent-based simulation approach*. Transportation Research Part A : Policy and Practice, vol. 133, pages 214–236, 2020.
- [Li et al. 2018] Yan Li, Eugenia Kalnay, Safa Motesharrei, Jorge Rivas, Fred Kucharski, Daniel Kirk-Davidoff, Eviatar Bach et Ning Zeng. *Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation*. Science, vol. 361, no. 6406, pages 1019–1022, 2018.
- [Liao & Rausch 2010] Haitao Liao et Mitchell Rausch. *Spare part inventory control driven by condition based maintenance*. In Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2010 Proceedings-Annual, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [Liotta 2012] Giacomo Liotta. *Simulation of supply-chain networks : a source of innovation and competitive advantage for small and medium-sized enterprises*. Technology innovation management review, vol. 2, no. 11, 2012.
- [Macal & North 2014] Charles Macal et Michael North. *Introductory tutorial : Agent-based modeling and simulation*. In Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014, pages 6–20. IEEE, 2014.
- [Marmidis et al. 2008] Grigorios Marmidis, Stavros Lazarou et Eleftheria Pyrgioti. *Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation*. Renewable energy, vol. 33, no. 7, pages 1455–1460, 2008.
- [Márquez et al. 2012] Fausto Pedro García Márquez, Andrew Mark Tobias, Jesús María Pinar Pérez et Mayorkinos Papaalias. *Condition monitoring of wind turbines : Techniques and methods*. Renewable Energy, vol. 46, pages 169–178, 2012.

- [McMillan & Ault 2008] David McMillan et GW Ault. *Condition monitoring benefit for onshore wind turbines : sensitivity to operational parameters*. IET Renewable Power Generation, vol. 2, no. 1, pages 60–72, 2008.
- [Michel 2004] Fabien Michel. *Formalisme, outils et éléments méthodologiques pour la modélisation et la simulation multi-agents*. PhD thesis, Montpellier II, 2004.
- [Milborrow 2006] D Milborrow. *Operation and maintenance costs compared and revealed*. Windstats Newsletter, vol. 19, pages 1–3, 2006.
- [Mili 2008] Seif Eddine Mili. *Conception d'une architecture basée agent pour la création d'un marché virtuel*. 2008.
- [Morin 2013] Edgar Morin. *La méthode : la nature de la nature*. Média Diffusion, 2013.
- [Nandigam & Dhali 2008] Mahidhar Nandigam et Shirshak K Dhali. *Optimal design of an offshore wind farm layout*. In 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pages 1470–1474. IEEE, 2008.
- [Neumann *et al.* 1966] János Neumann, Arthur W Burkset *al.* *Theory of self-reproducing automata*, volume 1102024. University of Illinois press Urbana, 1966.
- [Newell *et al.* 1957] Allen Newell, John Clifford Shaw et Herbert Alexander Simon. *Empirical explorations of the logic theory machine : a case study in heuristic*. In Papers presented at the February 26-28, 1957, western joint computer conference : Techniques for reliability, pages 218–230, 1957.
- [Nguyen & Chou 2018] Thi Anh Tuyet Nguyen et Shuo-Yan Chou. *Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems*. Energy Conversion and Management, vol. 157, pages 86–95, 2018.
- [Nielsen & Sørensen 2011] Jannie Jessen Nielsen et John Dalsgaard Sørensen. *On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components*. Reliability Engineering & System Safety, vol. 96, no. 1, pages 218–229, 2011.
- [Nilsson & Bertling 2007] Julia Nilsson et Lina Bertling. *Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems—life cycle cost analysis for two case studies*. IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 1, pages 223–229, 2007.
- [North *et al.* 2013] Michael J North, Nicholson T Collier, Jonathan Ozik, Eric R Tatara, Charles M Macal, Mark Bragen et Pam Sydelko. *Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony*. Complex adaptive systems modeling, vol. 1, no. 1, pages 1–26, 2013.

- [Oelker *et al.* 2017] Stephan Oelker, Abderrahim Ait Alla, Marco Lewandowski et Michael Freitag. *Planning of maintenance resources for the service of offshore wind turbines by means of simulation*. In *Dynamics in Logistics*, pages 303–312. Springer, 2017.
- [Ohlenforst & Council 2019] Karing Ohlenforst et Global Wind Energy Council. *Global Wind Report 2018*, 2019.
- [Orcutt 1957] Guy H Orcutt. *A new type of socio-economic system*. *The review of economics and statistics*, vol. 39, no. 2, pages 116–123, 1957.
- [Ortegon *et al.* 2013] Katherine Ortegon, Loring F Nies et John W Sutherland. *Preparing for end of service life of wind turbines*. *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, pages 191–199, 2013.
- [Osman & Kelly 1997] Ibrahim H Osman et James P Kelly. *Meta-heuristics theory and applications*. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 6, pages 657–657, 1997.
- [Osman & Laporte 1996] Ibrahim H Osman et Gilbert Laporte. *Metaheuristics : A bibliography*, 1996.
- [Osman 2004] Ibrahim H Osman. *Metaheuristics : models, design and analysis*. In *Proceedings of the fifth Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004, & the seventh Asia-Pacific division meeting, of the International Foundation of Production Research*, Edited by Erhan. Citeseer, 2004.
- [Pachauri & Reisinger 2008] Rajendra K Pachauri et Andy Reisinger. *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthese*. GIEC, 2008.
- [Paris *et al.* 2018] Thomas Paris, Laurent Ciarletta et Vincent Chevrier. *Cosimulation à base d'outils multi-agents : un cas d'étude avec NetLogo*. In *JFSMA 2018-26èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, 2018.
- [Parunak *et al.* 1998] H Van Dyke Parunak, Robert Savit et Rick L Riolo. *Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide*. In *International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 10–25. Springer, 1998.
- [Pavé 1994] Alain Pavé. *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas, 1994.
- [Pérez *et al.* 2013] Jesús María Pinar Pérez, Fausto Pedro García Márquez, Andrew Tobias et Mayorkinos Papaefthymiou. *Wind turbine reliability analysis*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23, pages 463–472, 2013.
- [Perveen *et al.* 2014] Rehana Perveen, Nand Kishor et Soumya R Mohanty. *Off-shore wind farm development : Present status and challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pages 780–792, 2014.

- [Petković *et al.* 2014] Dalibor Petković, Siti Hafizah Ab Hamid, Žarko Čobjašić et Nenad T Pavlović. *Adapting project management method and ANFIS strategy for variables selection and analyzing wind turbine wake effect*. *Natural hazards*, vol. 74, no. 2, pages 463–475, 2014.
- [Podevin 2017] Gérard Podevin. *CHAPITRE 9-La filière de l'éolien offshore posé en France : Nouveaux métiers ou nouveau regard sur les métiers ?*, 2017.
- [Pour & Benlic 2016] Shahrzad M Pour et Una Benlic. *Clustering of Maintenance Tasks for the Danish Railway System*. In *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, pages 791–799. Springer, 2016.
- [Prigogine & Stengers 1979] Ilya Prigogine et Isabelle Stengers. *La nouvelle alliance : métamorphose de la science*. Gallimard, 1979.
- [Pritsker 1984] Alan B Pritsker. *Introduction to simulation and slam ii*. Halsted Press, 1984.
- [Qiu *et al.* 2018] Qingan Qiu, Lirong Cui et Li Yang. *Maintenance policies for energy systems subject to complex failure processes and power purchasing agreement*. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 119, pages 193–203, 2018.
- [Rademakers *et al.* 2003] LWMM Rademakers, H Braam, MB Zaaier et GJW Van Bussel. *Assessment and optimisation of operation and maintenance of offshore wind turbines*. In *Proc. EWEC*, 2003.
- [Rademakers *et al.* 2009] LWMM Rademakers, H Braam, TS Obdam et R Pieterman. *Operation and maintenance cost estimator (OMCE) to estimate the future O&M costs of offshore wind farms*. In *European Offshore Wind 2009 Conference*, volume 1, pages 14–16, 2009.
- [Raknes *et al.* 2017] Nora Tangen Raknes, Katrine Ødeskaug, Magnus Stålhane et Lars Magnus Hvattum. *Scheduling of maintenance tasks and routing of a joint vessel fleet for multiple offshore wind farms*. *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 5, no. 1, page 11, 2017.
- [Rao 1996] BKN Rao. *Handbook of condition monitoring*. Elsevier, 1996.
- [Rausand & Høyland 2004] Marvin Rausand et Arnljot Høyland. *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, volume 396. John Wiley & Sons, 2004.
- [Reddy *et al.* 2017] Reddivari Himadeep Reddy, Sri Krishna Kumar, Kiran Jude Fernandes et Manoj Kumar Tiwari. *A Multi-Agent System based simulation approach for planning procurement operations and scheduling with multiple cross-docks*. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 107, pages 289–300, 2017.
- [Ribrant & Bertling 2007] Johan Ribrant et Lina Bertling. *Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005*. In *2007 IEEE power engineering society general meeting*, pages 1–8. IEEE, 2007.

- [Ribrant 2006] Johan Ribrant. *Reliability performance and maintenance—a survey of failures in wind power systems*. Sweden : KTH School of Electrical Engineering, 2006.
- [Rousset et al. 2014] Alban Rousset, Bénédicte Herrmann et Christophe Lang. *Étude comparative des plateformes parallèles pour systèmes multi-agents*. In ComPAS 2014 : conférence en parallélisme, architecture et systèmes, 2014.
- [Russell & Norvig 2002] Stuart Russell et Peter Norvig. *Artificial intelligence : a modern approach*. 2002.
- [Sahnoun et al. 2014] M Sahnoun, P Godsiff, D Baudry, A Louis et B Mazari. *Modelling of maintenance strategy of offshore wind farms based multi-agent system*. In CIE44 & ISSM14 (44th international conference on computers & industrial engineering & 9th international symposium on intelligent manufacturing and service systems), volume 591, pages 2406–2420, 2014.
- [Sahnoun et al. 2015] M’hammed Sahnoun, David Baudry, Navonil Mustafee, Anne Louis, Philip Andi Smart, Phil Godsiff et Belahcene Mazari. *Modelling and simulation of operation and maintenance strategy for offshore wind farms based on multi-agent system*. Journal of Intelligent Manufacturing, pages 1–17, 2015.
- [Schmid & Klein 1991] Jürgen Schmid et Hans-Peter Klein. *Performance of european wind turbines(a statistical evaluation from the european wind turbine database EUROWIN)*. EUR(Luxembourg), 1991.
- [Schopka & Kopfer 2017] Kristian Schopka et Herbert Kopfer. *Pre-selection strategies for the collaborative vehicle routing problem with time windows*. In Dynamics in Logistics, pages 231–242. Springer, 2017.
- [Schrotenboer et al. 2018] Albert H Schrotenboer, Michiel AJ uit het Broek, Bolor Jargalsaikhan et Kees Jan Roodbergen. *Coordinating technician allocation and maintenance routing for offshore wind farms*. Computers & Operations Research, vol. 98, pages 185–197, 2018.
- [Shafiee 2014] Mahmood Shafiee. *An optimal group maintenance policy for multi-unit offshore wind turbines located in remote areas*. In 2014 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), pages 1–6. IEEE, 2014.
- [Shafiee 2015a] Mahmood Shafiee. *A fuzzy analytic network process model to mitigate the risks associated with offshore wind farms*. Expert Systems with Applications, vol. 42, no. 4, pages 2143–2152, 2015.
- [Shafiee 2015b] Mahmood Shafiee. *Maintenance logistics organization for offshore wind energy : Current progress and future perspectives*. Renewable Energy, vol. 77, pages 182–193, 2015.
- [Shannon 1977] Robert E Shannon. *Simulation modeling and methodology*. ACM SIGSIM Simulation Digest, vol. 8, no. 3, pages 33–38, 1977.

- [Shardlow 1990] N Shardlow. *Action and agency in cognitive science*. PhD thesis, Master's thesis, Department of Psychology, University of Manchester, Oxford . . . , 1990.
- [Siemens 2015] Siemens, 2015.
- [Song *et al.* 2018] Sanling Song, Qing Li, Frank A Felder, Honggang Wang et David W Coit. *Integrated optimization of offshore wind farm layout design and turbine opportunistic condition-based maintenance*. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 120, pages 288–297, 2018.
- [Sørensen 2009] John Dalsgaard Sørensen. *Framework for risk-based planning of operation and maintenance for offshore wind turbines*. *Wind energy*, vol. 12, no. 5, pages 493–506, 2009.
- [Spinato *et al.* 2009] Fabio Spinato, Peter J Tavner, Gerard JW Van Bussel et E Koutoulakos. *Reliability of wind turbine subassemblies*. *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pages 387–401, 2009.
- [Stålhane *et al.* 2015] Magnus Stålhane, Lars Magnus Hvattum et Vidar Skaar. *Optimization of routing and scheduling of vessels to perform maintenance at offshore wind farms*. *Energy Procedia*, vol. 80, pages 92–99, 2015.
- [Stambouli *et al.* 2012] A Boudghene Stambouli, Z Khiat, S Flazi et Y Kitamura. *A review on the renewable energy development in Algeria : Current perspective, energy scenario and sustainability issues*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pages 4445–4460, 2012.
- [Stock-Williams & Swamy 2019] Clym Stock-Williams et Siddharth Krishna Swamy. *Automated daily maintenance planning for offshore wind farms*. *Renewable Energy*, vol. 133, pages 1393–1403, 2019.
- [Stützle & Dorigo 1999] Thomas Stützle et Marco Dorigo. *ACO algorithms for the traveling salesman problem*. *Evolutionary algorithms in engineering and computer science*, pages 163–183, 1999.
- [Swisher *et al.* 2000] James R Swisher, Paul D Hyden, Sheldon H Jacobson et Lee W Schruben. *A survey of simulation optimization techniques and procedures*. In 2000 Winter Simulation Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37165), volume 1, pages 119–128. IEEE, 2000.
- [Taghezout 2011] Noria Taghezout. *Conception et développement d'un système multi-agent d'aide à la décision pour la gestion de production dynamique*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2011.
- [Tavner *et al.* 2006] Peter Tavner, Clare Edwards, Andy Brinkman et Fabio Spinato. *Influence of wind speed on wind turbine reliability*. *Wind Engineering*, vol. 30, no. 1, pages 55–72, 2006.
- [Tavner *et al.* 2008] PJ Tavner, Fabio Spinato, GJW Van Bussel et Efstathios Koutoulakos. *Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application*. In Proceedings of European Wind Energy Conference, Brussels, Belgium, March, 2008.

- [Tavner *et al.* 2013] P J Tavner, DM Greenwood, MWG Whittle, R Gindele, S Faulstich et B Hahn. *Study of weather and location effects on wind turbine failure rates*. Wind energy, vol. 16, no. 2, pages 175–187, 2013.
- [Tavner 2012] P. J. Tavner. Offshore wind turbines reliability, availability and maintenance. The Institution of Engineering and Technology, 2012.
- [Thomas 2005] Vincent Thomas. *Proposition d'un formalisme pour la construction automatique d'interactions dans les systèmes multi-agents réactifs*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2005.
- [Tisue & Wilensky 2004] Seth Tisue et Uri Wilensky. *Netlogo : A simple environment for modeling complexity*. In International conference on complex systems, volume 21, pages 16–21. Boston, MA, 2004.
- [Tracht *et al.* 2013] Kirsten Tracht, Jan Westerholt et Peter Schuh. *Spare parts planning for offshore wind turbines subject to restrictive maintenance conditions*. Procedia CIRP, vol. 7, pages 563–568, 2013.
- [Ulstein 2015] Ulstein, 2015.
- [Vachon 2002] W Vachon. *Long-term O&M costs of wind turbines based on failure rates and repair costs*. In Proceedings WINDPOWER, American Wind Energy Association annual conference, Portland, OR, pages 2–5, 2002.
- [Van Bussel & Schöntag 1997] GJW Van Bussel et Chr Schöntag. *Operation and maintenance aspects of large offshore windfarms*. In EWEC-CONFERENCE-, pages 272–275. BOOKSHOP FOR SCIENTIFIC PUBLICATIONS, 1997.
- [Van Bussel & Zaaijer 2001] GJW Van Bussel et MB Zaaijer. *Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study*. In Proceedings of MAREC, volume 2001, 2001.
- [Van Bussel & Zaaijer 2003] GJW Van Bussel et MB Zaaijer. *Estimation of turbine reliability figures within the DOWEC project*. DOWEC Report, vol. 10048, no. 4, 2003.
- [Voß *et al.* 2012] Stefan Voß, Silvano Martello, Ibrahim H Osman et Catherine Roucairol. *Meta-heuristics : Advances and trends in local search paradigms for optimization*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [Walford 2006] Christopher A Walford. *Wind turbine reliability : understanding and minimizing wind turbine operation and maintenance costs*. United States. Department of Energy, 2006.
- [Walsh *et al.* 2019] C Walsh *et al.* *Offshore Wind in Europe—key trends and statistics 2018*. Wind Europe, Brussels, 2019.

- [Wang & Syntetos 2011] Wenbin Wang et Aris A Syntetos. *Spare parts demand : Linking forecasting to equipment maintenance*. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, vol. 47, no. 6, pages 1194–1209, 2011.
- [Wiggelinkhuizen *et al.* 2008] Edwin Wiggelinkhuizen, Theo Verbruggen, Henk Braam, Luc Rademakers, Jianping Xiang et Simon Watson. *Assessment of condition monitoring techniques for offshore wind farms*. Journal of solar energy engineering, vol. 130, no. 3, page 031004, 2008.
- [Wilensky 1999] Uri Wilensky. *NetLogo (and NetLogo user manual)*. Center for connected learning and computer-based modeling, Northwestern University. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>, 1999.
- [Wilkinson *et al.* 2006] Michael Wilkinson, F Spianto et Mark Knowles. *Towards the zero maintenance wind turbine*. In Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, volume 1, pages 74–78. IEEE, 2006.
- [Winters & Saunders 2018] Jeffrey Winters et Zina Saunders. *The largest wind turbine ever*. Mechanical Engineering, vol. 140, no. 12, pages 31–31, 2018.
- [Wooldridge & Jennings 1995] Michael J Wooldridge et Nicholas R Jennings. *Intelligent agents : Theory and practice*. The knowledge engineering review, vol. 10, no. 2, pages 115–152, 1995.
- [Wooldridge 2009] Michael Wooldridge. *An introduction to multiagent systems*. John wiley & sons, 2009.
- [Yang *et al.* 2009] Wenxian Yang, PJ Tavner et MR Wilkinson. *Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train*. IET Renewable Power Generation, vol. 3, no. 1, pages 1–11, 2009.
- [Zafar 2017] Salman Zafar. *Renewable energy in Algeria*. Africa, renewable energy. <http://www.ecomena.org/renewables-algeria>, 2017.
- [Zgoul & El-Thalji 2011] Moudar Zgoul et Idriss El-Thalji. *Wind Energy Operation and Maintenance Practices in Desert Climate : threats, challenges and solutions*. In GCREEDER 2011, Amman, April 26-28., 2011.
- [Zhang & Wang 2009] Xinyan Zhang et Weiqing Wang. *Wind farm and wake effect modeling for simulation of a studied power system*. In 2009 IEEE/PES power systems conference and exposition, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [Zhang 2014] Zhen You Zhang. *Scheduling and Routing Optimization of Maintenance Fleet for Offshore Wind Farms using Duo-ACO*. In Advanced Materials Research, volume 1039, pages 294–301. Trans Tech Publ, 2014.

- [Zhong *et al.* 2018] Shuya Zhong, Athanasios A Pantelous, Michael Beer et Jian Zhou. *Constrained non-linear multi-objective optimisation of preventive maintenance scheduling for offshore wind farms*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 104, pages 347–369, 2018.
- [Zhou *et al.* 2006] Wei Zhou, Hongxing Yang et Zhaohong Fang. *Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China*. *Renewable Energy*, vol. 31, no. 6, pages 739–753, 2006.
- [Zhou *et al.* 2016] Meirong Zhou, Ming Zhou, Yanchun Pan, Zhimin Chen et Jun Zeng. *Multi-agent-based simulation for policy evaluation of carbon emissions*. In *Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems*, pages 265–272. Springer, 2016.
- [Zhu *et al.* 2019] Wenjin Zhu, Bruno Castanier et Belgacem Bettayeb. *A dynamic programming-based maintenance model of offshore wind turbine considering logistic delay and weather condition*. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 190, page 106512, 2019.
- [Ziebuhr & Kopfer 2017] Mario Ziebuhr et Herbert Kopfer. *Transportation planning with forwarding limitations*. In *Dynamics in Logistics*, pages 243–254. Springer, 2017.
- [Zio *et al.* 2006] Enrico Zio, Piero Baraldi et Edoardo Patelli. *Assessment of the availability of an offshore installation by Monte Carlo simulation*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, no. 4, pages 312–320, 2006.

NOMENCLATURE

CT	Coût total de la maintenance lors d'une simulation
C_{init}	Coût d'installation du système de surveillance pour la maintenance conditionnelle
NT	Nombre d'éoliennes dans le parc éolien offshore
T	La période totale de simulation
st	Nombre d'équipes au départ pendant la période $[k - 1, k]$
$C_{down}(tr, k)$	Coût de la perte d'énergie d'une éolienne tr à l'instant k
$P_e(tr, k)$	Le profit généré par l'éolienne tr dans un état normal pendant la période $[k - 1, k]$
$Down(tr, k)$	Variable binaire définissant l'état de la turbine tr à l'instant k
$C_{deg}(tr, k)$	Coût de la perte d'énergie due au fonctionnement en mode dégradé de l'éolienne tr pendant la période $[k - 1, k]$
$Deg(tr, k)$	Coût de l'énergie perdue due à la dégradation de l'éolienne tr pendant la période $[k - 1, k]$
$C_{tour}(k, te)$	Coût des maintenances effectuées par l'équipe te lancée pendant la période $[k - 1, k]$
$RC_{ACS}(k, te)$	Coût des ressources humaines, des tâches de gestion de la composition de l'équipe et des ressources matérielles pour toutes les équipes lancés pendant la période $[k - 1, k]$ dans le cas de l'utilisation de l'algorithme ACS
$RC_H(k, te)$	Coût des ressources humaines, des tâches de gestion de la composition de l'équipe et des ressources matérielles pour toutes les opérations de maintenance effectuées pendant la période $[k - 1, k]$ dans le cas de l'utilisation de l'algorithme heuristique
$Nbr_{sm}(k, te)$	Nombre des maintenances systématiques commencées pendant la période $[k - 1, k]$
$Nbr_{cbm}(k, te)$	Nombre des maintenances conditionnelles commencées pendant la période $[k - 1, k]$

$Nbr_{cm}(k, te)$	Nombre des maintenances correctives commencées pendant la période $[k - 1, k]$
C_{sm}	Coût de la maintenance systématique
C_{cbm}	Coût de la maintenance conditionnelle
C_{cm}	Coût de la maintenance corrective
c_{ij}	Coût de déplacement de l'éolienne i à l'éolienne j
K	Nombre de bateaux disponibles sur la côte.
D	Temps de travail des équipes de maintenance au debut de la route
d_{ij}	Durée du trajet de l'éolienne i à l'éolienne j
m_j	Durée de la tâche de maintenance j
b_j	Variable d'état binaire indiquant si l'éolienne j a besoin d'une action de maintenance urgente
x_{ij}^k	Variable de décision binaire permettant d'affecter une tâche de maintenance sur un planning
y_j^k	Variable de décision binaire indiquant si l'éolienne j est incluse dans la tournée
τ_0	Valeurs de phéromone initiales
η_{ij}	Informations heuristiques
q_0	Paramètre qui définit l'importance de l'exploitation par rapport à l'exploration
α and β	Paramètres qui déterminent l'importance relative des informations heuristiques et du niveau de phéromone
$\tau_{ij}(t)$	La quantité de phéromone entre l'éolienne i et l'éolienne j . t est le compteur d'itérations
ρ	Le coefficient d'évaporation des phéromones

المخلص

من المتوقع أن تكون طاقة الرياح البحرية المصدر الأول للطاقة في المستقبل بفضل مزاياها العديدة. ومع ذلك ، تعتبر صيانتها نشاطًا معقدًا ومكلفًا ، مما يجذب انتباه الباحثين والصناعيين بشكل متزايد. تقترح في هذه الأطروحة نهج التحسين محاكاة لتخطيط التوجيه والصيانة لمزارع الرياح البحرية من أجل تقليل التكاليف مع الحفاظ على التوفر العالي لتوربينات الرياح. يتم تقديم النمذجة والمحاكاة القائمة على عوامل متعددة للتعامل مع تعقيد النظام. يتم استخدام خوارزمية (أص) لتحسين توجيه مهام الصيانة. من أجل جعل النهج المقترح أكثر واقعية ، أخذنا في الاعتبار العديد من العلامات والقيود مثل الظروف الجوية وتكلفة الموارد ومدة الصيانة. تم تجربة العديد من السيناريوهات لإثبات كفاءة النهج خلال دورة حياة المزرعة بأكملها. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسن التكلفة وتوليد الطاقة وتوافر التوربينات.

Résumé

L'énergie éolienne offshore est supposé devenir la première source d'énergie à l'avenir grâce à ses nombreux avantages. Cependant, sa maintenance est une activité complexe et coûteuse, qui attire de plus en plus l'attention des chercheurs et des industriels. Cette thèse propose une approche de simulation-optimisation pour le routage et la planification de la maintenance des parcs éoliens offshore afin de minimiser les coûts tout en gardant une haute disponibilité des éoliennes. Une modélisation et une simulation multi-agents sont introduites pour gérer la complexité du système. L'algorithme Ant Colony System (ACS) est utilisé pour optimiser le routage des tâches de maintenance. Afin de rendre l'approche proposée plus réaliste, nous avons considéré plusieurs paramètres et contraintes tels que les conditions météorologiques, le coût des ressources et la durée de la maintenance. Plusieurs scénarios sont expérimentés pour démontrer l'efficacité de l'approche pendant tout le cycle de vie du parc. Les résultats obtenus montrent une amélioration du coût, de la production d'énergie et de la disponibilité des éoliennes.

Abstract

Offshore wind energy is expected to be the first source of energy in the future thanks to its numerous advantages. However, its maintenance is a complex and costly activity, which is increasingly attracting the attention of researchers and industrials. This thesis proposes a simulation-optimization approach for the routing and the scheduling of maintenance for offshore wind farms in order to minimize cost while keeping a high availability of wind turbines. A multi-agent based modeling and simulation is introduced to deal with the complexity of the system. Ant Colony System (ACS) algorithm is used to optimize maintenance tasks routing. In order to make the proposed approach more realistic, we have considered several parameters and constraints such as weather conditions, resources cost, maintenance duration. Several scenarios are experimented to demonstrate the approach efficiency during all the life cycle of the farm. The obtained results show the improvement of cost, energy generation and turbine availability.