



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GÉNIE MECANIQUE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies
SPECIALITE : Maintenance Industrielle

Thème :

Gestion de la maintenance d'un parc éolien
A l'aide d'AnyLogic

Réalisé par :

-Boukhalkhal elmoatsim billah

Soutenu devant le jury composé de :

- M.RahmaniPr./ UAT-Laghouat Président
- A.RezigMCB/ UAT-Laghouat Encadreur
- A.MechraouiMAA/ UAT-Laghouat Examineur

2023/2024

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

Mes frères et mes sœurs, ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A tous mes amis et mes camarades.

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

Remerciement

*Louange à Allah Le Tout Puissant Qui nous a accordé la foi,
le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier infiniment notre encadreur,
Monsieur ahmida rezig pour sa gentillesse, sa qualité
remarquable d" encadrement, pour sa grande disponibilité,
sa grande contribution, et pour le temps qu'il a consacré afin
de bien mener ce travail de mémoire. Nous avons été
nommés Monsieur de vous exprimer nos reconnaissances les
plus sincères.*

*Nous remercions également Monsieur Rahmani professeur à
Université de Laghouat, pour Intérêt qu'il a porté à notre
travail en acceptant de présider le jury de soutenance.*

*Nous remercions également Monsieur Mechraoui, Maître de
conférences à Université de Laghouat, d'avoir accepté
d'examiner notre travail.*

*Merci aussi à tous nos collègues et amis, nous leur
exprimons notre profonde sympathie et leur souhaitons
beaucoup de chance pour leurs travaux.*

*Enfin, nous tenons à témoigner notre profonde
gratitude à L'université de Laghouat représentée par les
enseignants du département mécanique ainsi que le
personnel administratif, pour leur gentillesse, leur aide et
leurs conseils précieux*

Gestion de la maintenance d'un parc éolien

A l'aide d'AnyLogic

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les modes de dégradations des éoliennes	8
- Les composants d'une éolienne	9
- Répartition des couts de l'éolienne	10
- La fiabilité des éoliennes	12
- Les causes de pannes des éoliennes	13
- Analyse des défaillances des éoliennes	15
- Méthodes pour améliorer la fiabilité	16
- La maintenance des éoliennes	17
- Les stratégies de maintenance	18
- Les pièces de rechange pour la maintenance	19
- Les restrictions de la maintenance	20
- Les méthodes de maintenance	20
- Comparaison entre les types de maintenances	24
- Gestion de la maintenance des parcs éoliens	25
- Conception des installations éoliennes offshore	25
- Ressources humaines	27
- Ressources matérielles	28
- Organisation de la chaîne logistique	30
Chapitre 2 : Concept d'agent et système multi-agent	
- Introduction	35
- Historique	36
- Définition d'un agent	37
- Agent cognitif	38
- Agent réactif	38
- Agent hybride	39

- Agent BDI	39
- Les systèmes multi-agents	40
- Propriétés des systèmes multi-agents	41
- Interaction et coopération	42
- Communication entre agents	42
- Environnement	43

Chapitre 3 : Architecture multi-agents d'un parc éolien

Introduction	46
- Architecture multi-agents	47
- Agents "Éolienne"	47
- Agents "Maintenance"	50
- Agents "Ressource"	51
-Agent "Météo"	51
- Agent "Monitoring"	51

Chapitre 4 : Simulation et optimisation d'un parc éolien

- Introduction	55
- Plateforme de simulation.	55
- Simulation-optimisation.	56
- Création d'agents.	58
-algo.	59
-fonction.	61
- interprétation de resultats	67
-conclusion.	74

Figure 1.1 – Les composants d’une éolienne.	9
Figure 1.2 – Répartition des coûts pour un parc éolien onshore.	12
Figure1.3 – La relation entre la cause et le mécanisme de détérioration.	14
Figure 1.4 – La relation entre la cause et le mode de défaillance d’un arbre principal d’une éolienne.	14
Figure1.5–Les taux moyens de pannes des composants des éoliennes.	16
Figure 1.6 – Structure générale du modèle informatique pour un parc éolien.....	17
Figure1.7–comparaison entre la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance préventive systématique et la maintenance corrective.	23
Figure1.8– Évolution de la taille et puissance des éoliennes.	26
Figure1.9– Principaux métiers sur la chaîne de valeur de l’éolien.	27
Figure1.10– Helicopter de maintenance d’éolienne "AS355TwinSquirrel".	29
Figure 3.1 – Regroupement des taches de maintenances.	47
Figure 4.1 : Espace de travail dans AnyLogic.. . . .	57
Figure 4.2 : Ajout d’algorithme des moyens de transport à l’entrtnien.	59
Figure 4.3 : Définition de la logique de la gestion des transports.	60
Figure 4.4 : Définition des intervalles de temps.	62
Figure 4.5 : Gestion des demandes de transport.	62
Figure 4.6 : Définition du comportement des turbines.	63
Figure 4.7 : Déclenchement d’un message « besoin d’un service planifié ».	65
Figure 4.8 : Modification de l’animation des pales.	66
Figure 4.9 : Création de l’indicateur de l’état de la turbine.	66
Figure 4.10 : Regroupement des taches de maintenances.	66
Figure 4.11 : Disponibilité des équipements (nombre d’équipe de service :3).....	68
Figure 4.12 : Utilisation de l’équipe de service (nombre d’équipe de service :3)...	68
Figure 4.13 : Revenus et dépenses (nombre d’équipe de service :3).	69
Figure 4.14 : Disponibilité des équipements(nombre d’équipe de service :1).....	70
Figure 4.15 : Utilisation de l’équipe de service (nombre d’équipe de service :1)...	71
Figure 4.16 : Revenus et dépenses (nombre d’équipe de service :1.	72

Introduction générale

On s'inquiète de plus en plus du caractère limité des réserves mondiales de combustibles fossiles (Manwell et al. 2002[1]). La demande mondiale d'énergie augmente avec la croissance démographique. La vie quotidienne humaine normale, comme la communication, les transports, les soins de santé, etc., devient de plus en plus dépendante de l'énergie. Les nations sont actuellement mises au défi de trouver des mesures proactives pour se conformer aux politiques mondiales sur le changement climatique et répondre efficacement au caractère limité des réserves de combustibles fossiles de la Terre.

Un parc éolien est un ensemble d'éoliennes utilisées pour générer de l'électricité. Le choix des sites d'implantation de ce type de parc dépend principalement du gisement de vent (vitesse moyenne durant l'année) et de sa proximité de ville afin de l'alimenter en électricité. Cette source d'énergie est susceptible de devenir la première source d'énergie dans l'avenir (Perveen, Kishor&Mohanty 2014[2]).

En Algérie, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance a été implantée à Adrar et mise en service en juin 2014. L'énergie électrique fournie par cette ferme est injectée au réseau local et le taux de pénétration de l'énergie éolienne représenterait 5% environ. La puissance éolienne totale installée en Algérie est donc actuellement insignifiante. Cependant, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son nouveau programme des Energies Renouvelables, d'installer d'autres parcs éoliens d'une puissance totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5010 MW à l'horizon 2030 [3].

Le plus grand obstacle devant le développement de cette énergie est son prix de maintenance élevé comparé aux autres sources d'énergies. La maintenance des éoliennes est une tâche complexe, coûteuse et difficile à effectuer surtout quand les conditions météorologiques sont dégradées (vent de sable).

Les spécialistes ont proposé une architecture permettant d'intervenir rapidement en cas de panne en installant des hangars abritant un service de maintenance complet et permanent dans le parc éolien.

D'après (G.Hassan 2001 [4]) le coût de la maintenance constitue de 10 et 15% pour des éoliennes onshore (terrestre). Ce coût dépend très fortement de la stratégie de maintenance ; par exemple la maintenance préventive (systémique et/ou conditionnelle). L'intervention de plusieurs acteurs dans le fonctionnement du système d'intervention rend la tâche complexe et difficile. L'utilisation des systèmes distribués, notamment les systèmes multi-agents, est une solution intéressante pour résoudre le problème de l'organisation et la planification de la maintenance d'un parc éolien.

Ce travail propose un modèle basé sur les systèmes multi-agents pour la maintenance d'un parc éolien onshore prenant en compte plusieurs modes de défaillance. Une nouvelle stratégie de maintenance est proposée pour augmenter la production énergétique et réduire le coût.

Chapitre 1

LES MODES DE DÉGRADATIONS
DES ÉOLIENNES

1.1 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-commission2011).

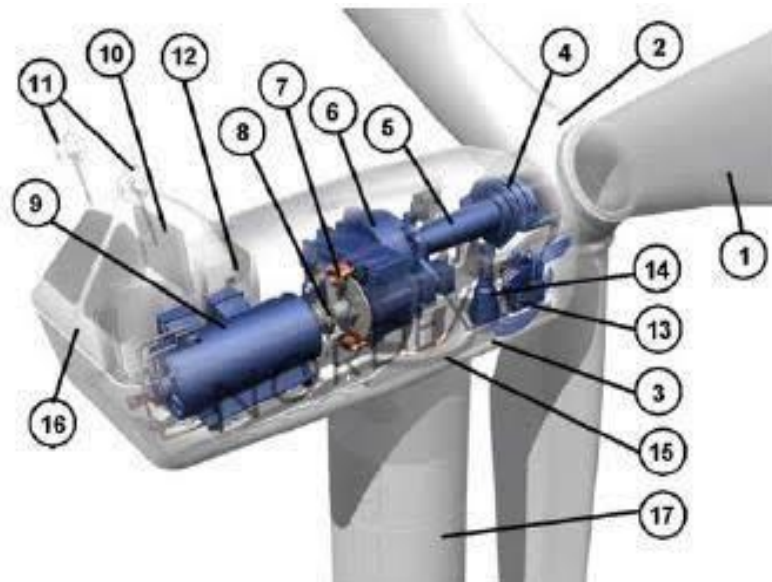
Ainsi, avec la forte pénétration de l'énergie éolienne, la fiabilité va devenir un facteur essentiel au cours des prochaines années. En raison de l'environnement concurrentiel, les différents acteurs du secteur préfèrent les configurations d'éoliennes les plus productives et économiques. L'analyse des 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 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 Les composants d'une éolienne :

La structure basique d'une éolienne à 3 pales est illustrée dans la figure 1.1. 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).



1- pales	7- frein à disque	13- centrale hydraulique.
2- Moyeu rotor	8- accouplement	14- mécanisme
3- Nacelle	9- génératrice	15- palier du système d'orientation équipés d'un frein à disque
4- Cardon	10- radiateur de refroidissement	
5- Transmission	11- centrale de mesure de vent	16- capot
6- Multiplicateur de vitesse	12- contrôle	17- mât.

Figure 1.1 – Les composants d'une éolienne (bezzaoucha et al.2018)

(bezzaoucha et al.2018), identifie les composants de l'éolienne qui reviennent le plus souvent dans la littérature :

- **Rotor-pales:** se compose d'un moyeu et de pales. Il peut convertir l'énergie éolienne en énergie mécanique.

- **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.
- **Boîte de vitesses :** située entre le rotor et le générateur. Il accélère le taux de transmission de l'énergie mécanique vers le générateur.
- **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.
- **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.
- **Générateur:** transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Contrôle électrique:** son rôle est de réguler le générateur.
- **Système de freinage:** utilisé pour arrêter l'éolienne en cas de vent fort ou de défaillance d'un composant critique.
- **Le convertisseur :** est capable d'ajuster la fréquence et la tension du générateur au réseau.
- **Transformateur :** Il augmente la tension de l'électricité produite pour permettre son transport dans les petits fils électriques

1.3 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 terrestres ont été envisagés dans les régions ventées des Pays-Bas, ont conduit à des préoccupations concernant l'accès pour la

maintenance des éoliennes mais aussi à la fiabilité et la nécessité de parvenir à un niveau élevé de 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).

1.3.1 Coûts d'installation :

Les parcs éoliens onshore utilisent de grandes éoliennes dont le coût est actuellement estimé à environ 0,65 million £/MW, par rapport à l'offshore qui est estimé à 1,2 million £/MW. La structure d'une éolienne onshore est également imposante ; le mât d'une éolienne de 3,5 MW atteint environ 90 m de hauteur, et le diamètre du rotor est de l'ordre de 100 m. Les éoliennes sont généralement installées sur des terrains plats ou légèrement inclinés, ce qui facilite l'accès et l'installation. Contrairement aux structures offshore, les défis liés aux conditions environnementales, comme le vent et les vagues, sont moins complexes, ce qui réduit la nécessité de fondations coûteuses et robustes. En conséquence, une fondation onshore peut représenter une part moindre du coût total d'installation comparée aux offshore. Les coûts d'installation des éoliennes onshore sont ainsi souvent moins élevés en raison de la simplicité des travaux de construction et des matériaux utilisés. (Tavner 2012).

Cependant, plutôt que de concevoir chaque éolienne à titre individuel, la conception d'une éolienne onshore peut également être standardisée pour une utilisation sur l'ensemble d'un parc éolien. Cela permet aux coûts des éoliennes onshore d'être réduits progressivement grâce à la production en série et à l'expérience accumulée à travers les nombreux projets de parcs éoliens dans des pays comme les États-Unis, l'Allemagne, et la Chine.

1.3.2 Coûts de la maintenance :

Les estimations des coûts de l'énergie éolienne onshore varient en fonction du site et du projet, mais la section précédente montre que les projets d'éoliennes onshore sont beaucoup moins coûteux que les offshore. Étant donné que le design des éoliennes est adapté à des conditions terrestres, la réalisation d'une solution économique favorable dépend de la capacité de contrôler le coût du cycle de vie du parc éolien. Une grande partie des coûts actuels de l'éolienne onshore peut être attribuée aux fondations, au raccordement au réseau et à la maintenance. L'exploitation et la maintenance

(Opération & Maintenance en anglais) des parcs éoliens onshore sont moins complexes que celles des offshore. Par conséquent, les coûts d'O&M pour certains parcs éoliens onshore européens varient de 12%, beaucoup moins que les coûts pour les parcs offshore qui sont de 18% à 23%. Les conditions des parcs onshore nécessitent des constructions et des opérations de mise en service moins onéreuses. L'accessibilité pour les entretiens routiniers est généralement plus facile. Pendant l'hiver, un parc éolien onshore est rarement inaccessible pendant plusieurs jours en raison de mauvaises conditions météorologiques. Même avec des conditions météorologiques défavorables, les tâches d'O&M sont moins coûteuses que celles en mer en raison de la proximité des sites, de la taille du parc et de la stratégie de maintenance. Les conditions terrestres ne nécessitent pas d'équipement spécial pour installer et changer des pièces, et ces pièces peuvent être disponibles rapidement. Par conséquent, des techniques de pointe sont toujours 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 importantes afin de maintenir un bon niveau de disponibilité de l'éolienne (Tavner 2012).

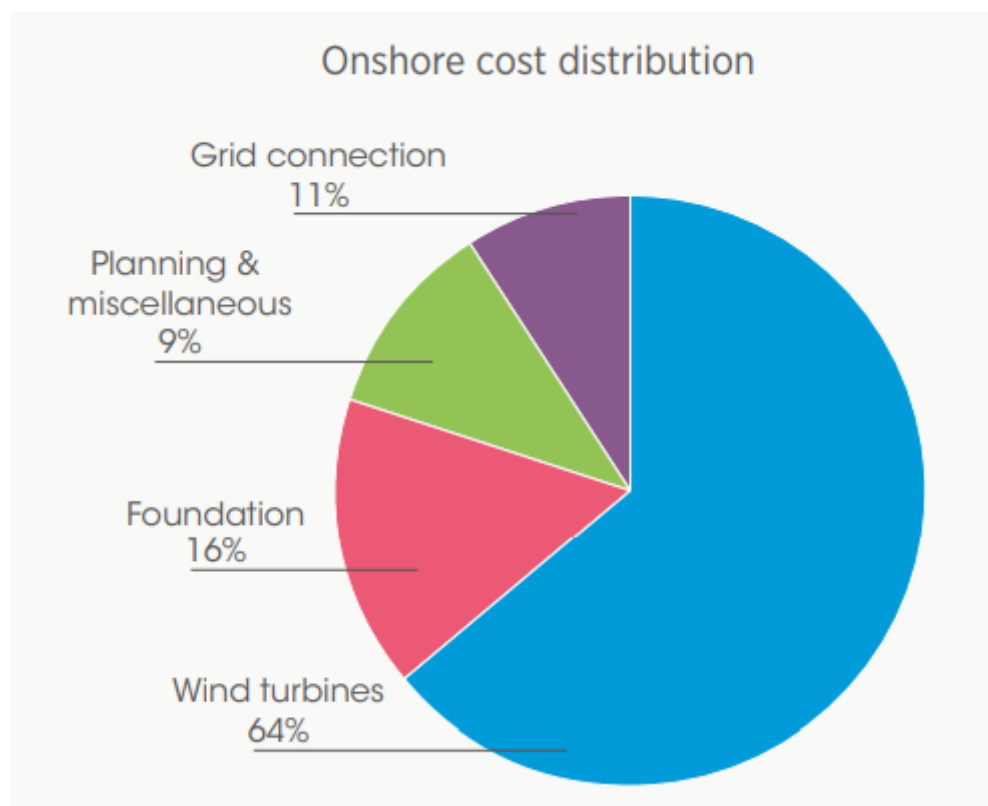


Figure 1.2 – Répartition des coûts pour un parc éolien onshore [**].

** : <https://www.irena.org/>

1.4 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.

1.5 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 (hyerset 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 1.3 montre la relation qui existe entre la cause de la panne et le mode de détérioration, tandis que la figure 1.4 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 les temps d'arrêt.

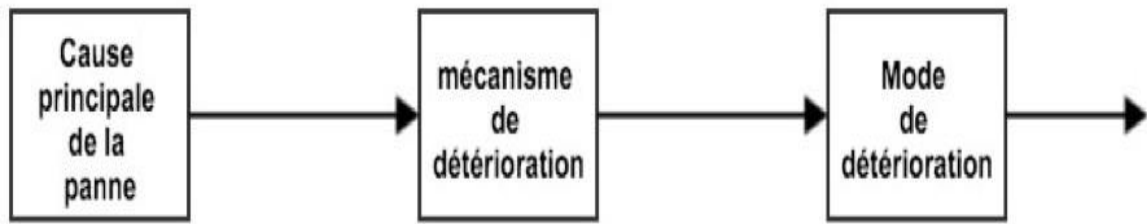


Figure 1.3– La relation entre la cause et le mécanisme de détérioration (Tavner2012).

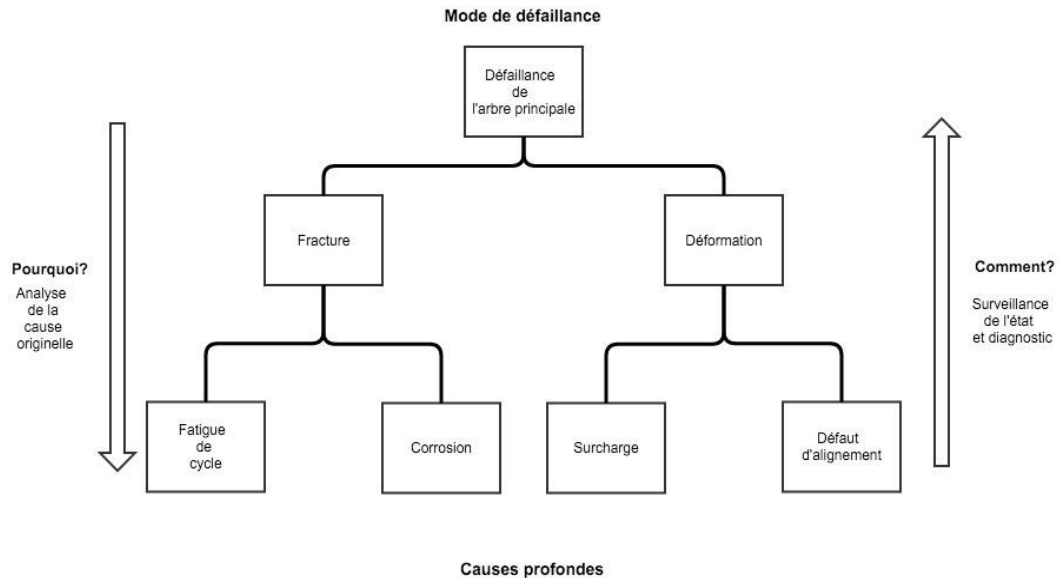


Figure 1.4 – La relation entre la cause et le mode de défaillance d'un arbre principal d'une éolienne (Tavner 2012).

La figure 1.4 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 onshore (Bezzaouchaet 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

1.6 Analyse des défaillances des éoliennes

Dans le programme germanique (Dutch offshore wind energy converter program 'DOWEC'), (Van Bussel et Zaaijer 2001), (Van Bussel et 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 et 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 (VanBussel et Zaaijer 2001), (VanBussel et Zaaijer 2003), (ribrant et 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 et Ault 2008) ont démontré avec des données Wind stats 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 1.5. 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.

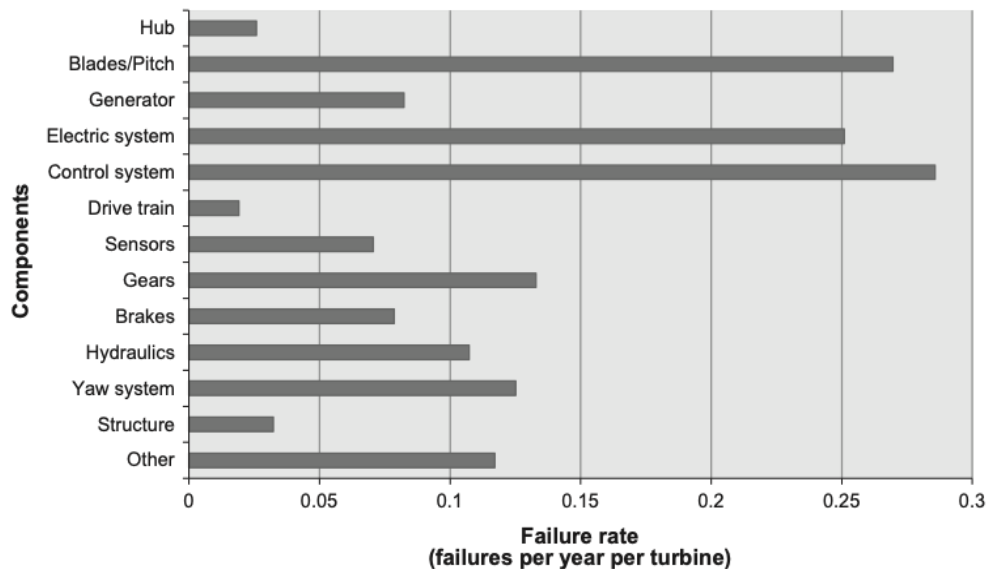


Figure 1.5—Les taux moyens de pannes des composants des éoliennes (Pérez et al. 2013).

1.7 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 En ercon a par exemple pris la décision d'enlever la boîte à vitesses et d'utiliser 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 1.6). 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 et Giebhardt 2005), (Yang *et al.* 2009).

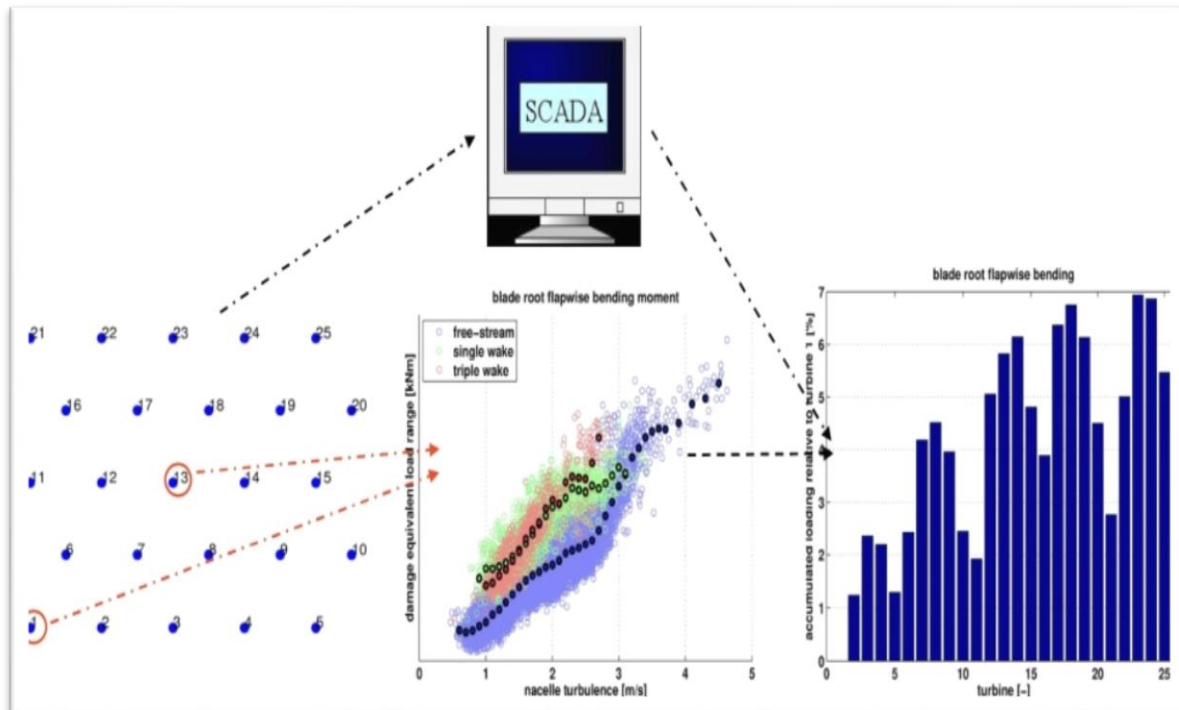


Figure 1.6 – Structure générale du modèle informatique pour un parc éolien

(Rademakers et al. 2009)

1.8 La maintenance des éoliennes :

La maintenance des éoliennes peut s'effectuer sur la partie mécanique, électrique ou bien sur les composants de contrôle des éoliennes. La maintenance peut concerner des opérations courantes nécessaires au bon fonctionnement du parc éolien, c'est dans ce cas une maintenance préventive. Ce type de maintenance regroupe des opérations telles que le contrôle des huiles et la vidange, les tests électriques, le graissage des éoliennes. Les logiciels de gestion du parc éolien sont également régulièrement mis à jour. (Kobbacy & Murthy 2008).

La maintenance curative est, elle, envisagée lors des dysfonctionnements des équipements éoliens, qui nécessitent des réparations spécifiques. La maintenance des éoliennes est coûteuse (plusieurs milliers d'euros par appareil). Elle fait appel à des techniciens spécialisés dans ce domaine qui peuvent proposer une expertise technique des appareils. (Milborrow 2006).

Une maintenance régulière du parc éolien est nécessaire pour être en conformité avec la réglementation environnementale (Tavner et al. 2008).

1.9 Les stratégies de maintenance :

Il y a 4 principales stratégies de maintenance qui sont : la maintenance corrective, préventive, prédictive ou axée sur la fiabilité, alors il faut choisir entre ces stratégies pour la mettre en œuvre. Cette étape cruciale permet une meilleure gestion des équipements.

➤ **Stratégie de maintenance corrective ou réactive :**

La stratégie de maintenance corrective devrait toujours être réservée aux équipements non essentiels à la production et dont le coût de remplacement est faible.

Le coût de l'application d'une stratégie de maintenance corrective est le plus élevé car elle ne peut pas être planifiée, mobilise des équipes importantes en surnombre pour faire face aux pics d'incidents, engage des périodes d'astreinte coûteuses et génère du stress pour le mainteneur et de l'insatisfaction pour le client, le résident ou l'utilisateur.

➤ **Stratégie maintenance préventive :**

La maintenance préventive et la maintenance curative se distinguent. La première est la stratégie la plus communément utilisée. L'inspection, le contrôle et l'entretien des équipements techniques sont programmés à intervalles réguliers. Bien qu'elles soient faciles à programmer, à exécuter et à suivre la réalisation de l'ensemble des tâches de la maintenance préventive et le temps qui lui est consacré constituent un poste de dépense substantiel. Dans la plupart des cas, le déclenchement des interventions reste fondé sur des critères et des choix théoriques et arbitraires en termes d'actions à entreprendre et de périodicité des visites. Le coût d'une telle approche de maintenance peut ainsi toujours être réduit et le choix de la meilleure stratégie constitue un levier important d'économie pour le gestionnaire de patrimoine et de différenciation pour le prestataire de maintenance.

La maintenance préventive n'est pour autant pas aussi efficace que la maintenance prédictive.

➤ **Stratégie de maintenance prédictive :**

La maintenance prédictive permet de prévoir le besoin de remplacement ou de révision d'un élément avant que celui-ci n'entraîne une avarie. Le but de la maintenance prédictive est, d'augmenter la durée de vie ainsi que la fiabilité des équipements. Elle permet également une nette réduction de la charge de travail des équipes techniques et des temps d'arrêt des installations. Donc, la maintenance prédictive permet, d'optimiser au maximum le budget de maintenance.

Point négatif: la maintenance prédictive peut être complexe à implémenter, car elle nécessite des capteurs et beaucoup de traitement de données.

➤ **Une stratégie de maintenance axée sur la fiabilité :**

La maintenance axée sur la fiabilité, en anglais « Reliability Centered Maintenance » (RCM), est issue du milieu aéronautique où la maintenance constitue un enjeu capital. Elle consiste notamment à prioriser les éléments critiques dont les défaillances peuvent entraîner des conséquences systémiques sur une installation technique. En fonction des priorités données aux équipements, la RCM permettra de choisir la stratégie de maintenance la plus utile: réactive, préventive ou prédictive.

Utiliser la maintenance axée sur la fiabilité, c'est aussi comprendre que l'âge d'un équipement n'est pas dans la plupart des cas un critère décisif sur sa propension à tomber en panne. Elle est l'apanage des équipes expérimentées dont les moyens mis à disposition sont importants. Elle dénote d'un haut niveau de maturité. Correctement mise en place, il s'agit la stratégie la plus pertinente pour les industries lourdes.

1.10 Les pièces de rechange pour la maintenance :

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 (Tavner2012). Ces pièces de rechange peuvent être répertoriées comme suit:

1. Les pièces principales :

- Les pales
- La boîte à vitesses.
- Le générateur
- 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 paquets de graissage
- Les huiles de lubrification
- Les filtres

1.11 Les restrictions de maintenance :

La planification et l'ordonnement 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 onshore. 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 principalement les vents forts et les tempêtes de sable dans les régions désertiques. Le transport des petites pièces peut se faire par camion ou hélicoptère et n'est donc pas influencé par l'état des routes, mais par de mauvaises conditions de visibilité et les tempêtes de sable. Les gros composants (les boîtes à vitesse, les pales), quant à eux, sont transportés par des véhicules spécialisés et nécessitent des grues pour être remplacés. Les vents violents et les tempêtes de sable pourraient donc interdire toute activité de maintenance (Tracht et al. 2013).

1.12 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).

1.12.1 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, lors que 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 (rao1996). 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 dessous-traitants, des véhicules de moyennes tailles, des grandes grues, etc) et des délais allant de 2 à 5 jours d'intervention.

1.12.2 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.

➤ 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).

➤ 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 œuvre d'un système basé sur la condition est que les données statistiques telles que la moyenne du temps d'arrêt peuvent être disponibles. 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 1.7 montre une comparaison entre la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance préventive systématique et la maintenance corrective (rao 1996).

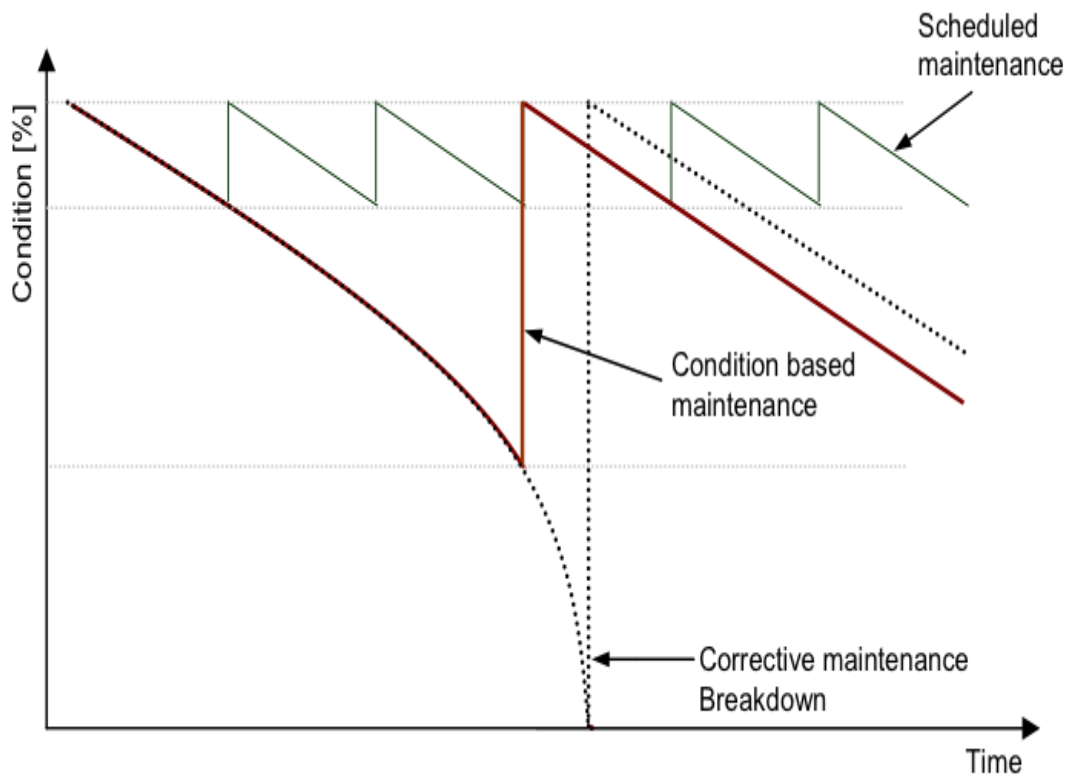


Figure 1.7 – comparaison entre la maintenance préventive conditionnelle, la maintenance préventive systématique et la maintenance corrective (Ribrant 2006).

1.13 Comparaison entre les types de maintenances :

La figure 1.7 montre un exemple graphique des scénarios de maintenance possibles. La comparaison montre que la maintenance systématique 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 systématique 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>

Table1.1–Comparaison entre les différents types de maintenance (Rao 1996),(Giebhardt et al.2004).

1.14 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 un parti important du coût global du cycle de vie d'un projet éolien. 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 onshore compétitive face 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.

1.15 Conception des installations éoliennes :

Si les premiers prototypes d'éoliennes onshore étaient de simples copies des éoliennes marines, les machines se sont peu à peu adaptées aux conditions terrestres. Les premiers projets éoliens onshore ont consisté à installer des éoliennes dans des zones variées, souvent sur des collines ou des plaines avec des conditions de vent favorables. Depuis, la taille et la puissance des éoliennes onshore ont constamment évolué. En 2018 (connaissance des énergies 2017), la capacité moyenne des éoliennes onshore nouvellement installées était de 3,2MW. 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 onshore d'une puissance de 5MW (Walsh et al. 2019).

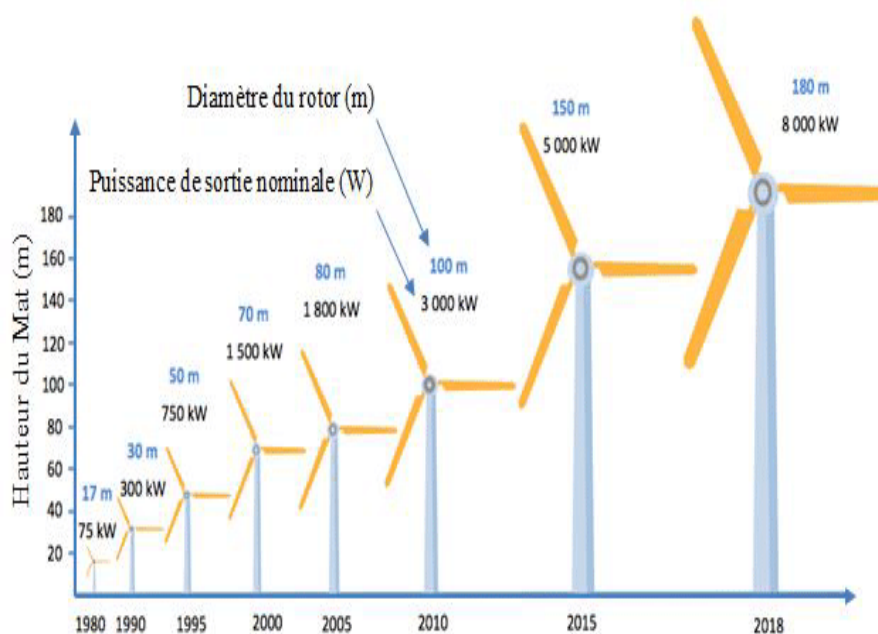


Figure 1.8 – Évolution de la taille et puissance des éoliennes (connaissance des énergies 2017)

Cette section souligne l'importance cruciale de la gestion intégrée et de la conception précise des installations des parcs éoliens offshore. La recherche de modèles de gestion intégrale vise à garantir la viabilité technique, économique et environnementale des projets éoliens, dans le cadre du développement durable. Une compréhension approfondie des phénomènes météorologiques, des vents et de l'ingénierie marine est essentielle pour une conception efficace. (Esteban et al. 2009)

La conception d'un parc éolien offshore implique non seulement le positionnement stratégique des éoliennes pour maximiser la capture d'énergie éolienne, mais aussi la planification des aspects logistiques de la maintenance. Les recherches abordent divers aspects de la conception, notamment la modélisation générale des parcs éoliens, l'optimisation des infrastructures électriques, le

placement et l’agencement des éoliennes, ainsi que l’optimisation des configurations et des positions. (Giebel & Hasager 2016)

Il est souligné que la conception des installations est aussi importante que celle des éoliennes elles-mêmes, et chaque détail peut avoir un impact significatif à long terme, y compris sur la maintenance des éoliennes. Pour les futurs parcs éoliens algériens, une conception minutieuse est nécessaire pour prendre en compte les aspects liés à l’installation et à la maintenance, en tenant compte des particularités du désert, telles que les routes d’accès, le réseau électrique et les conditions météorologiques. (Nandigam & Dhali 2008)

1.15 Ressources humaines :

Depuis près d’une décennie de nombreux rapports prospectifs ont cherché à mesurer l’impact de la filière de l’éolien 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’adjoindre dans bien des cas des compétences additionnelles (Podevin 2017).

La figure ci-dessous donne un aperçu du nombre de métiers qui peuvent constituer le paysage de l’éolienne.



Figure 1.9 – Principaux métiers sur la chaîne de valeur de l’éolien (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 même s'ils 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 (maintenance citée dans la section précédente). Ce qui signifie intervenir périodiquement 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 exercent 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 mobilisés 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 vers l'éolienne ou le poste électrique étant une opération de précision, la maîtrise de la houle et, de manière plus générale, la sécurité sont des éléments clés. Faisant qu'accroître les risques. Les compétences nécessaires pour la maintenance des éoliennes 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.

1.16 Ressources matérielles :

La maintenance des éoliennes nécessite des ressources matérielles spécifiques adaptées aux différentes conditions de la maintenance. Avec le développement de l'éolienne, nous avons vu émerger de nouveaux équipements dédiés aux besoins de cette nouvelle industrie. Les camions et les hélicoptères 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 a évolué, les besoins en

termes de matériaux sont devenus plus clairs pour les acteurs de l'industrie éolien. Cela leur a permis de s'adapter pour offrir Hélicoptères qui répondent au mieux aux besoins de la maintenance des éoliennes. Le choix du type et de la composition Hélicoptères a un grand impact sur les coûts de la maintenance des éoliennes (Halvorsen-Weare et al.2013).Cet aspect a conduit les producteurs d'éoliennes à s'intéresser aux Hélicoptères pour la maintenance, et les a amener à participer à la conception de Hélicoptère conçu pour la maintenance d'éolienne . Siemens a ainsi été en 2015 le premier groupe à commander ce nouveau type de hélicoptères destinés spécialement à l'exploitation et la maintenance des parcs équipés d'éoliennes de leur marque (Siemens 2015). La figure 1.10 montre la Hélicoptère en question "AS355 TwinSquirrel".



Figure1.9–Hélicoptère de maintenance d'éolienne "AS355TwinSquirrel"

1.18 Organisation de la chaîne logistique :

Les transporteurs 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'œuvre qualifié, cela réduit les marges bénéficiaires,

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 et 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 et 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 et 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 logistique de la maintenance dans l'industrie de l'énergie éolienne 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 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'œuvre de maintenance, de location d'hélicoptère 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 des parcs éoliens, les moyens de transport nécessaires et les camions 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, 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 onshore. Dans l'étude de (Oelkeretal.2017), une modélisation des processus de maintenance d'un parc éolien 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. (Jinetal.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. (Dewan2014) 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 (Shafiee2015b) qui fait un état de l'art de la logistique de maintenance dans l'industrie de l'énergie éolienne 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.

1.19 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 imprévues. 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.

Chapitre 2

CONCEPT D'AGENTS ET SYSTEME MULTI-AGENTS

II .1 Introduction :

Lors de la conception de systèmes complexes, dynamiques et stochastiques, la simulation est généralement reconnue comme l'une des meilleures technologies d'aide à la conception. Il constitue une aide précieuse dans le processus de prise de décision stratégique et tactique. (Sahnoun et al. 2015)

Le domaine de l'informatique ne se limite plus à des recherches théoriques et expérimentales isolées, comme cela fut le cas à ses débuts. En effet, ces dernières années, l'utilisation des outils informatiques s'est étendue à pratiquement tous les domaines, visant à faciliter des tâches complexes pour l'homme. L'intégration de l'informatique dans divers domaines scientifiques a donné naissance à de nouvelles disciplines telles que la bio-informatique, la domotique, l'imagerie informatique et l'automatique. Elle est devenue un outil essentiel d'aide à la prise de décision, permettant aux décideurs d'accéder rapidement à des données et à des métriques qui étaient auparavant difficiles à obtenir. Cependant, en raison de la nouveauté de cette utilisation de l'informatique, de nombreux obstacles subsistent. Pour intégrer l'informatique dans n'importe quel domaine, il est essentiel de comprendre l'ensemble de ce domaine, aussi complexe soit-il. Plusieurs axes de l'informatique ont émergé pour surmonter cette complexité. Parmi eux, les systèmes multi-agents (SMA) occupent une place centrale dans ce chapitre. (bads.2018)

Les systèmes multi-agents (SMA) se sont révélés pertinents pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes. Ils intéressent de nombreux domaines de l'informatique, tels que l'intelligence artificielle, les systèmes distribués, la robotique et même la vie artificielle. Leur champ de recherche est vaste. (Sahnoun et al. 2015)

Ces systèmes sont idéaux pour représenter des problèmes impliquant plusieurs méthodes de résolution, différentes perspectives et/ou plusieurs solveurs. Avant de les utiliser, il est essentiel de comprendre les concepts d'agent, de SMA, ainsi que les notions sous-jacentes. (Chaib-draa et al. 2001)

II .2 Historique :

II .2.1 Origines :

- Le concept d'agents interagissant entre eux remonte à l'Antiquité. Philosophes et penseurs discutaient souvent de la manière dont les actions individuelles contribuent aux résultats collectifs.
- Cependant, la formalisation des systèmes multi-agents (MAS) a commencé au milieu du XXe siècle. (Newell et al. 1957)

II .2.2 Théorie des jeux et économie :

- La théorie des jeux, développée par des mathématiciens tels que John von Neumann et Oskar Morgenstern, a posé les bases pour comprendre les interactions stratégiques entre agents rationnels.
- Les économistes ont utilisé la théorie des jeux pour modéliser la dynamique des marchés, les enchères et les processus de prise de décision n (Newell et al. 1957)

II .2.3 Intelligence artificielle et systèmes distribués :

- Dans les années 1970 et 1980, les chercheurs ont exploré les systèmes multi-agents en intelligence artificielle et en informatique distribuée.
- L'intelligence artificielle distribuée (DAI) s'est concentrée sur le contrôle décentralisé, la coordination et la communication entre agents intelligents.
- Les modèles croyance-désir-intention (BDI) ont émergé, mettant l'accent sur les croyances, les désirs et les intentions d'un agent. (Chaib-Draa et al. 2001).

II .2.4 Modélisation basée sur les agents (ABM) :

- L'ABM a gagné en importance dans les années 1990. Il consiste à créer des modèles où les agents suivent des règles simples, entraînant des comportements complexes émergents.
- L'intelligence de groupe, inspirée des systèmes naturels tels que les colonies de fourmis et les vols d'oiseaux, a contribué à l'ABM. (Badsì 2018).

II .2.5 Applications et domaines de recherche :

- Sciences sociales : Les MAS aident à étudier les phénomènes sociaux, tels que le comportement des foules, la dynamique des opinions et l'urbanisme.
- Écologie : L'ABM simule les écosystèmes, les interactions proies-prédateurs et l'évolution des espèces.
- Simulation du trafic : Modélisation du flux de circulation, de la congestion et des systèmes de transport.

- Épidémiologie : Compréhension de la propagation des maladies et des stratégies de vaccination.
- Robotique : Comportement coordonné dans les essaims de robots.
- Finance : Modélisation des marchés boursiers et des interactions financières

II .3. Définition d'un agent :

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."

- **La Simulation Multi-Agent (SMA)** désigne l'étude de systèmes composés de plusieurs agents interagissant entre eux, chacun ayant ses propres objectifs, comportements et capacités de prise de décision. (Ferber 1987)

- **L'objectif de la SMA** est de comprendre les comportements émergents qui résultent des interactions entre ces agents. Elle nous permet d'explorer des scénarios complexes et d'observer comment le système évolue au fil du temps.

- Concepts Clés:

- **Agents:** Ce sont les entités individuelles du système. Ils peuvent représenter des personnes, des animaux, des robots ou des agents logiciels.
- **Interactions :** Les agents interagissent entre eux par le biais de la communication, de la coopération, de la compétition ou des conflits.
- **Comportement Émergent :** Le comportement collectif des agents conduit souvent à des schémas émergents qui ne peuvent pas être prédits en analysant les agents individuels isolément.
- **Modèle de Simulation :** Un ensemble de règles définit comment le système évolue au fil du temps en fonction de l'état actuel des agents. Contrairement aux modèles analytiques, les modèles de simulation sont exécutés et les états du système sont observés à différents moments (Chaib-Draa et al. 2001).

II .4. Agent cognitif :

- Ces agents simulent les processus cognitifs humains tels que la perception, le raisonnement, l'apprentissage' et la prise de décision. Ils utilisent souvent des techniques d'apprentissage' automatique pour s'adapter et s'améliorer au fil 'u temps.

- Les agents cognitifs excellent dans des environnements complexes où ils peuvent combiner différentes capacités cognitives. Par exemple, les assistants virtuels comme Siri ou Alexa relèvent de cette catégorie. (Kpakpo&Itmi 2016).

- Le débat sur la question de savoir s'il faut former les systèmes intelligents à l'aide de l'apprentissage automatique ou de la programmation traditionnelle est toujours en cours. L'intégration d'autres capacités d'IA en plus de l'apprentissage automatique est en effet essentielle pour des performances robustes.

II .5. Agent réactif :

- Les agents réactifs fonctionnent uniquement sur la base de mécanismes stimulus réponse. Ils réagissent à leur environnement sans conserver d'état interne ni de planification à long terme.

- Ces agents conviennent bien aux tâches simples et aux interactions en temps réel. Par exemple, un thermostat ajustant la température d'une pièce en fonction des conditions actuelles est un agent réactif.

- Cependant, leur absence de mémoire interne limite leur capacité à gérer des scénarios complexes. (Drogoul& Ferber 1992).

Agents Cognitifs vs réactifs

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 — Les agents cognitifs vs réactifs (Wooldridge & Jennings 1995)

II .6. Agent BDI :

- Les agents BDI suivent une architecture délibérative. Ils conservent des états mentaux (Beliefs, Desires, Intentions) et raisonnent sur leurs objectifs et leurs actions.
- Le modèle BDI fournit un cadre pour construire des agents intelligents capables de planification, de raisonnement et d'adaptation aux circonstances changeantes. Ces agents peuvent gérer à la fois des objectifs à court terme et à long terme.
- Le système de raisonnement procédural (PRS) est une mise en œuvre précoce du modèle BDI, combinant planification réactive et raisonnement délibératif. (Chaib-Draa et al. 2001).

II .7. Agents Hybrides :

- Les agents hybrides visent à équilibrer les forces des approches réactives et délibératives.
- En combinant des réflexes réactifs avec un raisonnement de plus haut niveau, les agents hybrides peuvent gérer un large éventail de tâches. Par exemple, les voitures autonomes utilisent une approche hybride pour naviguer dans des scénarios de circulation complexes.
- Concevoir des architectures hybrides efficaces peut être complexe en raison de la nécessité d'intégrer différents composants de manière transparente.

En résumé, tandis que les agents cognitifs exploitent l'apprentissage automatique,

- les agents BDI se concentrent sur le raisonnement et les états mentaux. Les agents hybrides cherchent à trouver un équilibre entre réactivité et délibération. Chaque type présente des avantages et des compromis, en fonction du contexte d'application spécifique. (Chaib-Draa et al. 2001).

II .8. Les systèmes multi-agents :

Un système multi-agent (SMA) est un système informatisé composé de plusieurs agents intelligents interagissant entre eux. Ces agents peuvent être des programmes logiciels, des robots, des humains ou même des équipes humaines. Examinons quelques aspects clés des systèmes multi-agents (Wooldridge 2009) :

➤ **Concept :**

- Un SMA se compose d'agents et de leur environnement.
- Les agents sont des entités autonomes capables de percevoir leur environnement, de prendre des décisions et d'agir.
- L'environnement peut être virtuel (simulé), discret (avec des états distincts) ou continu (avec des états continus).
- Les agents peuvent être catégorisés en fonction de leur complexité (Gasser1991):

➤ **Agents passifs :**

Ces agents n'ont pas d'objectifs et peuvent représenter des obstacles ou des objets (comme une pomme ou une clé dans une simulation).

➤ **Agents actifs :**

Ces agents ont des objectifs simples, tels que le regroupement d'oiseaux ou l's modèles proie-prédateur (par exemple, les interactions entre loups et moutons).

➤ **Agents cognitifs :**

Ces agents effectuent des calculs complexes et prennent des décisions. - L'environnement peut également être classé en fonction de propriétés telles que l'accessibilité, le déterminisme, la dynamique, la discrétion, l'épisodicité' et la dimensionnalité.

➤ **Applications :**

- La recherche sur les SMA trouve des applications dans divers domaines :
- Trading en ligne : Les systèmes multi-agents peuvent optimiser les stratégies de trading.
- Gestion des catastrophes : Coordination des efforts de secours en utilisant plusieurs agents.
- Surveillance des cibles : Suivi et surveillance des cibles.
- Modélisation de la structure sociale : Compréhension du comportement collectif dans les sociétés.

➤ **Différence par rapport aux modèles basés sur les agents (ABM) :**

- Bien qu'il y ait des chevauchements, les SMA et les ABM ne sont pas identiques :
- Les ABM cherchent à fournir des informations explicatives sur le comportement collectif (souvent dans des systèmes naturels) en modélisant des agents obéissant à des règles simples.
- Les SMA se concentrent sur la résolution de problèmes pratiques ou d'ingénierie e' utilisant des agents intelligents interagissant entre eux." (Chaib-Draa et al. 2001).

II .9. Propriétés des systèmes multi-agents :

Les systèmes multi-agents (SMA) présentent des caractéristiques intéressantes en raison de leur nature distribuée. Voici quelques-unes de ces propriétés, telles que décrites par (Mili 2008) :

- **Efficacité des traitements :** Les agents travaillent en parallèle et communiquent de manière asynchrone. Cela permet d'accélérer les traitements et d'améliorer l'efficacité globale du système.
- **Robustesse et sûreté de fonctionnement :** Même si certains agents sont mis hors service, le comportement global du système reste relativement stable. Cette propriété garantit la résilience du système face à des défaillances ponctuelles.
- **Flexibilité et traitement à grande échelle :** On peut augmenter le nombre d'agents pour traiter des systèmes de plus en plus grands sans perturber le travail des agents existants. Cette flexibilité est essentielle pour gérer des environnements complexes.
- **Coût de fonctionnement faible :** La répartition des traitements entre de nombreuses unités simples (les agents) permet de réduire les coûts de fonctionnement. Cependant, il est important de noter que cette propriété peut également être une contrainte.
- **Coût de développement et réutilisation intéressant :** En théorie, il devrait être plus simple de développer des agents indépendamment les uns des autres et de les réutiliser dans différents scénarios applicatifs. Cependant, la différence fondamentale entre les agents et les objets réside dans leur autonomie et leur flexibilité comportementale.
- **Schémas d'interactions sophistiquées :** Les SMA incluent des interactions complexes telles que la coopération, la coordination et la négociation. Ces schémas permettent aux agents de collaborer de manière intelligente. (Thomas 2005).

- **Interaction centrale :** La présence de plusieurs agents autonomes dans un système crée une multiplicité de prises de décision. Le concept d'interaction centrale relie les comportements individuels des agents au comportement collectif du système.”

II .10. Interaction et coopération :

- Les agents dans un SMA interagissent les uns avec les autres pour atteindre des objectifs communs. Cette interaction peut prendre différentes formes, telles que la négociation, la coordination, la répartition des tâches, etc.
- La coopération entre agents est essentielle pour résoudre des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par un seul agent (Mili 2008).

II .11. Communication entre agents :

- Les agents communiquent entre eux pour échanger des informations, des connaissances et des intentions. La communication peut être directe (par exemple, messages) ou indirecte (par exemple, signaux dans l'environnement).
- Différents protocoles de communication peuvent être utilisés, tels que les langages de communication formels ou informels (Chaib-Draa et al. 2001).

II .12. Environnement :

- L'environnement est l'espace dans lequel les agents opèrent. Il peut être physique (par exemple, un monde virtuel, un réseau de capteurs) ou virtuel (par exemple, un espace de recherche d'informations).
- L'environnement influence les actions des agents et peut être partagé ou non entre les agents (Russell & Norvig 2002).

II. 13 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 soient 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 kinétique de programmes, la kinétique a pour ambition de prôner un nouveau mode de conception de systèmes informatiques, cherchant à dépasser les techniques informatique actuelle 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.

II .13. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le cadre qui a servi de base au développement de notre approche. Tout d'abord, nous avons introduit le concept d'agent. Ensuite, nous avons décrit les systèmes multi-agents ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, nous avons abordé différents modèles de simulation en mettant l'accent sur la simulation multi-agents.

La maintenance des éoliennes offshore est un système complexe impliquant de nombreux paramètres dynamiques. Les exigences de tels systèmes ont montré les limites des approches traditionnelles de modélisation et de simulation, qui reposent sur des structures centralisées et rigides et manquent de flexibilité. Pour résoudre ce problème, nous proposons dans notre travail d'adopter une approche basée sur des systèmes multi-agents

Chapitre 3

ARCHITECTURE MULTI-AGENTS D'UN PARC EOLIEN

3.1. Introduction

La maintenance des parcs éoliens 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.

Chapitre 3 Modélisation et simulation à base d'agents pour la gestion de la maintenance des éoliennes

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

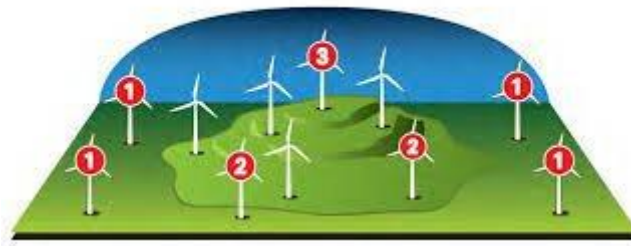


Figure 3.1 – Regroupement des tâches de maintenances

3.2. 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:

- Eolienne (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, ...)
- Météo (un seul agent) Les sections suivantes expliquent le comportement, la composition et les interactions de ces agents.

3.3. L'AGENT ÉOLIEN

Chaque éolienne est représentée par un agent autonome communicant. On considère quelques caractéristiques techniques liées à la production de l'énergie électrique en fonction de la vitesse du vent V_s , notamment:

- V_{cin} la vitesse de coupure d'entrée représentant la vitesse minimale permettant la production d'énergie.
- V_{cout} la vitesse de coupure de sortie c'est à dire, la vitesse maximale de fonctionnement. L'éolienne est arrêtée si la vitesse de vent y est supérieure.
- V_r la vitesse minimale à laquelle l'éolienne produit le maximum d'énergie.

La puissance générée par l'éolienne suit la courbe de puissance représentée sur la Figure 2.

Conformément aux travaux de [22] la puissance générée par une éolienne exposée à une vitesse de vent V_s est calculée par la relation mathématique suivante :

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

Tel que P_r est la puissance nominale de l'éolienne.

Les paramètres a,b et c de l'équation (1) sont obtenus par les équations suivantes:

$$a = \frac{1}{(V_{ctn} - V_r)^2} \left[V_{ctn}(V_{ctn} + V_r) - 4V_{ctn}V_r \left(\frac{V_{ctn} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right]$$

$$b = \frac{1}{(V_{ctn} - V_r)^2} \left[4(V_{ctn} + V_r) \left(\frac{V_{ctn} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ctn} + V_r) \right]$$

$$c = \frac{1}{(V_{ctn} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ctn} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right]$$

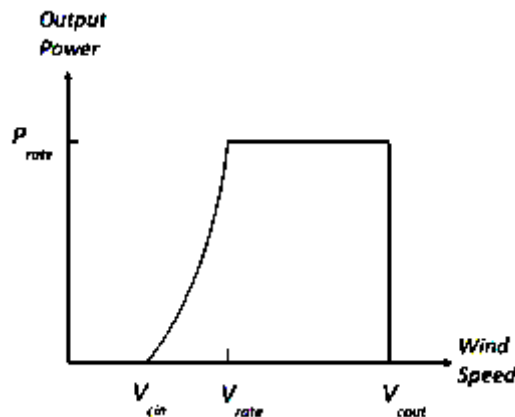


Figure 3.2 : la courbe de puissance d'une éolienne

La vitesse du vent est mesurée dans des stations météorologiques souvent situées au niveau de la mer ou au niveau terrestre. Cette vitesse n'est pas la même au niveau de la nacelle de l'éolienne, et elle dépend principalement de sa hauteur, la hauteur de la station météorologique et la rugosité de l'environnement . La vitesse du vent au niveau de l'éolienne est donnée par la relation suivante .

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

où:

h : La hauteur de la nacelle.

h_0 : La hauteur du point de mesure du vent.

V_s : La vitesse du vent au niveau de la nacelle.

V_0 : La vitesse du vent mesurée dans la station à la hauteur h_0

α : Le coefficient du gradient vertical de la vitesse du vent.

Nous avons proposé quelques indicateurs de performance de l'éolienne afin de pouvoir mesurer le risque de tomber en panne, le degré de défaillance de chaque composant, ainsi qu'un indicateur sur l'état de santé de toute l'éolienne. La Tableau décrit les indicateurs que nous avons définis avec leurs significations.

indicateur	Description
EHF (Equipment Health Factor)	C'est un indicateur de santé globale de l'éolienne, il varie dans le temps, lors d'un incident ou d'une tâche de maintenance. Il varie entre 0 (très mauvais état) et 10 (très bon état)
MAR (Material At Risk)	C'est la quantité d'énergie produite depuis la dernière inspection ou maintenance.
IsD (Inspection Delay)	Le temps passé depuis la dernière validation de l'éolienne par une maintenance ou une inspection.

Tableau 1: Indicateurs de performance d'une éolienne

L'éolienne possède plusieurs modes de fonctionnement qui impactent la qualité et la quantité de puissance produite. Nous avons identifié quatre modes de fonctionnement :

1. Fonctionnement normal: L'éolienne est en bonne santé avec un $EHF \in [8; 10]$ avec une probabilité de tomber en panne de 5%.
2. Fonctionnement dégradé: L'éolienne produit à 80% de sa puissance maximale. Cette situation coïncide avec un $EHF \in [4; 8[$. La probabilité de tomber en panne dans ce mode est de 20%.
3. Fonctionnement critique: L'éolienne produit 30% de sa puissance maximale. Cette situation

coïncide avec un $EHF \in [1; 4[$ et une probabilité de tomber en panne de 70%.

4. En panne: Dans cet état l'éolienne est à l'arrêt, elle attend une maintenance curative et son $EHF \in [0; 1[$.

Pour définir le comportement de l'éolienne et ces interactions avec son environnement, nous avons défini deux fonctions:

1. Produce : Elle définit la puissance électrique produite.

2. Dégrade : Elle met à jour les indicateurs de performance de l'éolienne.

Les autres agents peuvent impacter des paramètres de performances des éoliennes tels que, l'agent météo ou l'agent maintenance, d'autres peuvent juste les consulter tel que l'agent monitoring.

3.4. 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 ferme. 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 qui nécessite du matériel (hélicoptère,). Par conséquent, 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

3.5. 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 camion et les hélicoptères . Nous supposons que les agents "camion" ont des caractéristiques différentes en termes de capacité, de vitesse et de fiabilité, tend que les agent hélicoptères ont des caractéristiques similaires. L'agent ressource est composé d'un ensemble de deux techniciens, un ingénieur, un camion contenant les pièces de rechange nécessaires et une hélicoptère .

3.6. Agent "Météo"

Les variations des conditions météorologiques sont représentées par l'agent «météo». Il est caractérisé par la vitesse du vent , 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

3.7. 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.

3.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre modèle multi-agents pour la gestion de la maintenance d'éoliennes. Comme nous l'avons constaté dans les chapitres précédents, La gestion de la maintenance des parcs éoliens 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.

Chapitre 4

SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN PARC EOLIEN

4.1 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 utilisé ainsi que les résultats obtenus à la suite de plusieurs simulations de cycle de vie moyen d'un parc éolien terrestre.

4.2 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 plateformes, AnyLogic tire son épingle du jeu grâce à sa flexibilité et à la diversité de ses méthodologies. Un autre avantage est que beaucoup des plateformes actuelles ont repris des concepts de AnyLogic. Ainsi, AnyLogic offre une bonne base pour passer à une autre plateforme

telle que GAMA ou Repast (Becu et al. 2015). La plateforme AnyLogic est un environnement puissant et polyvalent pour la simulation multi-agents qui permet d'intégrer la simulation basée sur les agents avec la dynamique des systèmes et la simulation par événements discrets. AnyLogic est un logiciel commercial largement utilisé dans divers domaines tels que le transport, la logistique, les soins de santé, la gestion des opérations, l'énergie, et plus encore. Il permet aux utilisateurs de construire des modèles complexes en utilisant une interface graphique dédiée et des outils de programmation flexibles basés sur le langage Java. De plus, AnyLogic permet de simuler des systèmes multi-agents de manière flexible et adaptable. AnyLogic possède une interface graphique avancée qui permet aux utilisateurs de concevoir leurs modèles de manière interactive, ainsi que des outils d'analyse avancés pour collecter et analyser les données issues des simulations. La plateforme inclut également des fonctionnalités avancées telles que l'intégration avec des bases de données et des systèmes de contrôle et de supervision (SCADA) et des systèmes de surveillance de l'état (CMS). Les dernières versions de AnyLogic offrent, en plus des abstractions standard comme les agents et les événements, des outils de modélisation qui permettent une planification et une optimisation avancées. 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. AnyLogic a été conçu pour fournir un laboratoire complet pour la modélisation et la simulation de systèmes complexes. En outre, il peut être utilisé pour développer des applications bien plus sophistiquées. Ainsi, le premier objectif de AnyLogic est clairement la flexibilité et la puissance de modélisation. 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.

4.3 Simulation-optimisation

Les agents sont les principaux éléments constitutifs de ce modèle AnyLogic. L'agent est une unité de conception de modèle qui peut avoir un comportement, une mémoire (historique), un calendrier, des contacts, etc. Vous pouvez définir autant de types d'agents que nécessaire dans votre modèle.

L'état et le comportement internes de l'agent peuvent être mis en œuvre de différentes manières. L'état de l'agent peut être représenté par un certain nombre de variables, par l'état du diagramme d'état, etc. Le comportement peut être pour ainsi dire passif (par exemple, il existe des agents qui réagissent uniquement aux arrivées de messages ou aux appels de fonctions et qui n'ont pas leur propre timing), ou actif, lorsque la dynamique interne (délais ou processus de dynamique du

système) de l'agent l'incite à agir. Dans ce dernier cas, les agents auront très probablement des objets événements et/ou diagramme d'état à l'intérieur.

Dans notre modèle, nous définirons le comportement des agents à l'aide de paramètres, de variables, de collections, de fonctions, d'événements, de listes d'options et de diagrammes d'état.

Au centre de l'espace de travail, vous verrez l'éditeur graphique. Il montre le diagramme du type d'agent principal. Le cadre bleu sur le diagramme est le cadre du modèle qui définit la taille de la fenêtre du modèle et la partie du diagramme graphique qui est affichée dans la fenêtre lors de l'exécution du modèle.

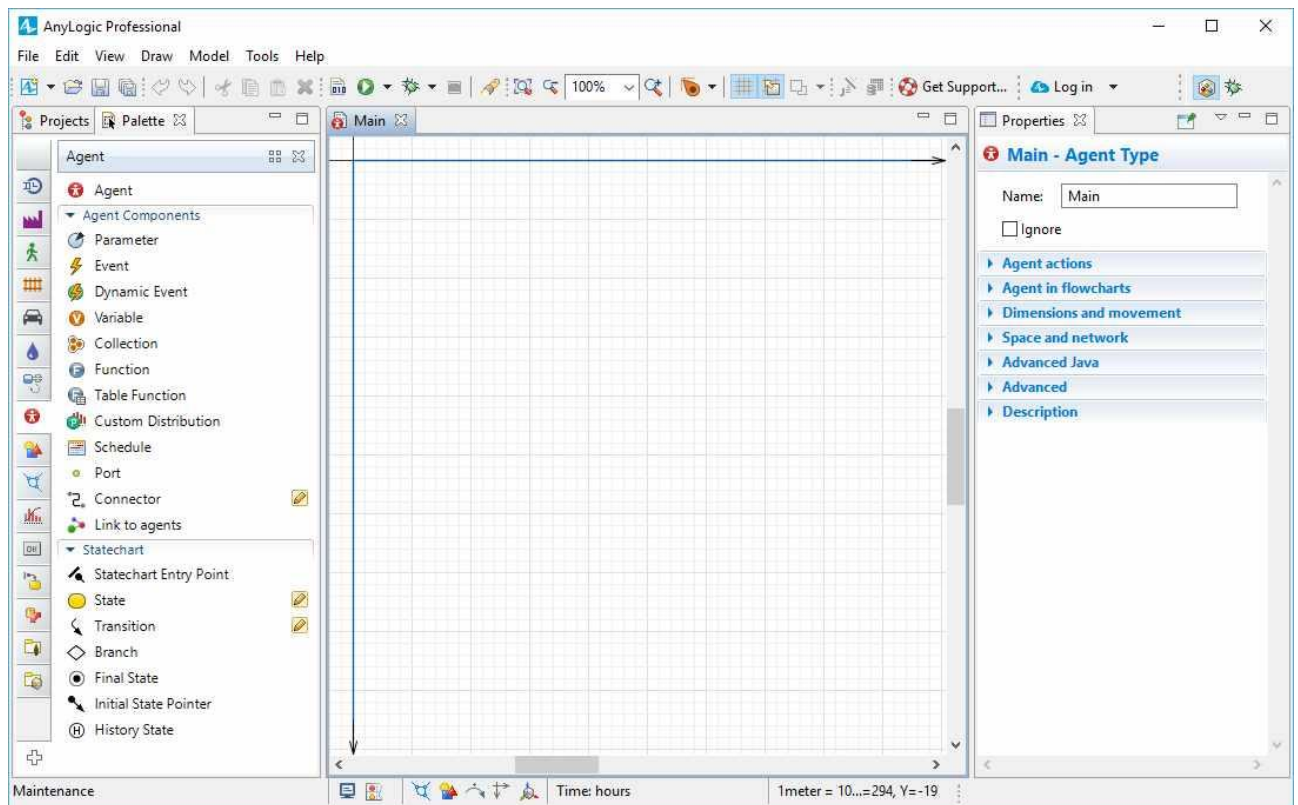


Figure 4.1 : Espace de travail dans AnyLogic.

A gauche de l'éditeur graphique, vous pouvez voir la vue Projets et la vue Palette qui partagent la même zone. La vue Projets donne accès aux modèles AnyLogic actuellement ouverts dans l'espace de travail. L'arbre de l'espace de travail permet de naviguer facilement dans les modèles. La vue Palette contient tous les éléments graphiques que vous pouvez ajouter à l'éditeur graphique de votre agent par simple glisser-déposer. Les éléments du modèle sont regroupés par catégories dans un certain nombre de pochoirs (palettes).

Sur le côté droit de l'espace de travail, vous pouvez voir la vue Propriétés. La vue Propriétés permet de visualiser et de modifier les propriétés d'un ou de plusieurs éléments de modèle actuellement sélectionnés. Lorsque vous sélectionnez un élément - par exemple, dans la vue Projets ou dans l'éditeur graphique - la vue Propriétés affiche les propriétés de la sélection.

4.4 Création d'agents

Nous devons d'abord créer un agent unique - le centre de maintenance, puis une population vide pour le transport de la maintenance, trois populations pour les éoliennes, les camions et les hélicoptères, et un type d'agent pour représenter les demandes de service. Ensuite, nous pourrions définir les processus à l'intérieur des types d'agents - sur leurs diagrammes.

4.4.1 Ajouter un centre de maintenance

- Nous n'avons besoin que d'un seul centre de maintenance qui enverra des transports vers les turbines pour l'entretien programmé et les pannes/réparations éventuelles.
- Nous voulons que tous nos agents vivent dans un espace continu, 1000x600, dans un réseau aléatoire avec une disposition aléatoire.

4.4.2 Ajouter les éoliennes

- créer 25 éoliennes

4.4.3 Ajouter le transport

Il s'agit d'une population vide qui n'a pas besoin d'être animée. Nous utiliserons ce type d'agent pour définir la logique de notre modèle.

4.4.4 Ajouter des camions et des hélicoptères.

➤ Camions

- Il y en a 5 dans cette population

- la vitesse moyenne d'un camion est de 70 kilomètres par heure.
- **Hélicoptère**
- utiliser 2 hélicoptères pour la maintenance des turbines.
- Les hélicoptères se déplacent à une vitesse de 200 kilomètres par heure.

4.5 Algorithme

4.5.1 Placez le transport au centre d'entretien

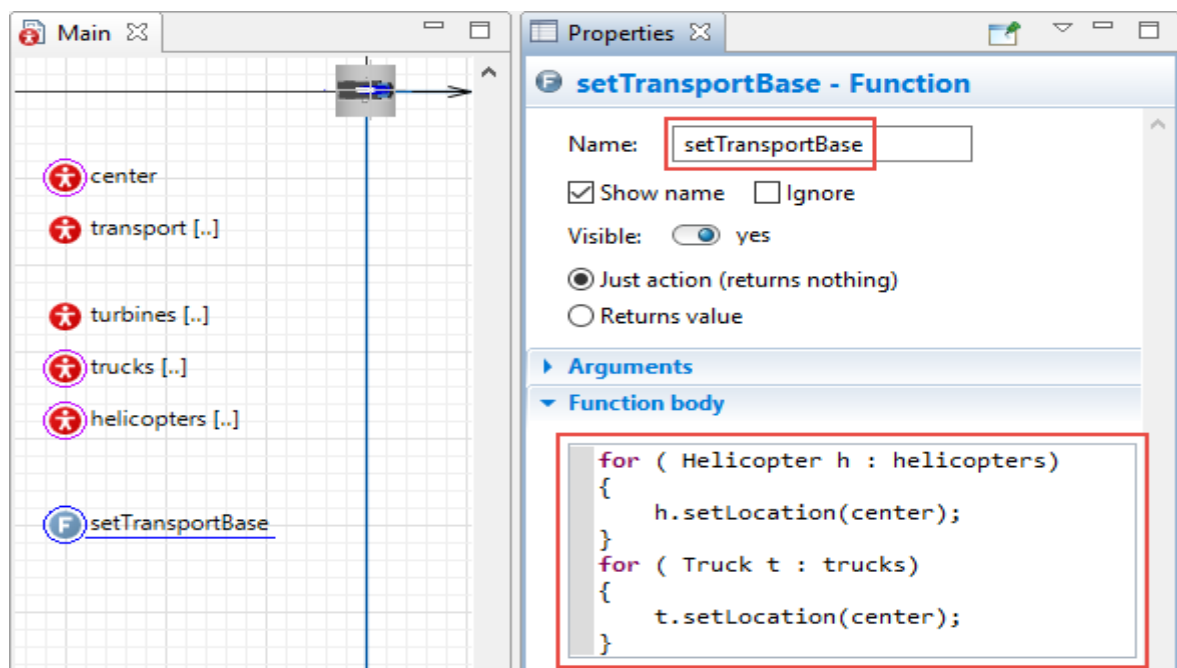


Figure 4.2 : Ajout d'algorithme des moyens de transport à l'entretien.

La fonction qui place le transport au centre de maintenance.

L'algorithme de la fonction contient deux pour les boucles.

La première boucle itère à travers tous les agents vivant dans la population d'hélicoptères. La syntaxe de la ligne d'initialisation pour la boucle est la suivante : à l'intérieur des parenthèses, vous spécifiez d'abord le nom du type d'agents vivant dans la population (Hélicoptère). h est le nom de la variable locale que nous définissons ici, il peut être n'importe quel autre nom valide (hélicoptère, a, élément, et ainsi de suite, hélicoptères est le nom de la population d'agents que nous allons répéter.

Puisque nous pouvons exécuter non seulement une, mais plusieurs actions pour chaque agent de

la population, nous devrions dire au compilateur Java quelles déclarations Java particulières doivent être exécutées pour chaque itération de boucle. Pour ce faire, nous mettons les actions nécessaires à l'intérieur des poignées courbes. Dans notre cas, c'est juste une ligne de code : { h.setLocation(center) }

Ce code définit l'emplacement de l'agent actuellement itéré de la population (to access it we use the local variable h we have just defined). L'emplacement est passé comme argument de la fonction (it is our center agent).

La seconde pour la boucle fait de même pour la population de camions.

4.5.2 Définir la logique de la gestion des transports

Cette fonction recherche un transport inutile. Si le transport est trouvé, la fonction doit le retourner.

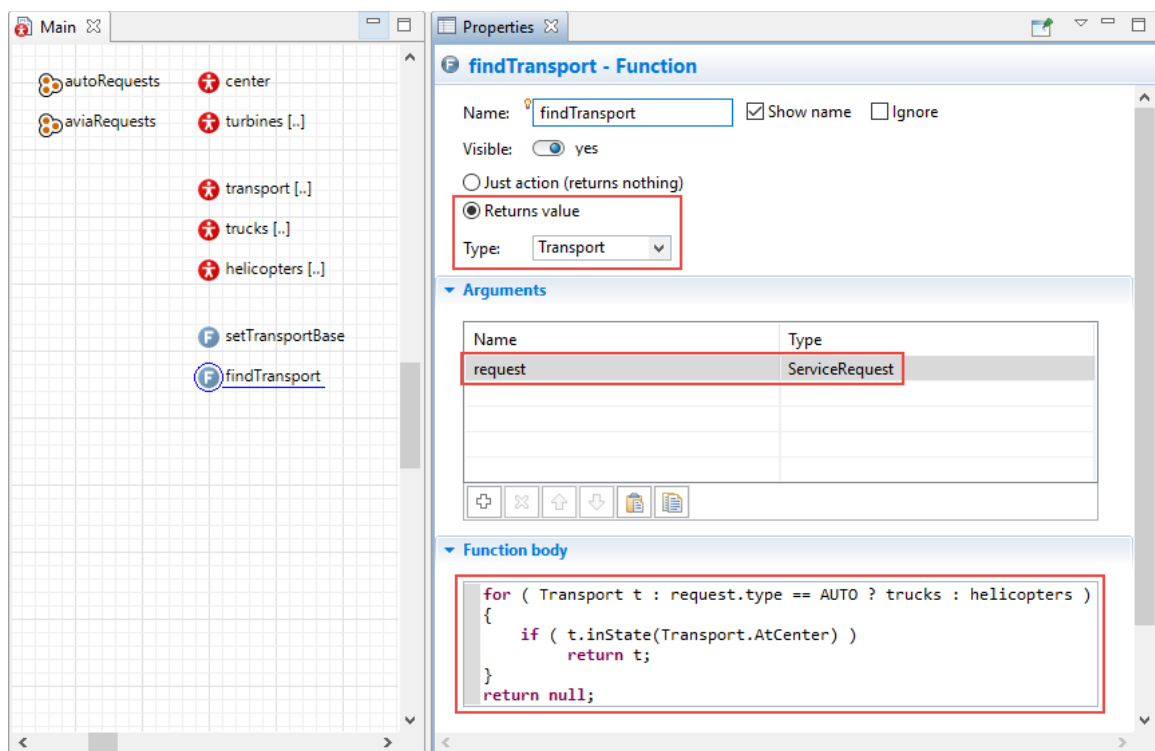


Figure 4.3 : Définition de la logique de la gestion des transports

Dans le corps de la fonction, nous définissons le pour boucle. Cette boucle n'itère pas toujours à travers une population d'agents mais analyse le type de la demande de service et itère à travers la population de camions si c'est la demande pour le transport automatique (en vérifiant la demande d'état.type == AUTO). Si la condition est fausse, cela signifie qu'un hélicoptère est nécessaire, de sorte que la boucle itère à travers une autre population : des hélicoptères.

À l'intérieur de la boucle, nous vérifions si l'agent actuellement itéré est inactivé ou non en utilisant la fonction de l'agent `inState()`. Si le contrôle de la carte d'état de l'agent se trouve actuellement dans l'État `AtCenter`, cela signifie que nous avons trouvé le transport inutile. Dans ce cas, la ligne retourne `t`; met fin à l'exécution de la fonction et renvoie la valeur trouvée (`idle vehicle`). S'il n'y a pas de transport inutile du tout, cette ligne ne sera pas exécutée, donc après le `pour` la boucle la prochaine ligne de code sera exécuté : retourner `null`; De cette façon, nous disons au modèle que le camion n'a pas été trouvé (`the result is null, the idle transport does not exist`).

4.6 Fonction

4.6.1 Logique des turbines

Dans cette phase, nous définirons le comportement des turbines avec un étatchart : quand et comment elles sortent de service ou obtiennent une maintenance prévue. Nous mettrons également en place l'animation des turbines : nous voulons que les lames cessent de tourner quand une turbine est hors service ; en outre, chaque figure d'animation a des indicateurs de couleur de son état.

4.6.1.1 Définir les intervalles de temps sur le type d'agent de turbine

- Le paramètre appelé `service Time out` est de type Temps et sa valeur par défaut est de 2 semaines (select weeks in the Units property).
- Le deuxième paramètre, `MTTF` (temps moyen jusqu'à l'échec), est également de type Temps et sa valeur par défaut est de 50 jours.

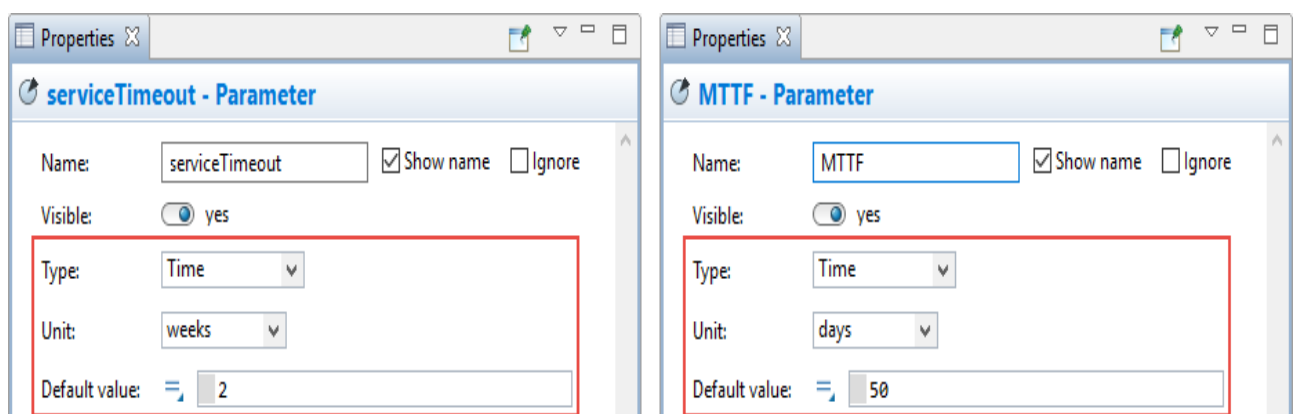


Figure 4.4 : Définition des intervalles de temps.

4.6.1.2 La fonction de gestion des demandes de transport :

Type de transport. Dans le corps de la fonction, nous appelons la fonction findTransport que nous avons créée sur Main. Lorsqu'une turbine envoie une demande de service, le centre de maintenance doit envoyer un transport d'un type spécifié, AUTO ou AVIA.

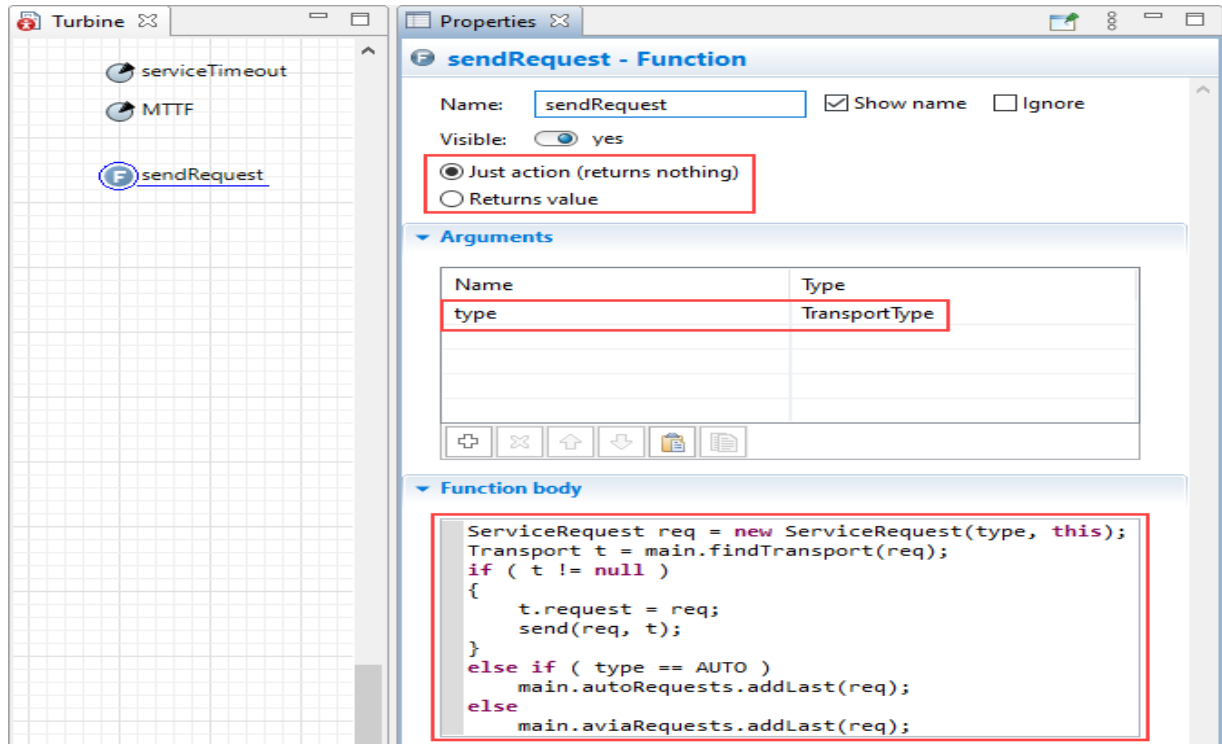


Figure 4.5 : Gestion des demandes de transport

4.6.1.3 Définir le comportement des turbines avec la carte d'état :

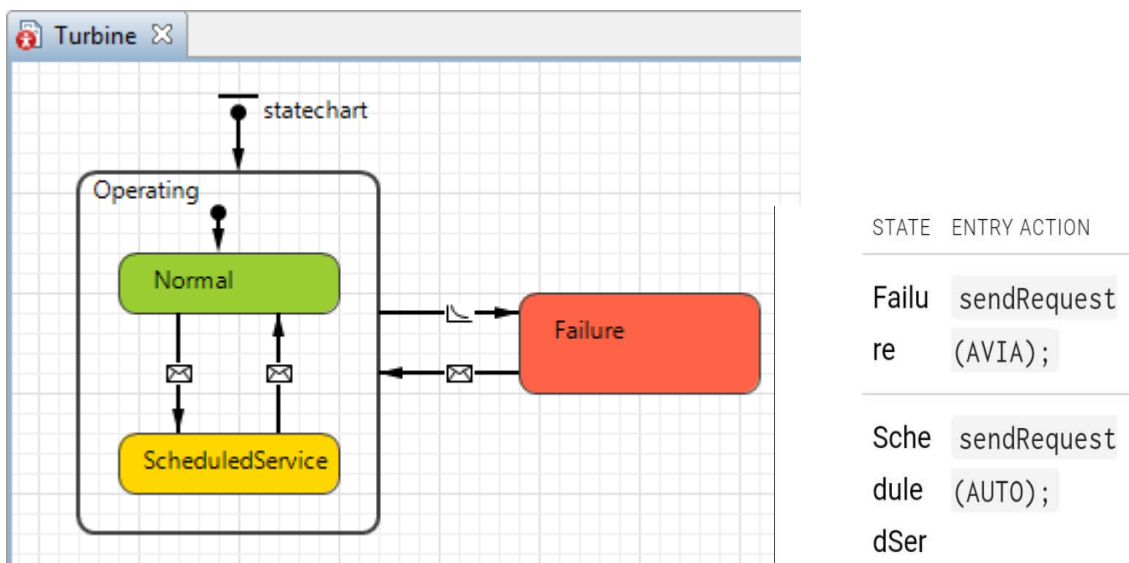


Figure 4.6 : Définition du comportement des turbines.

Chaque état de turbine a sa propre action d'entrée. Lorsqu'une turbine a besoin de réparation, elle est dans l'état d'échec en envoyant une demande de maintenance pour le transport AVIA (a hélicoptère). Lorsqu'il est temps pour le service prévu, une turbine envoie une demande pour le type de transport AUTO — un camion.

La transition de l'état d'exploitation à l'échec est déclenchée par un taux égal à $1/MTTF$ par jour — une fois dans le temps moyen jusqu'à la période d'échec. La transition qui remonte de l'État d'échec à l'état d'exploitation est déclenchée par un message particulier — « réparé ».

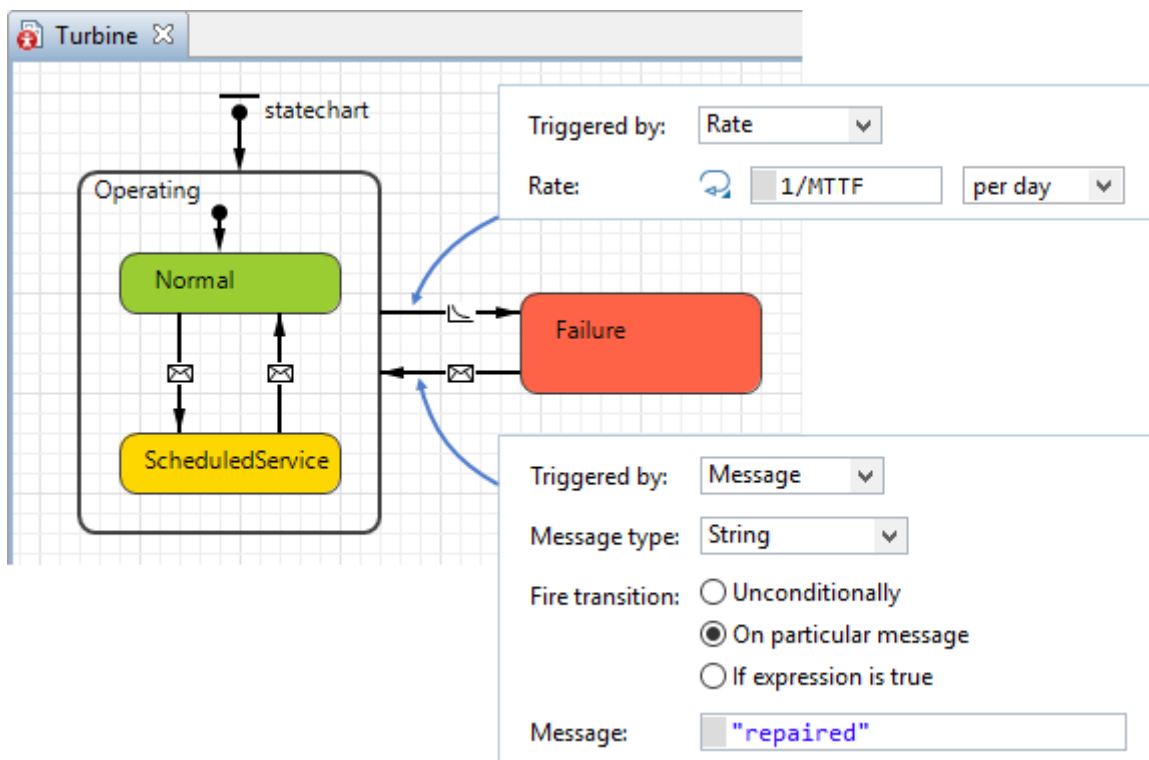


Figure 4.7 : Déclenchement d'un message « besoin d'un service planifié ».

Lorsqu'une turbine d'exploitation reçoit un message "scheduled", cela signifie qu'elle a besoin d'un service planifié et que l'état correspondant est déclenché. Étant dans l'état ScheduledService, une fois qu'une turbine reçoit un message "réparé", le service est terminé, et elle peut revenir à son état d'exploitation.

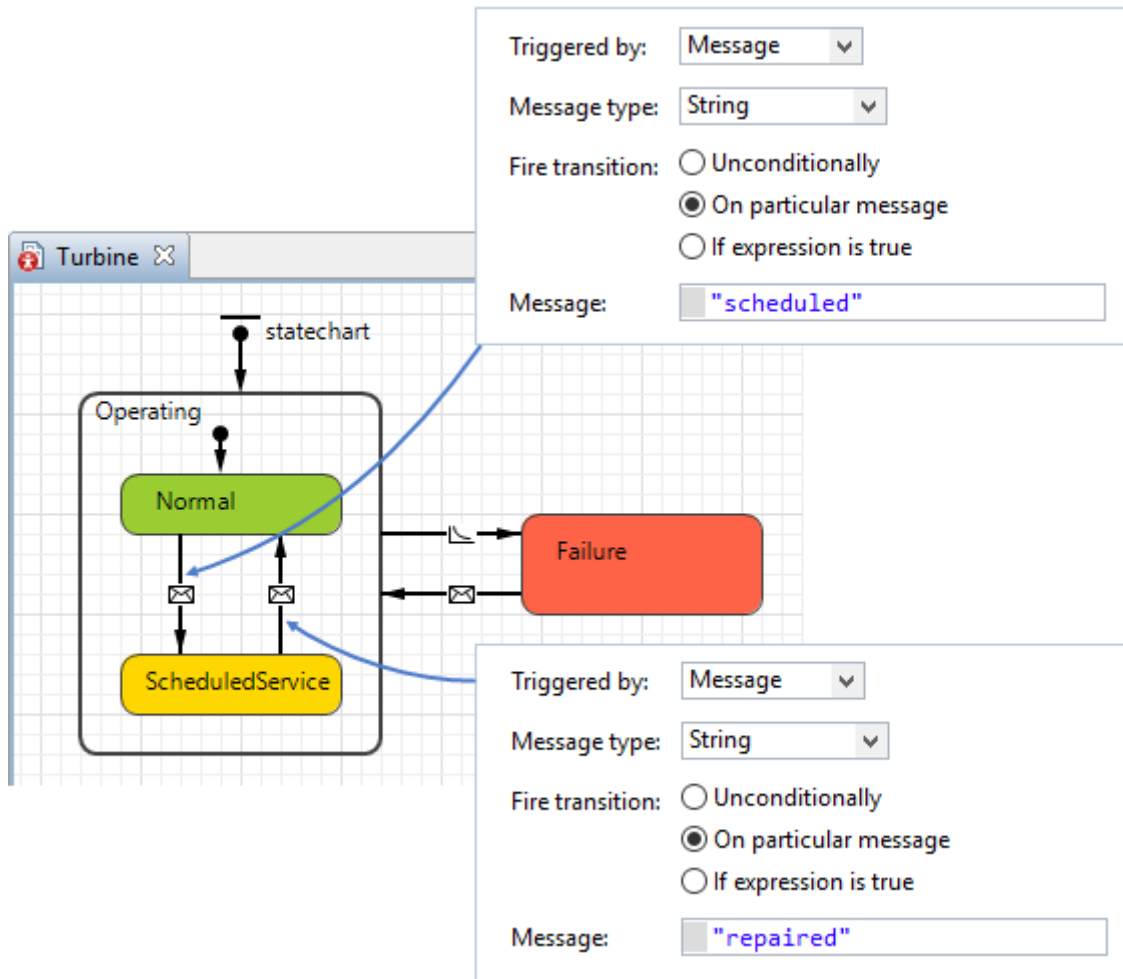


Figure 4.7 : Déclenchement d'un message « réparé ».

4.6.1.4 Modifier l'animation des pales de turbine

Nous devons changer les propriétés des pales de turbine. La figure de rotation de la turbine éolienne est en fait un groupe composé de 2 figures 3D : la tour de turbines et les pales. Nous devons ouvrir les propriétés des pales.

Vous pouvez sélectionner les lames avec un clic de la souris dans l'éditeur graphique, ou ouvrir la vue Projets et continuer à élargir les niveaux de l'arbre du modèle jusqu'à ce que vous arriviez au groupe wind_blades.

Ouvrir la section Position et taille et type `inState(Opérant)?temps():0` dans la propriété Rotation Y, rad. Maintenant, les pales seront en rotation lorsque la turbine est en fonctionnement, et quand il est hors service et a besoin de réparation la pale restera immobile.

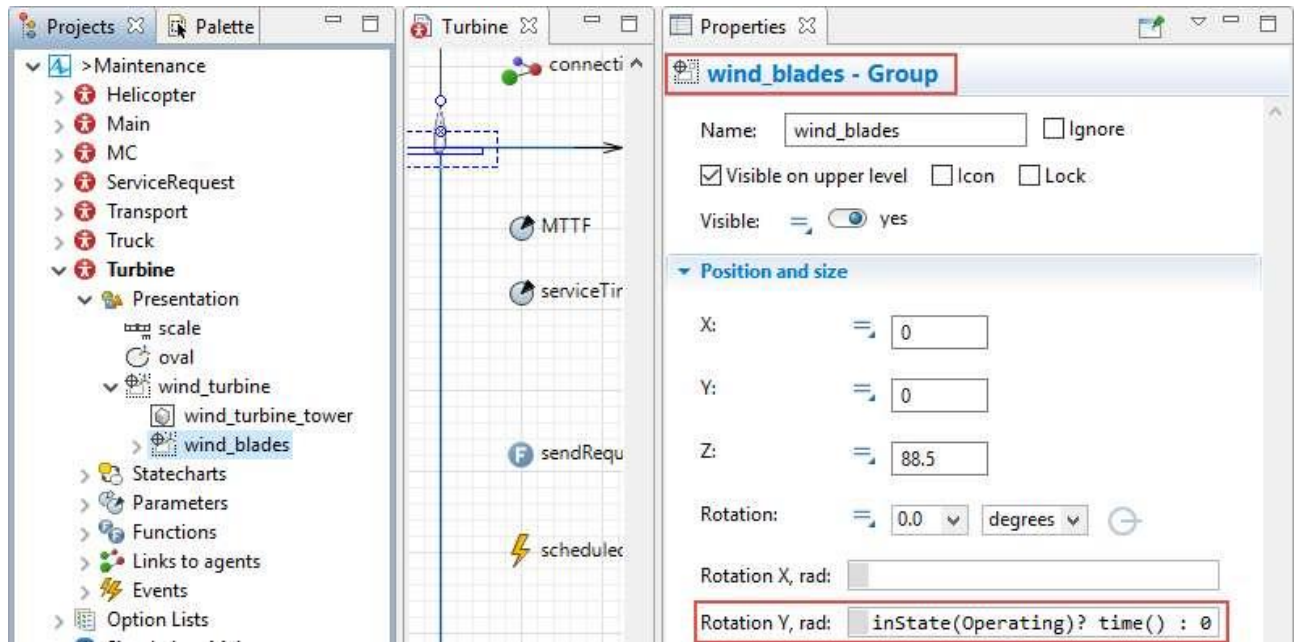


Figure 4.8 : Modification de l'animation des pales.

4.6.1.5 Créer l'indicateur de l'état de la turbine

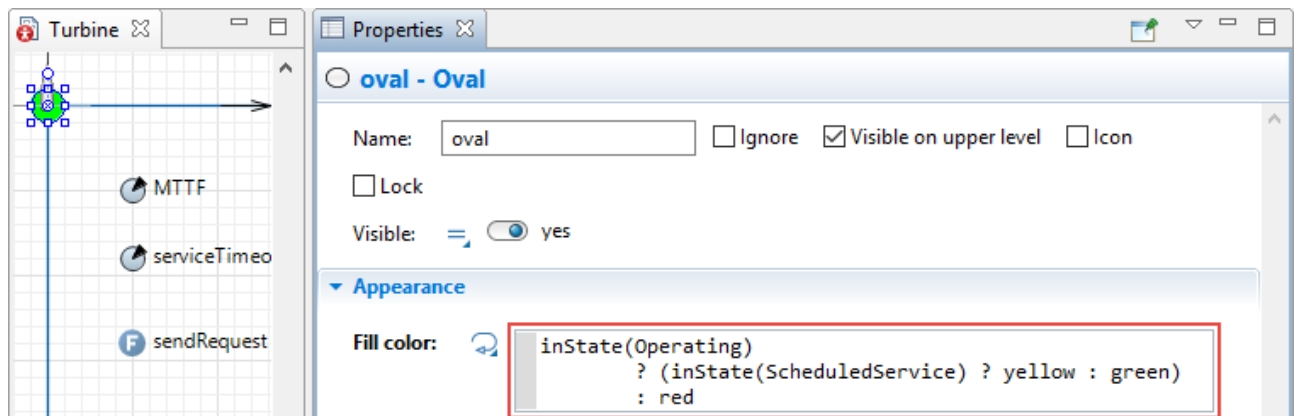


Figure 4.9 : Création de l'indicateur de l'état de la turbine.

Si une turbine est en attente de service la forme affiche la couleur jaune, sinon le cercle est vert qui est l'indicateur d'une turbine de travail, et si elle est hors de service l'Indicateur affiche le rouge.

4.7 Interprétation des résultats :

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'un parc d'éoliennes contrôlées par un logiciel Anylogic. Les résultats affichent les différentes courbes obtenues à partir de la simulation. Ci-dessous, nous présenterons les résultats de la simulation.

Anylogic est un logiciel de simulation multi-méthodes utilisé pour concevoir, analyser et visualiser des modèles complexes dans des domaines tels que le business.

Pour simuler un groupe d'éoliennes, il est permis d'utiliser les modèles montrés sur la figure 4.10.

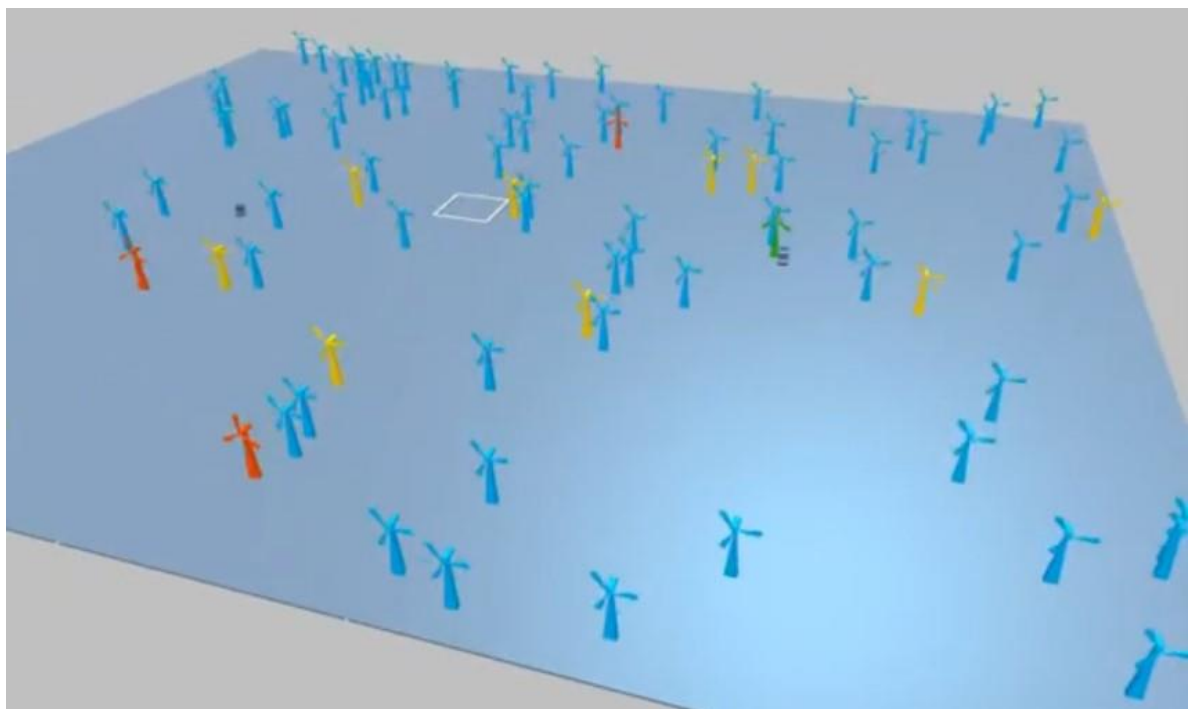


Figure 4.10 : Regroupement des taches de maintenances

Dans la simulation, nous avons abordé deux situations possibles qui pourraient être rencontrées lors des travaux :

- Dans le premier cas, le nombre de services est de 3
- Dans le deuxième cas, le nombre d'employés de service est de 1

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation (moyenne annuelle) liés à la disponibilité des équipements, à l'utilisation du personnel de maintenance, aux revenus, aux dépenses et à leurs sorties respectives :



Figure 4.11 : Disponibilité des équipements (nombre d'équipe de service :3)

- **Disponibilité des équipements (moyenne annuelle)**

- ✓ les composants :

- (Working) : Représente le pourcentage d'équipement fonctionnant efficacement.
- (On maintenance) : représente le pourcentage d'équipement en cours de maintenance.
- (On service) : représente le pourcentage d'équipements en service.
- (Faled) : représente le pourcentage d'équipements en panne.

- ✓ Analyse:

On constate que l'essentiel des équipements est en état de fonctionnement (vert) jusqu'en 2040 environ et reste relativement constant.

Le pourcentage d'équipements en panne et d'équipements en maintenance et en service reste relativement constant au fil des années.

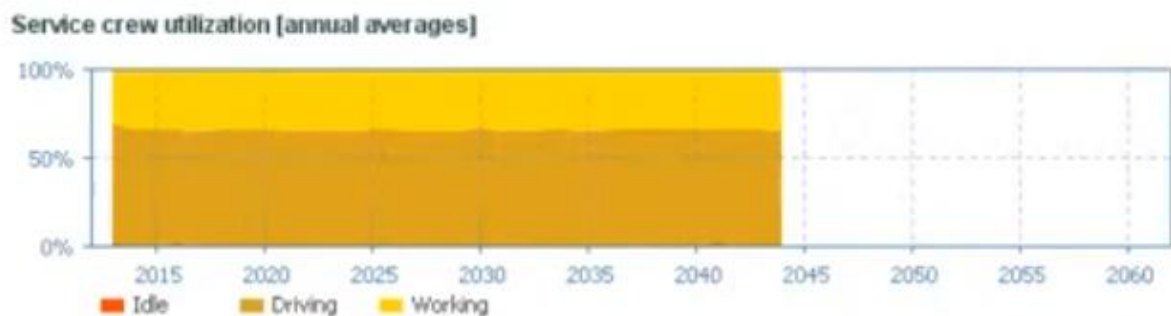


Figure 4.12 : Utilisation de l'équipe de service (nombre d'équipe de service :3)

- **Utilisation des équipes de service (moyenne annuelle)**

- ✓ les composants :

- (Idle) : représente le moment où les équipes de service ne sont pas utilisées.

- (Driving) : représente l'heure à laquelle les équipes de service sont en déplacement.
- (Working) : représente l'heure à laquelle les équipes de service travaillent réellement.
- ✓ Analyse:

Le pourcentage de temps pendant lequel les équipes de service sont inutilisées (inactives) commence à augmenter progressivement au fil des années.

Cela peut indiquer une amélioration de l'efficacité de l'équipement, réduisant ainsi le besoin d'intervention des équipes de service, ou cela peut indiquer une réduction du travail sur le terrain requis par les équipes.

La proportion de temps passé par les équipes à travailler et à se déplacer reste relativement constante dans le temps.

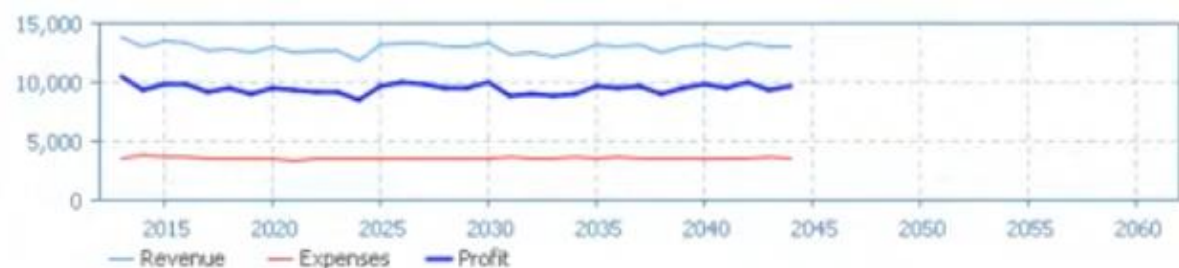


Figure 4.13 : Revenus et dépenses (nombre d'équipe de service :3)

• Revenus et dépenses

- ✓ Les composants :
 - (Revenue) : représente les revenus annuels.
 - (Expenses) : Représente les dépenses annuelles.
 - (Profit) : Représente les bénéfices annuels (revenus moins dépenses).
- ✓ Analyse:

Les revenus et dépenses affichent une tendance relativement constante avec des fluctuations mineures au fil des ans.

Les bénéfices restent relativement constants, ce qui indique la stabilité des performances financières à long terme de l'entreprise

• Conclusion

La performance globale des équipes d'équipement et de service apparaît assez stable dans le temps.

Le recours à des équipes de service montre une augmentation du temps non utilisé, ce qui peut

indiquer une amélioration de l'efficacité ou une réduction du besoin d'interventions.

Les revenus, dépenses et bénéfices restent relativement constants, reflétant la stabilité financière.

Il est important de surveiller tout changement futur dans ces tendances et de prendre des mesures proactives pour maintenir la stabilité et améliorer les performances.



Figure 4.14 : Disponibilité des équipements(nombre d'équipe de service :1)

- **Disponibilité des équipements (moyennes annuelles)**

- ✓ **Analyse:**

- **Équipement de travail (Working):**

: De 21h00 à 22h15, la proportion d'équipements opérationnels était relativement élevée et stable. Mais après 22h15, on constate une diminution significative du pourcentage d'équipements opérationnels. Cette diminution coïncide avec une augmentation du pourcentage d'équipements défectueux.

- **Équipement défectueux (Failed) :**

: Il commence à augmenter significativement après 22h15, indiquant que l'état du matériel s'est détérioré avec le temps, des équipes de maintenance insuffisantes, ou encore que le matériel est vieux et doit être remplacé.

- **Équipement pour l'entretien (On maintenance) :**

Le ratio est resté relativement constant au cours de la période. Cela indique que les opérations de maintenance peuvent être programmées régulièrement, mais peuvent ne pas être suffisantes pour éviter une panne.

- **Matériel en service (On service) :**

Elle reste à peu près constante au fil du temps, mais on constate une légère baisse de la proportion d'équipements en service après 22h15.

- **Conclusion:**

L'entreprise doit revoir sa stratégie de maintenance et de remplacement. L'augmentation significative du nombre d'équipements défectueux après 22h15 indique que l'équipement a peut-être dépassé sa durée de vie utile et doit être remplacé plus fréquemment.

Investir dans de nouveaux équipements ou améliorer les procédures de maintenance peut contribuer à réduire le taux de panne et à augmenter le pourcentage d'équipements opérationnels.

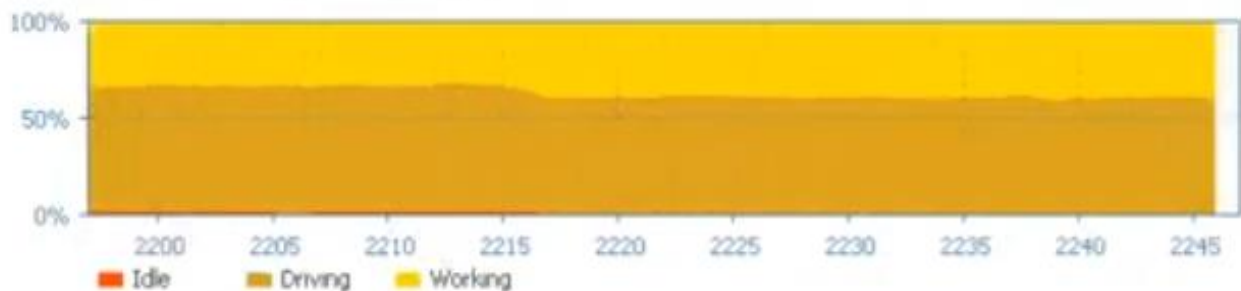


Figure 4.15 : Utilisation de l'équipe de service (nombre d'équipe de service :1)

- **Utilisation de l'équipage (moyennes annuelles)**

- ✓ **Analyse:**

- **en activité (Working):**

Il reste en état de fonctionnement continu tout au long de la période, ce qui indique une utilisation efficace des ressources humaines.

- **Périodes d'inactivité (Idle):**

On constate une légère augmentation des périodes d'inactivité ces dernières années. Cette augmentation peut être due à l'augmentation du temps d'attente des équipages pour les équipements nécessitant un entretien ou une réparation.

- **Périodes de conduite (Driving) :**

Un ratio moyen et stable, qui indique une stabilité dans les transferts d'équipements entre les chantiers et les chantiers de maintenance.

- **Conclusion:**

- Le recours au personnel de service semble efficace, mais il reste des possibilités d'amélioration dans la gestion des périodes d'inactivité.

L'entreprise devra peut-être améliorer la planification du travail et répartir le personnel plus

efficacement afin de réduire les périodes d'inactivité.



Figure 4.16 : Revenus et dépenses (nombre d'équipe de service :1)

- **Revenus et dépenses**

- ✓ **Analyse:**

- **Revenus :**

Elle est restée relativement constante jusqu'en 22h15, puis on assiste à une baisse significative. Cette diminution peut être due à une augmentation des pannes d'équipement et à une diminution de la productivité.

- **Dépenses :**

Il est resté relativement constant, mais a légèrement diminué en 22h15.

- **Bénéfices:**

Il diminue considérablement après 2215 en raison de la baisse des revenus. La différence entre les revenus et les dépenses devient négligeable, ce qui affecte considérablement la rentabilité.

- **Conclusion:**

L'entreprise a besoin d'une stratégie pour améliorer ses revenus et réduire ses dépenses. L'amélioration de l'efficacité des équipements et le remplacement des équipements obsolètes peuvent faire partie de cette stratégie. De plus, l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et la réduction des coûts inutiles peuvent être envisagées.

- **Recommandations générales :**

- Améliorer les stratégies de maintenance et de remplacement pour réduire les pannes et augmenter la disponibilité des équipements.
- Augmenter le nombre d'équipes de service si le coût est justifié en améliorant l'efficacité et en réduisant les périodes d'inactivité.
- Revoir la planification et la gestion pour réduire les périodes d'inactivité et accroître

l'utilisation efficace des ressources.

- Surveiller périodiquement les revenus et les dépenses pour identifier les points à améliorer pour assurer une rentabilité continue

Conclusion générale

L'énergie générée par les éoliennes suscite beaucoup d'intérêt dans les sphères scientifiques et de politique mondiale. Alors, ce travail traite la problématique de la planification des tâches de maintenance des parcs éoliens. Dans un premier temps, nous avons fait un état de l'art sur les modes et les causes de défaillances des éoliennes, nous avons proposé un modèle basé sur les systèmes multi-agents. Par la suite, nous avons présenté le simulateur que nous avons utilisé pour implémenter notre modèle. Le logiciel AnyLogic a été utilisé pour étudier l'instauration d'une stratégie de maintenance conditionnelle CBM.

Les systèmes énergétiques ont tendance à avoir plusieurs échelles et peuvent être facilement impactés par différents facteurs. Grâce à la modélisation par simulation AnyLogic, il est possible de simplifier des systèmes complexes et de déterminer les problèmes associés aux variabilités, afin de montrer dans quelle mesure les changements sur une échelle peuvent toucher l'ensemble du système.

AnyLogic a permis de représenter le système énergétique (parc éolien) de façon holistique, en reliant des éléments séparés au sein d'un seul modèle. Grâce à AnyLogic, une bibliothèque de modélisation a été créée, rendant plus simple la réutilisation de certains blocs et agents dans d'autres modèles. Son interface conviviale a facilité l'interaction avec les modèles pour les personnes n'étant pas formées à l'utilisation d'AnyLogic.

Les statistiques de sortie nous ont permis de déterminer les facteurs principaux impactant le système énergétique (parc éolien), ainsi que d'analyser les indicateurs économiques.

- En fin, on peut faire les recommandations suivantes :
- Améliorer les stratégies de maintenance et de remplacement pour réduire les pannes et augmenter la disponibilité des équipements.
- Augmenter le nombre d'équipes de service si le coût est justifié en améliorant l'efficacité et en réduisant les périodes d'inactivité.
- Revoir la planification et la gestion pour réduire les périodes d'inactivité et accroître l'utilisation efficace des ressources.
- Surveiller périodiquement les revenus et les dépenses pour identifier les points à améliorer pour assurer une rentabilité continue

- [Akdag & Dinler 2009] Seyit A Akdag 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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [Tavner 2012] P. J. Tavner. *Offshore wind turbines reliability, availability and maintenance*. *The Institution of Engineering and Technology*, 2012.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [Pérez et al. 2013] Jesús María Pinar Pérez, Fausto Pedro García Márquez, Andrew Tobias et Mayorkinos Papaelias. *Wind turbine reliability analysis*. *renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 23, pages 463–472, 2013.

- [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. 2013] PJ 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.
- [Zgoul & El-Thalji 2011] Moudar Zgoul et Idriss El-Thalji. Wind Energy Operation and Maintenance Practices in Desert Climate : threats, chal- lenges and solutions. In *GCrEEDer 2011*, Amman, April 26-28., 2011.
- [Bezzaoucha et al. 2020] Fatima Souad Bezzaoucha, M'hammed Sahnoun et Sidi Mohamed Benslimane. Multicomponent modeling and classification for failure propagation of an offshore wind turbine. *International Journal of Energy Sector Management*, 2020.
- [Van Bussel & Zaaier 2001] GJW Van Bussel et MB Zaaier. Reliability, availability and maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study. In *Proceedings of MArEC*, volume 2001, 2001.
- [Van Bussel & Zaaier 2003] GJW Van Bussel et MB Zaaier. Estimation of turbine reliability figures within the DOWEC project. *DOWEC report*, vol. 10048, no. 4, 2003.
- [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.
- [Braam & rademakers 2004] H. Braam et LWMM rademakers. Models to analyse operation and maintenance aspects of offshore wind farms. *ECN report*, 2004.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.

- [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.
- [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.*
- [kobbacy & Murthy 2008] khairy Ahmed helmy kobbacy et DN Prabhakar Murthy. *Complex system maintenance handbook. Springer Science & Business Media, 2008.*
- [Milborrow 2006] D Milborrow. *Operation and maintenance costs compared and revealed. Windstats Newsletter, vol. 19, pages 1–3, 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.*
- [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.*
- [ribrant 2006] Johan ribrant. *Reliability performance and maintenance a survey of failures in wind power systems. Sweden : kTh School of Electrical Engineering, 2006.*
- [Gertsbakh 2013] Ilya Gertsbakh. *reliability theory : with applications to preventive maintenance. Springer, 2013.*
- [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.*
- [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.*
- [connaissancedesenergies 2017] *connaissancedesenergies, 2017.*
- [Walsh et al. 2019] C Walsh et al. *Offshore Wind in Europe key trends and statistics 2018. Wind Europe, Brussels, 2019.*
- [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.*
- [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.*
- [Nandigam & Dhali 2008] Mahidhar Nandigam et Shirshak k Dhali. *Op- timal design of an*

offshore wind farm layout. In 2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pages 1470–1474. IEEE, 2008.

[Podevin 2017] Gérard Podevin. *CHAPITRE 9-La filière de l'éolien offshore posé en France : Nouveaux métiers ou nouveau regard sur les métiers ?*, 2017.

[halvorsen-Weare et al. 2013] Elin E halvorsenWeare, Christian Gundegjerde, Ina Bhalvorsen, 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.

[Siemens 2015] Siemens, 2015.

[Ziebuhr & kopfer 2017] Mario Ziebuhr et herbert kopfer. *Transportation planning with forwarding limitations. In Dynamics in Logistics, pages 243–254. Springer, 2017.*

[Bäumler & kotzab 2017] Ilja Bäumler et herbert kotzab. *Intelligent trans- port systems for road freight transport—an overview. In Dynamics in Logistics, pages 279–290. Springer, 2017.*

[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.*

[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.

[Shafiee 2014] Mahmood Shafiee. *An optimal group maintenance policy for multiunit 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 2015b] Mahmood Shafiee. *Maintenance logistics organization for offshore wind energy : Current progress and future perspectives. renewable Energy*, vol. 77, pages 182–193, 2015.

[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.*

[Jin et al. 2012] Tongdan Jin, Zhigang Tian, Miguel huerta et Jett Piechota. *Coordinating maintenance with spares logistics to minimize levelized cost of wind energy. In 2012 International Conference on Quality, reliability, risk, Maintenance, and Safety Engineering, pages 1022–1027. IEEE, 2012.*

[Dewan 2014] Ashish Dewan. *Logistic and service optimization for O&M of offshore wind farms ; model development & output analysis. 2014.*

[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.

[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.

[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.

[Badsì 2018] hBA Badsì. *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.

[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.

[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.

[Ferber 1987] Jacques Ferber. *Des objets aux agents : une architecture stratifiée*. Actes 6ème Congrès AFCET de reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, 1987.

[kpakpo & Itmi 2016] Miguel kpakpo et Mhamed Itmi. *A MAS model for O&M Cost simulation and optimization : case of a wind power operator*.

[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.

[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.

[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.

[Mili 2008] Seif Eddine Mili. *Conception d'une architecture basée agent pour la création d'un marché virtuel*. 2008.

Références bibliographiques

[**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.*

[**russell& Norvig 2002**] *Stuart russell et Peter Norvig. Artificial intelligence : a modern approach. 2002.*

[**Ferber 1995**] *Jacques Ferber. Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective. InterEditions, Paris, vol. 322, 1995.*

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 industrialists. 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

ملخص

من المتوقع ان تكون طاقة الرياح المصدر الاول للطاقة فالمستقبل بفضل مزاياها العديدة. مع ذلك تعتبر صيانتها نشاطا معقدا ومكلفا مما يجذب انتباه الباحثين والصناعيين بشكل متزايد. تقترح هذه الاطروحة نهج التحسين محاكاة لتخطيط التوجيه والصيانة لمزارع الرياح البحرية من اجل تقليل التكاليف مع الحفاظ على التوفر العالي لتوربينات الرياح. يتم تقديم النمذجة و المحاكاة القائمة على عوامل متعددة للتعامل مع تعقيد النظام. يتم استخدام خوارزمية لتحسين توجيه مهام الصيانة. من اجل جعل النهج المقترح اكثر واقعية. اخذنا في الاعتبار العديد من العلامات و القيود مثل الظروف الجوية و تكلفة الموارد ومدة الصيانة. تم تجربة العديد من تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسن التكلفة وتوليد. السيناريوهات لاثبات كفاءة النهج خلال دورة حياة المزرعة باكملها الطاقة وتوافر التوربينات