



HAL
open science

MODÉLISATION D'UN PLAN DE MAINTENANCE BASÉ SUR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS POUR LES ÉOLIENNES OFFSHORE

M'Hammed Sahnoun, David Baudry, Anne Louis, Bélahcène Mazari

► **To cite this version:**

M'Hammed Sahnoun, David Baudry, Anne Louis, Bélahcène Mazari. MODÉLISATION D'UN PLAN DE MAINTENANCE BASÉ SUR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS POUR LES ÉOLIENNES OFFSHORE . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166633

HAL Id: hal-01166633

<https://hal.science/hal-01166633>

Submitted on 23 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation d'un plan de maintenance basé sur les systèmes multi-agents pour les éoliennes offshore

M. SAHNOUN, D. BAUDRY A. LOUIS, B. MAZARI

IRISE / CESI

1 Rue Guglielmo Marconi
76130 Mont St Aignan - France
msahnoun@cesi.fr, dbaudry@cesi.fr

IRISE / CESI

1 Rue Guglielmo Marconi
76130 Mont St Aignan - France
alouis@cesi.fr, bmazari@cesi.fr

RÉSUMÉ : *La maintenance des éoliennes offshore est une tâche complexe et coûteuse qui représente un vrai déficit pour l'évolution de cette source d'énergie. La taille des parcs d'éoliennes offshore, la taille des éoliennes elles-mêmes, la distance qui les sépare de la côte, et les conditions météorologiques difficiles rendent non évident l'établissement d'une stratégie de maintenance efficace. Plusieurs techniques modernes de maintenance sont utilisées pour réduire les coûts des interventions et leurs durées. Dans ce papier nous proposons un modèle de maintenance hybride basé sur les systèmes multi-agents pour faciliter la modélisation du système et gérer les interactions dynamiques entre ses différentes parties. Un algorithme de décision multicritères a été proposé pour faire la sélection de l'éolienne à maintenir et le type de maintenance à faire. Un simulateur développé avec le logiciel NetLogo ainsi que des résultats préliminaires sont présentés à la fin de ce papier. Ces résultats ont montré que l'utilisation de la nouvelle stratégie de maintenance hybride que nous proposons permet d'augmenter la productivité du parc.*

MOTS-CLÉS : *Éoliennes offshore, Énergie renouvelable, Systèmes multi-agents, Maintenance, Modes de défaillance, Simulation*

1 INTRODUCTION

Un parc éolien offshore est un ensemble d'éoliennes utilisées pour générer de l'électricité. Le choix des sites d'implantation de ce type de parc dépend principalement de (1) la distance de la côte, (2) la profondeur des eaux, et (3) la qualité du vent (Kooijman, Lindenburg, Winkelaar & van der Hooft 2003). Cette source d'énergie est susceptible de devenir la première source d'énergie dans l'avenir (Perveen, Kishor & Mohanty 2014), (Henderson, Morgan, Smith, Barthelmie & Boesmans 2003), L'Europe est leader mondial dans ce domaine grâce aux parcs développés surtout par les pays nordiques tels que la Suède, la Hollande ou le Danemark (Ivan Pineda, Moccia & Wilkes 2014). La France connaîtra ses premiers parcs offshore début 2018 (du projet 2013).

Le plus grand obstacle devant le développement de cette énergie est son prix d'installation, d'exploitation et de maintenance élevé comparé aux autres sources d'énergies (Ivan Pineda et al. 2014). La maintenance des éoliennes offshore est une tâche complexe, coûteuse et difficile à effectuer surtout quand les conditions météorologiques sont dégradées (Byon, Pérez, Ding & Ntaimo 2011). D'après (G.Hassan 2001) le coût de la maintenance constitue de 25 à

30% du prix global du kWh, alors qu'il est seulement situé entre 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) représente entre 0.003 et 0.006 (€/kWh) tandis que la maintenance corrective représente entre 0.005 et 0.01 (€/kWh) (Rademakers, Braam, Zaaier & Energy 2003). La réduction des coûts de la maintenance devient donc une nécessité pour l'avenir des éoliennes offshore.

Plusieurs travaux s'intéressent à l'optimisation des plans de maintenance des éoliennes offshore. Par exemple, Dans (van de Pieterman, Braam, Obdam, Rademakers & van der Zee 2011), les auteurs ont proposé une architecture permettant d'intervenir rapidement en cas de panne en installant un bateau permanent dans le parc éolien. Ce dernier va constituer une base pour les équipes de maintenance du parc. (Rademakers et al. 2003) ont proposé de placer plusieurs grues de 50 MT pour réduire le temps de maintenance des pièces conséquentes telles que les boîtes de vitesse. Ils ont montré que la multiplication des grues à 150 K€ coûtera moins cher à long terme. (Brennan 2013) et (Nielsen & Sorensen 2011) ont proposé une maintenance basée sur le risque pour éviter les maintenances correctives.

La modélisation et la simulation des parcs éolien offshore est une étape nécessaire pour pouvoir optimiser les plans de maintenance. L'intervention de plusieurs acteurs dans le fonctionnement du système rend la tâche de modélisation complexe et difficile. Plusieurs équipes de recherche se sont intéressées au développement de simulateurs permettant de reproduire une ou plusieurs parties du système. (Pérez, García, Morant, Correcher & Quiles 2010) présentent un modèle simple basé sur les réseaux de pétrie, il propose aussi plusieurs implémentations possibles pour son modèle. (Byon et al. 2011) ont proposé un simulateur basé sur la Spécification Des Systèmes à Événement discret (Discrete event system specification (DEVS)). Ils ont modélisé chaque composante de l'éolienne, et leur simulateur a permis de montrer les avantages de l'utilisation d'une maintenance préventive conditionnelle plutôt qu'une maintenance préventive systématique. L'étude s'est intéressée uniquement à la maintenance de la boîte de vitesse. (van de Pieterman et al. 2011) ont aussi développé un modèle basé sur l'historique pour le calcul des coûts de maintenance, ils ont étudié le système de transport et proposé une solution optimale pour la cas d'étude qu'ils avaient. Toutes les précédentes études ont été confrontées à l'incontournable problème de la complexité de la planification de maintenance des éoliennes offshore, dû au nombre de paramètres non maîtrisés dans le système, tels que les conditions météorologiques, le facteur humain et la difficulté d'accès.

L'utilisation des systèmes distribués, notamment les systèmes multi-agents, est une solution intéressante pour ce genre de système. Ce type d'architecture permet de modéliser chaque partie du système indépendamment, et de gérer plus tard les interactions et la négociation entre les différentes parties du système.

Ce papier propose un modèle basé sur les systèmes multi-agents pour la maintenance d'un parc éolien offshore prenant en compte plusieurs modes de défaillance. Une nouvelle stratégie de maintenance est proposée pour augmenter la production énergétique et réduire le coût. Ce papier est organisé comme suit: dans le prochain paragraphe, on présente les modes et les causes de défaillance des parties de l'éolienne les plus vulnérables. Le 3^{ème} paragraphe présente le modèle basé sur les systèmes multi-agents avec une présentation de chaque agent et de ses interactions avec les autres. Le 4^{ème} paragraphe présente le simulateur développé à base de notre modèle et une comparaison entre notre stratégie de maintenance hybride et deux autres types de maintenance (maintenance préventive systématique et maintenance préventive conditionnelle). On termine ce papier par une conclusion et quelques perspectives.

2 DÉFAILLANCE DES ÉOLIENNES OFFSHORE

Un des avantages de l'utilisation des éoliennes offshore est le fait qu'on peut installer des éoliennes de très grande taille (des pales de plus de 90m) avec des puissances de production considérables de 6MW ou plus par éolienne (Lindenburg, Winkelaar & Hooft 2003). Cette taille ainsi que les expositions à des conditions météorologiques difficiles augmente le taux de défaillance de ces géants mécaniques même si le coût par KWh diminue avec la taille de l'éolienne (Braam & Verbruggen 2000).

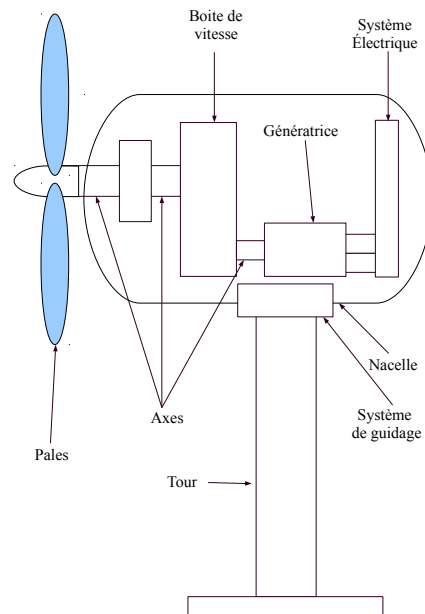


Figure 1 – Principales composantes d'une éolienne

Une étude sur un parc d'éolien danois (Hyers, McGowan, Sullivan, Manwell & Syrett 2006) a montré que le système électrique, la boîte de vitesse, le système d'orientation, la génératrice, et le système hydraulique représentent plus de 60% des pannes (Figure 1). Dans la suite de ce paragraphe nous allons nous intéresser aux modes et causes de défaillance pour chacune de ces parties.

2.1 Défaillance du système électrique

Les pannes des bobines, les court-circuits et les dommages qui peuvent atteindre les composants électriques, les pannes des transformateurs et coupures des fils électriques sont les principaux modes de défaillance du système électrique d'une éolienne (Babu & Jithesh 2008). Les plus importantes causes de ce genre de défaillances étant la foudre, la mauvaise

installation électrique et les défauts techniques de quelques composantes électroniques (résistances, capacité, ...).

2.2 Défaillances du système d'orientation

Ce système contrôle l'orientation de la nacelle pour qu'elle suive la direction du vent. En général, on rencontre des problèmes de fissuration des arbres d'entraînement, des défaillances de roulement et des fixations, des fractures des engrenages (Babu & Jithesh 2008). Ces défaillances sont dues à des phénomènes de givrage, de haute vibration durant les périodes de surcharge et surtout des pannes liées au fonctionnement du moteur (Stenberg & Holttinen 2010).

2.3 Défaillance de la boîte de vitesse

La boîte de vitesse représente le maillon faible dans une éolienne, son rôle est très important, elle tombe en panne très souvent et son remplacement est compliqué et prend beaucoup de temps (environ 5 jours (Rademakers et al. 2003)). Ses modes de défaillance sont principalement liés au roulement et la cassure des dents des engrenages (Lu 2012). Elles sont déclarées comme étant les résultats de la contamination par des particules, l'arrêt et le démarrage très fréquent de l'éolienne, et le fonctionnement dans des périodes de surcharge (Babu & Jithesh 2008).

2.4 Défaillance des systèmes hydrauliques

Des composantes hydrauliques sont utilisées dans plusieurs connections à haute pression placées dans différents endroits de l'éolienne tels que le système d'orientation, la boîte de vitesse, le système de freinage, etc. Les problèmes de fuite d'huile dans toutes ces composantes est connu comme la défaillance des systèmes hydrauliques. Il est dû essentiellement au changement fréquent de température, à la corrosion, aux vibrations, à la mauvaise conception et à la mauvaise qualité des composantes du système (durits, électrovanne, etc). La mauvaise installation des systèmes hydrauliques est responsable de 60% des défaillances ((Palanci n.d.)).

2.5 Défaillances des pales

Les pales sont directement responsables du transfert de l'énergie du vent en énergie mécanique grâce à leurs formes aérodynamiques. D'une manière générale on peut regrouper sous "défaillance de pales" tous les phénomènes de cassures, fissures, vibrations, Leurs principales causes sont: la turbulence du vent, la rotation non contrôlée, la foudre et les défauts de fabrication (Bill Chun Piu Lau, Eden Wai Man Ma 2012).

2.6 Classification des causes de défaillance

En regardant les causes de défaillances des différentes composantes de l'éolienne, nous les avons classé en trois principales: (1) la météo, (2) les erreurs d'installation, et (3) les problèmes liés à la qualité des produits utilisés. La planification de la maintenance doit prendre en compte ces éléments. Le modèle que nous allons décrire dans ce papier considère les effets de la météo sur les éoliennes, et les différentes dégradations dues aux éventuels défauts de fabrication ou de montage.

3 MODÉLISATION BASÉE SUR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

La maintenance des parcs éoliens est une tâche complexe qui se passe sur plusieurs sites et soumise à des contraintes liées à la météo et à la disponibilité de ressources humaines qualifiées, des pièces de rechange et des moyens de transport et levage. La réussite d'une tâche de maintenance requiert l'intervention de plusieurs acteurs du système. La décomposition du système en plusieurs parties interactives est la meilleure façon de modéliser le système afin de pouvoir en contrôler plus facilement les différentes parties. L'utilisation des systèmes multi-agents est une manière très intéressante pour la modélisation et la simulation de ce type de système.

3.1 Modèle global

Le système a été divisé en cinq parties reliées entre elles, chaque partie représentant un ou plusieurs agents autonomes comme le montre la Figure 4. Nous avons considéré 5 types d'agents:

- Les agents type éoliennes
- Les agents type maintenance
- Les agents type ressources
- Les agents type monitoring
- Les agents type météo

Nous allons décrire dans les paragraphes suivants le comportement et la composition de chaque agent parmi ceux qui viennent d'être cités.

3.1.1 Les agents éoliennes

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 (Karki & Patel 2009) la puissance générée par une éolienne exposée à une vitesse de vent V_s est calculée par la relation mathématique suivante:

$$P = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq V_s < V_{ci} \\ P_r(a + b \cdot V_s + c \cdot V_s^2) & \text{si } V_{ci} \leq V_s < V_r \\ P_r & \text{si } V_r \leq V_s < V_{co} \\ 0 & \text{si } V_{co} \leq V_s \end{cases} \quad (1)$$

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:

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

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

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

La vitesse du vent est mesurée dans des stations

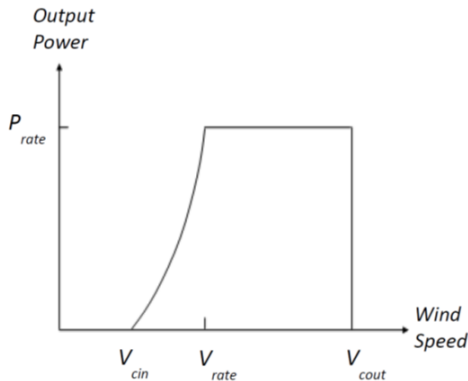


Figure 2 – La courbe de puissance

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 (Hau & Von Renouard 2013), (Zhou, Yang & Fang 2006):

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

où:

- V_s : La vitesse du vent au niveau de la nacelle.
- V_0 : La vitesse du vent mesurée dans la station.
- h : La hauteur de la nacelle.
- h_0 : La hauteur du point de mesure du vent.
- 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. Le Tableau 1 décrit les indicateurs que nous avons définis avec leur significations. L'éolienne possède plusieurs modes de fon-

Indicateur	Description
ehf (équipement health factor)	C'est un indicateur de santé globale de l'éolienne, il varie dans temps, lors d'un incident ou d'une tâche de maintenance. Il varie entre 0 (très mauvaise 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 – Indicateur de performance d'une éolienne
 tionnement qui impactent la qualité et la quantité de puissance produite. Nous avons identifié quatre modes de fonctionnement:

- *Fonctionnement normal*: L'éolienne est en bonne santé avec un EHF $\in [8; 10]$ avec une probabilité de tomber en panne de 5%.
- *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%.
- *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%
- *En panne*: Dans cette état l'éolienne est à l'arrêt, elle attend une maintenance curative et son EHF prend la valeur 0.

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

- *Produce*: Elle définit la puissance électrique produite.

- **Degrade:** Elle met à jour les indicateurs de performance de l'éolienne. Les différents composants de l'éolienne ont des taux de pannes qui suivent une loi de Weibull à trois stages avec des paramètres différents pour chaque composant. Nous avons prité en considération les cinq composants les plus influents. Notamment le système électrique, le système d'orientation, la boîte de vitesse, le système hydraulique et les pales. L'arrêt d'une composante de ce système provoque l'arrêt de l'ensemble, la fiabilité de l'éolienne R_{tur} est donc calculée par la formule suivante:

$$R_{tur} = R_{es} \times R_{ys} \times R_{gb} \times R_{hs} \times R_{bl}$$

où:

R_{es} : la fiabilité de fonctionnement du système électrique

R_{ys} : la fiabilité de fonctionnement du système d'orientation

R_{gb} : la fiabilité de fonctionnement la boîte de vitesse

R_{hs} : la fiabilité de fonctionnement du système hydraulique

R_{bl} : la fiabilité de fonctionnement des pales

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.

3.1.2 L'agent météo

La variation des conditions météorologiques est représentée par un agent météo. Il est caractérisé par la vitesse du vent V_s , la hauteur des vagues H_s , la foudre L_g , la visibilité $Visi$. Ces paramètres sont générés suivant une loi normale qui change de moyenne et d'écart type selon la saison. Nous avons défini deux fenêtres de météo pour limiter les types d'interventions possibles sur les éoliennes.

- **Fenêtre sécurisée:** elle englobe des conditions météorologiques qui permettent une intervention sécurisée sur les éoliennes par les techniciens et les experts (ingénieurs), même s'ils n'ont pas une très grande expérience maritime. Les conditions météorologiques sont $V_s \leq 8m/s$, $H_s \leq 1.5m$, $Visi \geq 5km$.
- **Fenêtre large:** elle est caractérisé par des conditions météorologiques sévères qui permettent des interventions sur les éoliennes pour du personnel expérimenté à la navigation maritime et l'intervention dans des conditions difficiles. Les limites de cette fenêtre sont : $V_s \leq 12m/s$, $H_s \leq 2m$, $Visi \geq 2km$.

Le comportement de l'agent météo est défini par les fonctions *update* qui permet de générer les valeurs des caractéristiques du temps et la fonction *degrade* qui représente l'effet de la météo sur les performances des éoliennes.

3.1.3 Les agents ressources

Nous avons défini deux types d'agent ressources; matérielles et humaines.

L'agent ressources humaines est caractérisé par le nombre d'ingénieurs (*Ing*), le nombre de techniciens (*Tech*) et l'expérience des équipes (*Exp*). Cet agent s'expérimente avec le nombre d'interventions effectuées (la fonction *Experience*), et se met à jour pour définir la disponibilité des équipes (la fonction *update_R*).

L'agent ressources matérielles contient le nombre d'outils nécessaires pour effectuer une tâche de maintenance. On distingue les bateaux (grand, moyen et petit), les grues (2 MT et 50 MT) et les pièces de rechange. Le comportement de cet agent est géré par les fonctions dégradation et maintenance qui représentent respectivement la dégradation du matériel utilisé (bateau, grue) et sa réparation.

3.1.4 Les agents maintenance

Les tâches de maintenance sont représentées par un ensemble d'agents de maintenance corrective, préventive systémique ou préventive conditionnelle. Chaque type est caractérisé par son coût, ses besoins en terme de ressources et ses conditions d'utilisation (fenêtre de temps, type de panne, etc).

- **Maintenance préventive systémique:** C'est le type de maintenance le plus utilisé vu son coût peu élevé. En ce qui concerne les éoliennes, cette stratégie de maintenance est très utilisée. Souvent, les lubrifiants et les composantes à durée de vie inférieure à 12 mois sont remplacés et une vérification du système est faite. Ce type d'intervention dure entre 1 et 2 jours et demande l'intervention d'un expert et deux techniciens. Il est planifié en général deux fois par an quand les conditions météorologiques le permettent.
- **Maintenance préventive conditionnelle:** C'est une maintenance provoquée par les retours capteurs et les indicateurs de performance de l'éolienne. Ce type de maintenance est accompagné d'un diagnostic des causes du problème. Souvent, on en profite pour effectuer les certaines opérations de maintenance préventive systémique.
- **Maintenance corrective:** On fait appel à ce type de maintenance pour corriger des pannes importantes qui provoquent l'arrêt de l'éolienne. C'est

une intervention très coûteuse qui demande des moyens importants (appel à des sous-traitants, des bateaux de moyennes tailles, des grandes grues, etc) et des délais allant de 2 à 5 jours d'intervention. Ce type de maintenance n'est pas recommandé. Pour notre modèle, on ne fait appel à ce type de maintenance que quand l'éolienne est en panne.

Les différents agents de type maintenance entretiennent une relation de coopération en terme de données et de date d'intervention afin d'augmenter l'efficacité des tâches. Nous avons supposé que l'intervention avec n'importe quel type de maintenance remet l'état de l'éolienne à "Normale" et remet tous les indicateurs de performance à leur état initial hormis les taux de défaillances. Le comportement des agents maintenance est géré par les fonctions suivantes:

- Demande Ressources : cela permet de récupérer les ressources matérielles et humaines nécessaires à la tâche de maintenance sélectionnée.
- Répare : Cette fonction enclenche la réparation de l'éolienne. Pendant toute la durée de la tâche de maintenance l'éolienne est à l'arrêt en mode maintenance.
- Rendre Ressource: Une fois la tâche de maintenance effectuée, l'agent maintenance rend les ressources qu'il a utilisé, remet l'éolienne en marche et s'autodétruit.

3.1.5 L'agent monitoring

C'est l'agent qui gère la planification des tâches de maintenance et la priorité entre les éoliennes qui ont besoin de réparation ou de contrôle. Il permet de surveiller l'état des autres agents, de sélectionner les éoliennes qui ont besoin de maintenance ainsi que le type de maintenance adéquat. Le choix de l'éolienne à maintenir se fait suivant un certain nombre de critères. Nous avons défini les critères de décision suivants: la date pour la prochaine maintenance préventive systémique, le niveau de risque de tomber en panne ou de propager la défaillance, ainsi que l'état de santé de l'éolienne. Le choix du type de maintenance à effectuer dépend du critère que l'on a utilisé pour la sélection de l'éolienne. Si le choix de l'éolienne est basé sur le délai, alors on choisit une maintenance systémique, s'il est fait en se basant sur l'état de la machine ou le niveau de risque, on choisit une maintenance conditionnelle. Si l'éolienne est en panne, on choisit une maintenance corrective.

3.1.6 Relation entre les différents agents

Le parc éolien offshore est composé d'un certain nombre d'éoliennes qui sont impactées par l'agent Météo,

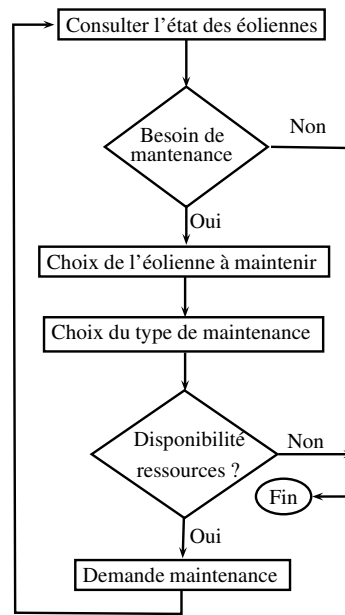


Figure 3 – Fonctionnement de l'agent monitoring

pour la production et la dégradation. L'agent monitoring surveille toutes les éoliennes et repère celles qui sont en panne ou qui ont besoin d'une intervention. Il sélectionne le meilleur type de réparation à faire et demande à l'agent maintenance adéquat d'intervenir; s'il n'existe pas il le crée. Avant d'ordonner une maintenance, l'agent monitoring vérifie la disponibilité des ressources nécessaires pour l'intervention et les conditions météorologiques. L'agent maintenance appelé demande les ressources dont il a besoin auprès des agents ressources et s'adonne à sa tâche. Une fois cette tâche terminée il rend les ressources et disparaît.

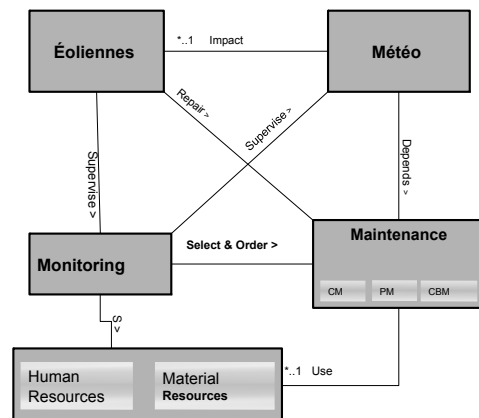


Figure 4 – Principales composantes d'une éolienne

4 SIMULATION

Nous avons utilisé le logiciel NetLogo pour développer un simulateur basé sur le modèle défini dans le paragraphe précédent. NetLogo est un langage de programmation des systèmes multi-agents et un outil de modélisation des phénomènes dynamiques complexes (Tisue & Wilensky 2004).

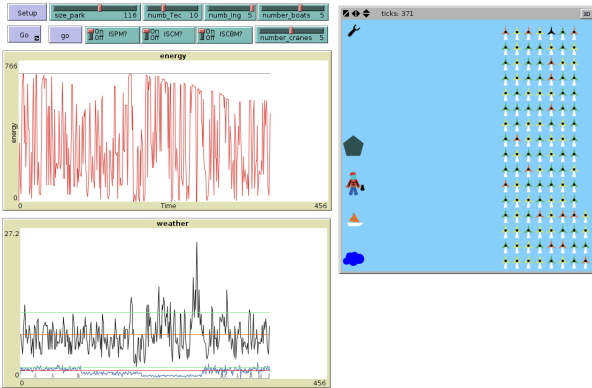


Figure 5 – Représentation du simulateur sur NetLogo

L'objectif final de ce simulateur est de définir la stratégie de maintenance qui permet une production énergétique optimale au moindre coût possible. Il nous permet de tester plusieurs stratégies de maintenance et de comparer des indicateurs de performance du parc éolien sur une longue période. Nous avons la possibilité d'observer plusieurs indicateurs de performances tels que la puissance électrique produite par le parc, le nombre d'éoliennes en fonctionnement, l'état de santé des éoliennes, le coût des actions de maintenance, le prix de l'électricité produite, etc.

Dans un premier temps, le critère d'évaluation que nous avons considéré est la production électrique instantanée du parc. On peut observer aussi la météo, notamment, la vitesse du vent, la hauteur des vagues et les éclairs. Le pas d'échantillonnage de la simulation est d'une journée, c'est à dire que chaque boucle de simulation représente une journée. Les valeurs considérées de tous les paramètres dynamiques sont des moyennes sur une journée. La Figure 5 représente l'environnement de la simulation. Nous avons un bouton "Setup" qui initialise le système et le bouton Go pour lancer la simulation. Nous avons la possibilité de définir quelques paramètres du système tels que le nombre d'éoliennes dans le parc, et les ressources disponibles en terme d'ingénieurs, techniciens, bateaux, grues, et pièces de rechange.

Chaque éolienne change de couleur selon son mode de fonctionnement: Vert pour le mode normal, jaune pour le mode dégradé, orange pour le mode critique et

rouge pour dire qu'elle est en panne. Quand une tâche de maintenance est en cours d'exécution, l'éolienne est représentée par une couleur noire. Nous avons considéré des éoliennes de production nominale de 6MW avec les paramètres de fonctionnement concernant la vitesse du vent suivants: vitesse de coupure de démarrage $V_{ci} = 4m/s$, vitesse de fonctionnement nominal $V_r = 14m/s$ et Vitesse de coupure d'arrêt $V_{cout} = 25m/s$.

la Figure 5 montre une simulation du fonctionnement du système sur une période d'une année. On remarque que l'énergie globale produite par le parc dépend très fortement de la vitesse du vent. Nous avons utilisé un historique des conditions météorologiques de l'aéroport du Havre situé sur la côte de la Manche. Nous avons supposé que la vitesse du vent est semblable à celle prélevée dans le large. Les hauteurs significatives des vagues suivent une loi de Rayleigh de paramètre σ variable suivant la saison (Thornton & Guza 1983). Comme le logiciel Netlogo ne propose pas de fonction de génération de la loi de Rayleigh, nous avons utilisé la relation suivante pour générer la hauteur des vagues à partir d'une distribution uniforme:

$$H_s = \sigma \times \sqrt{-\log U}$$

où:

U : est une variable aléatoire uniforme appartenant à l'intervalle $[0, 1]$.

Pour ressortir l'effet de la stratégie de maintenance sur la production, nous avons effectué des simulations avec une vitesse de vent constante toute l'année pour la production énergétique. Les variations météorologiques (vitesse du vent, hauteur des vagues, éclairs, ...) sont utilisées uniquement pour faire le choix d'effectuer ou non la tâche de maintenance et pour la dégradation des éoliennes.

4.1 Résultats et discussions

Nous avons effectué trois types de simulations pour pouvoir montrer l'influence de la stratégie de maintenance sur la production, et comparer les différentes stratégies de maintenance. Celles adoptées sont :

- stratégie de maintenance préventive systémique à des dates pré-planifiées, plus des interventions avec une maintenance corrective en cas de panne.
- maintenance préventive conditionnelle quand les indicateurs de performance de l'éolienne se dégradent, plus des maintenances correctives en cas de panne.
- Stratégie de maintenance hybride (maintenance systémique, maintenance corrective, maintenance conditionnelle): Dans ce cas l'agent mon-

itoring choisit le type de la maintenance à effectuer en se basant sur le critère de choix de l'éolienne à maintenir. Si l'éolienne a été sélectionnée parce qu'elle a un EHF faible, on lance une maintenance conditionnelle, si elle est sélectionnée suite à une panne, alors on lance une maintenance corrective. si au contraire, l'éolienne est sélectionnée parce que sa date de maintenance systémique est arrivée ou dépassé, alors on choisit une maintenance systémique.

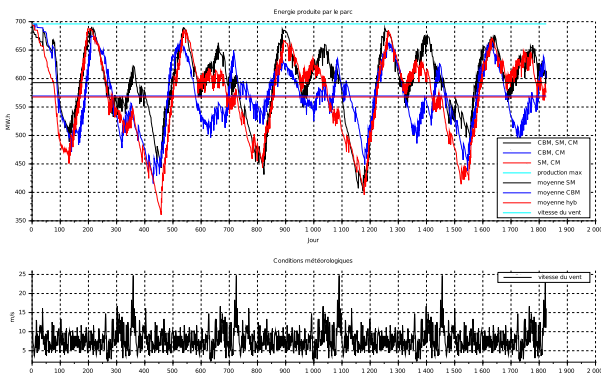


Figure 6 – Production totale d'énergie et variation météorologique sur 5 ans

La figure 6 représente le niveau d'énergie généré par la parc éolien pendant 5 ans. Le parc est constitué de 116 éoliennes, qui sont maintenues par une équipe de 10 techniciens et 5 ingénieurs. Ils disposent de 6 bateaux et 6 grues supposés fonctionnels tout le temps, et un approvisionnement sans rupture de pièces de rechange. La Figure 6 montre que la stratégie de maintenance et les conditions météorologiques influencent fortement la production énergétique du parc éolien. La comparaison des valeurs moyennes sur 5 ans montre que la stratégie de maintenance hybride que nous avons proposé donne de meilleurs résultats avec une production moyenne de 85% de la production totale contre 81% pour les deux autres stratégies.

Le Tableau 2 compare le nombre de fois où une maintenance a été nécessaire "Maintenances demandées", et le nombre de fois où elle a été effectuée "Maintenances effectuées". D'une manière générale, il est toujours possible de faire une maintenance sauf quand il n'y a pas de ressources ou lorsque les conditions météorologiques ne le permettent pas. La stratégie de maintenance basée sur la maintenance préventive conditionnelle est la plus économique puisque l'on a effectué seulement 1130 tâches de maintenance dont 17 maintenances correctives uniquement. La stratégie de maintenance basée sur la maintenance préventive systémique présente 1615 actes dont 128 maintenances correctives, ce qui représente un coût très élevé comparé à la première stratégie pour une production équivalente (81% de la production maximale). La stratégie de maintenance hybride mon-

tre des performances intéressantes à étudier, avec un nombre d'interventions inférieur à celui de la maintenance préventive systémique et supérieur à celui de la maintenance préventive conditionnelle, et avec seulement 14 interventions en maintenance corrective. Avec ce coût supplémentaire comparé à la stratégie de maintenance préventive conditionnelle, on arrive à produire en moyenne environ 30MW de puissance.

Nous remarquons aussi que le type de maintenance la plus utilisée lors de l'application de la stratégie de maintenance hybride est la maintenance préventive systémique plus 2/3 des maintenances effectuées. Cela peut être expliqué par le fait que les éoliennes sont en bonne état et qu'elles ne déclenchent pas souvent des maintenances préventive conditionnelles, ce qui explique l'augmentation de la production.

À travers le simulateur basé sur les systèmes multi-agents nous avons montré l'utilité et l'efficacité du modèle proposé. La stratégie de maintenance hybride permet d'avoir des performances intéressantes pour la maintenance des éoliennes offshore qui présentent des contraintes inhabituelles. Cette stratégie permet de faire un compromis entre la production d'énergie et les coûts de maintenance en choisissant l'éolienne à maintenir et le type de maintenance à effectuer.

	CBM/CM	SM/CM	Hybride
CBM demandées	2296	0	1129
SM demandées	0	2560	1782
CM demandées	67	471	117
Maintenances totales demandés	2363	3031	3028
CBM effectuées	1113	0	429
SM effectuées	0	1487	1142
CM effectuées	17	128	14
Maintenances totale effectuées	1130	1615	1585

Tableau 2 – Comparaison des stratégies de maintenances de point de vue du nombre d'interventions et du nombre de demandes de maintenances

5 CONCLUSION

L'énergie générée par les éoliennes offshore suscite beaucoup d'intérêt dans les sphères scientifiques et de politique mondiale. Ce papier 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 développé pour implémenter notre modèle. Le logiciel libre NetLogo a été utilisé pour le développement du simulateur. La dernière partie de ce papier a été consacrée à la présentation et à la discussion des résul-

tats obtenus à travers la comparaison de trois stratégies de maintenance (maintenance systémique "SM", maintenance conditionnelle "CBM" et la stratégie de maintenance hybride "SM,CM,CBM").

Les résultats ont montré que la stratégie de maintenance hybride assure le meilleur rendement énergétique du parc, alors que la stratégie basée sur la maintenance conditionnelle est la plus économique. À travers ces résultats, on peut conclure que l'approche multi-agents ainsi que la stratégie de maintenance hybride donnent des résultats très intéressants.

L'algorithme de décision qui permet de sélectionner l'éolienne à maintenir et le type d'actions de maintenance à mener est basé sur une simple comparaison de niveau de critique des éoliennes. Une amélioration de cet algorithme va faire l'objet de nos travaux à court terme. Actuellement chaque éolienne est représentée par un agent indépendant, nous allons proposer de faire un modèle distribué de l'éolienne où elle constituera un ensemble d'agents (boîte de vitesse, système électrique, pales, ...).

Plusieurs autres améliorations peuvent être apportées au modèle et au simulateur pour permettre d'effectuer la planification et l'optimisation des stratégies de maintenance telles que l'ajout d'autres types de maintenance (télé maintenance, maintenance proactive), la simulation avec des données météorologiques réelles et la réduction du pas de simulation à 30 minutes au lieu d'une journée.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'Union européenne de son soutien, grâce au programme européen INTERREG IVA France-Manche, Royaume-Uni, et du financement du projet MerInnovate.

References

Babu, J. R. & Jithesh, S. (2008). Breakdown risks in wind energy turbines, *Pravartak, the journal of Insurance and risk Management from National Insurance Academy, Pun* **3**(3).

Bill Chun Piu Lau, Eden Wai Man Ma, M. P. (2012). Review of offshore wind turbine failures and fault prognostic methods, *Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing)* pp. 1–5.

Braam, H. & Verbruggen, T. W. (2000). R & D NEEDS FOR O & M OF WIND TURBINES.

Brennan, F. (2013). Risk based maintenance for offshore wind structures, *Procedia CIRP* **11**: 296–300.

Byon, E., Pérez, E., Ding, Y. & Ntaimo, L. (2011). Simulation of wind farm operations and maintenance using discrete event system specification, *Simulation* **87**(12): 1093–1117.

du projet, E. (2013). Presentation du projet du parc éolien offshore de fecamp.
URL: <http://parc-eolien-en-mer-de-fecamp.fr/>

G.Hassan (2001). Concerted Action on Offshore Wind Energy in Europe.

Hau, E. & Von Renouard, H. (2013). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, Springer.

Henderson, A. R., Morgan, C., Smith, H. C., Barthelmie, R. J. & Boesmans, B. (2003). Offshore wind energy in europe—a review of the state-of-the-art, *Wind energy* **6**(1): 35–52.

Hyers, R., McGowan, J., Sullivan, K., Manwell, J. & Syrett, B. (2006). Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines, *Energy Materials* **1**(3): 187–203.

Ivan Pineda, S. A., Moccia, J. & Wilkes, J. (2014). Wind in power 2013, (February): 1–12.

Karki, R. & Patel, J. (2009). Reliability assessment of a wind power delivery system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability* **223**(1): 51–58.

Kooijman, H., Lindenburg, C., Winkelaar, D. & van der Hooft, E. (2003). Dowec 6 mw pre-design, *Energy Research Center of the Netherlands (ECN)*.

Lindenburg, C., Winkelaar, D. & Hooft, E. L. V. D. (2003). Dowec 6 mw pre-design, (September): 1–46.

Lu, B. (2012). A Review of Recent Advances in Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis.

Nielsen, J. J. & Sorensen, J. D. (2011). On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components, *Reliability Engineering & System Safety* **96**(1): 218–229.

Palanci, A. (n.d.). Leak-free hydraulic fittings prevent vibration failure.

Pérez, M., García, E., Morant, F., Correcher, A. & Quiles, E. (2010). Optimal maintenance system for offshore wind turbines, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10). Granada (Spain), 23th to 25th March*.

- Perveen, R., Kishor, N. & Mohanty, S. R. (2014). Off-shore wind farm development: Present status and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **29**: 780–792.
- Rademakers, L., Braam, H., Zaaijer, M. B. & Energy, S. W. (2003). ASSESSMENT AND OPTIMISATION OF OPERATION AND MAINTENANCE OF OFFSHORE WIND TURBINES.
- Stenberg, A. & Holttinen, H. (2010). Analysing failure statistics of wind turbines in finland, *European Wind Energy Conference, April*, pp. 20–23.
- Thornton, E. B. & Guza, R. (1983). Transformation of wave height distribution, *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **88**(C10): 5925–5938.
- Tisue, S. & Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity, *International Conference on Complex Systems*, pp. 16–21.
- van de Pieterman, R., Braam, H., Obdam, T., Rademakers, L. & van der Zee, T. (2011). Optimisation of maintenance strategies for offshore wind farms, *The Offshore 2011 Conference*.
- Zhou, W., Yang, H. & Fang, Z. (2006). Wind power potential and characteristic analysis of the pearl river delta region, china, *Renewable Energy* **31**(6): 739 – 753.