

Une approche de gestion de la maintenance de parcs éoliens centrée sur les systèmes multiagents

Miguel Kpakpo

▶ **To cite this version:**

Miguel Kpakpo. Une approche de gestion de la maintenance de parcs éoliens centrée sur les systèmes multiagents. Intelligence artificielle [cs.AI]. Normandie Université, 2018. Français. NNT : 2018NORMIR33 . tel-02173351

HAL Id: tel-02173351
https://theses.hal.science/tel-02173351

Submitted on 4 Jul 2019

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

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

Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité INFORMATIQUE

Préparée au sein de l'INSA ROUEN

UNE APPROCHE DE GESTION DE LA MAINTENANCE DE PARCS EOLIENS CENTREE SUR LES SYSTEMES MULTIAGENTS

Présentée et soutenue par
Miguel KPAKPO

Thèse soutenue publiquement le 20 Décembre 2018 devant le jury composé de		
Mr Philippe ALEXANDRE	Directeur Expertise, Etudes et Innovation ENGIE GREEN	Membre Invité
Mr Alain CARDON	Professeur retraité	Membre invité
Mr Slim HAMMADI	PR École Centrale de Lille	Examinateur
Mr Mhamed ITMI	MCF HDR INSA Rouen Normandie	Directeur de thèse
Mr Alassane NDIAYE	PR Université Libre de Bruxelles	Rapporteur
Mr Yann POLLET	PR CNAM Paris	Rapporteur
Mme Salima TAIBI	MCF HDR UniLaSalle Mt St Aignan	Examinatrice
Mme Guilaine TALENS	MCF HDR IAE Université Lyon 3	Examinatrice

Thèse dirigée par Mhamed ITMI, laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes (LITIS)

la compagnie du vent ENGIE — INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES ROUEN — MIIS — litis

Table des matières

Remerciements 8

Résumé 9

Introduction générale 10

Chapitre 1. Contexte de l'éolien, état de l'art des champs de recherche et problématique industrielle 13

Partie 1 : La maintenance et le contexte de l'éolien 13

1.1 Le contexte de l'éolien 13

1.2 L'O&M : les types de maintenance 16

1.2.1. Les différents types de maintenance 16

1.2.1.1. Maintenance corrective 17

1.2.1.2. Maintenance préventive 17

1.2.1.3. Maintenance prédictive 17

1.2.1.4. Maintenance planifiée 18

1.2.1.5. Maintenance palliative 18

1.2.1.6. La maintenance curative 18

1.2.1.7. Maintenance hybride 19

1.3 Les outils et logiciels utilisés pour l'optimisation de la maintenance 20

1.3.1. L'application SINBAD développée par la société Acte industries 20

1.3.2. Windfit : un outil d'analyse de la performance. 20

1.3.3. L'OMCE : Opération and Maintenance Cost Estimator 21

1.3.4. L'estimateur développé par MECAL 22

1.3.5. Le modèle pour la maintenance d'éoliennes Offshore basé sur les SMA 24

1.4 Les stratégies d'optimisation de la maintenance et les méthodes développées 25

1.4.1. La gestion des pièces dans le cadre de la maintenance 25

1.4.2. Mutualisation du type de maintenance et stratégies opportunistes 25

1.4.3. Les méthodes développées basées sur la fiabilité des composants 26

1.5 Conclusion sur l'O&M 27

Partie 2 : Etat de l'art sur les systèmes multiagent et les ontologies métiers 29

1.6 Introduction sur les SMA 29

1.6.1. Le concept d'agent et de système multiagent SMA 29

1.7 Caractéristiques des agents 30

1.8 Les connaissances d'un agent 31

1.9 Les différents types d'agents 31

1.9.1. L'approche centralisée d'un SMA 33

1.9.2. L'approche distribuée d'un SMA 34

1.9.3. L'approche hybride 35

1.10 L'interaction au sein des SMA 35

1.10.1. La communication dans les systèmes multiagents 35

1.10.2. La négociation dans les SMA 37

1.11 La conception de SMA 37

1.12 La simulation orientée SMA 37
1.13 Modélisation des agents en SMA 37
1.13.1. Les plateformes existantes 37
1.13.2. Conclusion sur les SMA 38
1.14 Les ontologies 38
1.15 Positionnement de la thèse par rapport à l'état de l'art et choix des systèmes multiagent .. 39
1.16 La définition de la fonction Coût de l'O&M pour un exploitant éolien 41
1.17 Modélisation des agents à partir de l'ontologie (démarche méthodologique) 41
Chapitre 2. L'approche de l'optimisation basée sur le coût 43
2.1 L'optimisation par la recherche de rentabilité : un « EBITDA » adapté au contexte de la maintenance 43
2.1.1. Ontologie descriptive de la maintenance du point de vue LCV 43
2.1.2. Equipements 44
2.1.3. Indicateurs 45
2.1.4. La maintenance 46
2.1.5. Production issue des équipements 47
2.2 La « Fonction coût » et la performance financière des parcs éoliens 47
2.2.1. Cadre général 47
2.2.2. Cadre particulier de l'O&M chez l'exploitant LCV 48
2.3 Le calcul de la Fonction Coût 49
2.3.1. Le Chiffre d'affaires d'un parc éolien 51
2.3.1.1. Le chiffre d'affaires théorique 51
2.3.1.2. Le chiffre d'affaires réel 52
2.3.2. Les pertes de production 52
2.3.2.1. Pertes de production dues aux pannes 52
2.3.2.2. Pertes de production dues aux arrêts planifiés 54
2.3.2.3. Pertes de production dues aux bridages 54
2.3.2.4. Pertes dues au défaut de performance 54
2.3.2.5. Les pertes de production imputables aux causes extérieures à LCV 55
2.3.3. Le Coût de l'O&M 55
Le coût de la prestation d'intervention (Ct Prestation) 56
Le coût de Livraison ($CL_{Pièce}$) 61
2.3.4. Le coût de location du stockage (Loyer Pièce) 62
Le coût de revient de la pièce ($CR_{pièce}$) 62
Le coût du matériel lourd (CML) 63
Les charges de personnel 63
2.3.5. Les indicateurs de la maintenance 63
2.3.6. Stratégies d'optimisation de la fonction Coût. 67
2.4 La performance financière d'un parc éolien 68
2.4.1. De la fonction Coût à la disponibilité énergétique 69
2.4.2. De la fonction coût à la disponibilité financière 70
2.4.1. Le performance ratio 70
2.4.2. La performance financière 70
2.4.3. Les termes correctifs 71

2.5 Le modèle agent 72
2.5.1. Développement du prototype : les sous-systèmes de PROMEEO 73
TCHEX : Travail du Chargé d'Exploitation relatif à la gestion d'une intervention. 73
TAROM : Travail d'Analyse d'un Responsable O&M relatif au suivi et à l'analyse d'une période de fonctionnement d'un(e) éolienne/parc/zone. 76
SOREM : Système d'optimisation d'un responsable de maintenance. 77
SYPOM : système d'optimisation pour un responsable d'O&M. 80
2.6 Le modèle Agent au sein de la plateforme PROMEEO 81
2.6.1. L'environnement 82
2.6.2. Les interactions dans le système 83
2.6.3. Un agent dans le système 83
2.6.4. L'agent Recherche Panne 85
2.6.5. L'agent Panne 86
2.6.6. L'agent Diagnostic 86
2.6.7. L'agent O&M 86
2.6.8. L'agent Prestation 87
2.6.9. L'agent Météo 87
2.6.10. L'agent Fonction Coût 87
2.6.11. L'agent Pièces 87
Chapitre 3. Implémentation de l'outil PROMEEO (Plateforme de Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et Exploitation des parcs Éoliens Onshores) 89
3.1 Situation actuelle : description de l'existant chez l'exploitant en termes d'optimisation d'O&M et solution proposée 89
3.2 Solution proposée pour répondre au besoin 89
3.3 Périmètres des utilisateurs et gestion des droits 90
3.4 Description des fonctionnalités principales de la plateforme 91
3.5 Base de données 93
3.5.1. Sources et import de données 95
3.5.2. Interactions avec PrediWind 96
3.5.3. Interactions avec XWind 96
3.5.4. Les données d'entrées de Kerwin vers XWind 98
3.5.5. Données d'entrées de la GMAO 98
3.5.6. Données base Prestation 99
3.5.7. Données d'entrées sur la production réelle : SATURNE 99
Conclusion et perspectives 101
3.6 Bilan de la thèse 101
3.7 Contributions et perspectives 102
Bibliographie 104
Glossaire 108
Annexes 109
Présentation de la Compagnie du vent (LCV) 109
3.7.1. La DEMSI (direction Etudes, Mesures et Systèmes Innovants) 110

Le pôle Mesures 110
Le pôle Etudes 110
Le pôle Innovation 110
3.7.2. La DEX (direction d'exploitation et maintenance) 110
La direction d'exploitation des parcs et leurs outils 111
Les principaux outils utilisés par la DEX 111
Gestion d'une panne à la DEX 112
Le tarif d'obligation d'achat dans le secteur éolien 112
3.7.3. Comment intervient la météo dans les différentes opérations ? 112
3.7.4. Fonctionnement de l'éolienne 113

Tables des figures

Figure 1 Répartition des postes de coûts O&M [2] 14
Figure 2 Tableau impact 3 % sur coût O&M 15
Figure 3: Calcul du coût du kWh du secteur éolien [6] 16
Figure 4 Classification des types de maintenance (J. Ribrant 2006) 17
Figure 5 Evolution du taux de panne en fonction de l'âge de la pièce [8] 18
Figure 6 Interaction des différentes maintenances dans l'évolution des mécanismes de dégradation [9] . 19
Figure 7 Comparaison des types de maintenance préventive et corrective 19
Figure 8 Extrait de tableau d'indicateurs de performance des parcs 21
Figure 9 Principe de l'OMCE et de sa construction par blocs 21
Figure 10 Black box Mecal 22
Figure 11 Modèle conceptuel MECAL 23
Figure 12 Modèle de classes UML 24
Figure 13 Description d'un processus O&M dans la méthode OMF 26
Figure 14 Fault detection system 27
Figure 15 Compromis entre coût de défaillance et coût de maintenance 28
Figure 16 Algorithme fonctionnel d'un agent cognitif 32
Figure 17 Architecture d'une organisation d'agents avec un broker 34
Figure 18 Approche distribuée 34
Figure 19 Approche hybride 35
Figure 20 Ontologie et les tops concepts 44
Figure 21 Top concept Equipement 45
Figure 22 Top concept Indicateurs 46
Figure 23 Top concept Maintenance 46
Figure 24 Top Concept production issue des équipements 47
Figure 25 montre une courbe de puissance d'une éolienne de 3000 kW. 51
Figure 26 Différents temps qui composent la gestion d'une panne 53
Figure 27 Composition du coût O&M 56
Figure 28 Ratios et temps 67
Figure 29 De la fonction Coût à la disponibilité financière 69
Figure 30Sources de données de PROMEEO 72
Figure 31 Sous-système TCHEX 73
Figure 32 Cas d'utilisation TCHEX 74
Figure 33 Diagramme d'activités TCHEX 75
Figure 34 Cas d'utilisation TAROM 77
Figure 35 Diagramme d'activités SOREM 78
Figure 36 Cas d'utilisation de SOREM 79
Figure 37 Diagramme d'activités SOREM 80
Figure 38 Sous système SYPOM 80
Figure 39 Diagramme d'activités SYPOM 81
Figure 40 Agents et objets dans notre système 82
Figure 41 Description générale d'un agent 85
Figure 42 Entrées et sorties du système 90

Figure 43 Périmètre des utilisateurs 90
Figure 44 Modèle Objet de PROMEEO 94
Figure 45 source de données de l'outil PROMEEO 95
Figure 46 Sources de données de production 96
Figure 47 Interaction avec l'outil d'analyse Xwind 97
Figure 48 Interaction entre le SCADA Kerwin et l'outil Xwind 98
Figure 49 Interaction avec la gestion des pièces 98
Figure 50 Données sur les contrats de prestation 99
Figure 51 Interaction entre l'outil Saturne et Promeeo 100

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à l'endroit des rapporteurs de la thèse Alassane NDIAYE et Yann POLLET qui ont accepté de lire et de rapporter cette thèse.

Je remercie Philippe Alexandre, le directeur DEMSI[1] pour m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse et pour m'avoir guidé tout au long au sein de la Compagnie du Vent (LCV). Sa confiance et sa vision de la problématique de thèse m'ont aidé dans la réalisation de ce travail durant les trois ans.

J'éprouve une grande reconnaissance envers Mhamed ITMI, mon directeur de thèse, qui n'a pas ménagé ses efforts tout au long de cette thèse. Son expérience, sa patience et sa compréhension ont été des facteurs encourageants pour mener à bien cette thèse.

Je remercie Carolina PENIN et Alain CARDON pour leurs suivis et leurs implications dans les travaux tout au long de ces trois ans. J'adresse mes remerciements aux membres de l'équipe et au directeur du service d'exploitation et de maintenance de LCV qui ont se sont rendus disponibles pour partager leur expérience.

Je remercie l'ensemble du personnel de La Compagnie du Vent pour le climat sympathique dans lequel ils m'ont permis de travailler.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à deux anciens thésards, Fatma CHAMEIKH et Denis ROUSSEL, qui malgré leurs occupations respectives m'ont témoigné leur solidarité.

Mes remerciements s'adressent aussi à mes collègues de la DEMSI et de la DSI pour leur sympathie, leur soutien et leur participation de près ou de loin dans la réalisation du projet de thèse.

Je voudrais dire merci à mes parents, toute ma famille, mes amis sincères et tous mes proches toujours présents à mes côtés pour leur soutien indéfectible et toute la joie qu'ils m'ont procurée tout au long de ces années passées.

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes ces personnes car ce manuscrit est le fruit d'apports constants, de discussions et d'expériences partagées. Ce sont toutes ces petites complicités, ces attentions discrètes parfois ces fous rires qui ont façonné et permis d'aboutir à ce travail. Merci !

[1] Direction Etudes, mesures et Systèmes innovants

Résumé

L'énergie électrique issue des technologies vertes est en plein essor dans le monde depuis les années 1990. L'énergie éolienne, une des technologies vertes les plus prisées, fait face à cette croissance rapide et à une concurrence accrue entre exploitants. Au regard du nombre croissant de projets de parcs, les exploitants éoliens doivent utiliser des outils d'analyse de leurs parcs pour gagner en efficacité et optimiser leurs budgets. Pour suivre le fonctionnement de leurs parcs, ils utilisent différents outils. Il existe des CMS (Condition Monitoring System) qui donnent un état de fonctionnement du parc.

Le projet de thèse et la plateforme qui en résulte PROMEEO (Plateforme de Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et de l'Exploitation des parcs Eoliens Offshore) s'inscrit dans une volonté de développer un outil qui permet de simuler l'efficacité d'une stratégie de maintenance à travers plusieurs critères. Chaque stratégie de maintenance vise à maximiser la disponibilité et la productivité des parcs éoliens et à réduire leurs coûts de maintenance. Les objectifs du projet visent à optimiser le processus de production des aérogénérateurs en mer ainsi qu'à développer une plateforme logicielle pour le pilotage et la planification de l'exploitation et de la maintenance des parcs éoliens en mer. A travers le travail autour de la plateforme PROMEEO, la Compagnie du Vent affiche l'ambition de se démarquer des autres exploitants en simulant l'efficacité de la politique de maintenance sur un parc. Cette efficacité est vérifiée, non pas en termes de disponibilité, mais en fonction de différents indicateurs de rentabilité liées aux parcs. Pour construire cette plateforme, nous avons bâti une ontologie « métier » destinée à clarifier les connaissances importantes de l'O&M (« Optimization & Maintenance ») sous forme de concepts reliés entre eux.

L'optimisation de la maintenance industrielle peut revêtir différents aspects suivant les objectifs fixés par l'exploitant industriel. L'objectif le plus courant est la réduction des arrêts et des pannes ; elle assure une disponibilité élevée de l'équipement. Nous allons plus loin en nous posant la question de l'efficience des coûts de maintenance et de la rentabilité. La réponse à cette question est donnée par les résultats d'une fonction avec une plateforme de simulation basée sur les systèmes multiagents. Le choix du paradigme Agent est motivé par le fait que les systèmes multiagent (SMA) sont utilisés à d'autres fins de simulation et ils garantissent une forme de souplesse quant à l'évolution du contexte métier.

Ainsi, cette thèse est la combinaison de deux champs de recherche extrêmement complexes pour répondre à une problématique industrielle d'un exploitant éolien.

Introduction générale

L'essor des Energies Renouvelables a mis en lumière une problématique à laquelle font face les industriels de ce secteur : la maintenance de leurs équipements. Cette thèse se situe dans le contexte de la maintenance de parcs éoliens terrestres. Son objectif est de répondre à une problématique d'optimisation du processus de la maintenance pour un exploitant de parcs éoliens. Optimiser ce processus équivaut à d'abord identifier prioritairement les critères qui importent pour un exploitant éolien dans le choix d'une stratégie de maintenance. A lumière des travaux existants, nous avons choisi d'aborder la problématique d'optimisation par l'angle financier. En effet, pour l'industriel, les contraintes financières et la rentabilité des parcs prédominent dans l'établissement et le suivi d'un processus de maintenance. Pour répondre à cette problématique, nous avons identifié un macro indicateur financier la « Fonction coût » (FC) sur lequel nous basons l'outil de PROMEEO. La priorité d'un exploitant du parc éolien, hormis le bon fonctionnement de son parc, est de produire le maximum d'énergie possible. Cette production maximisée doit être réalisée en réduisant, le plus possible, ses coûts de maintenance. Cette priorité est traduite dans la Fonction Coût qui synthétise cette vision de la maintenance que nous avons formalisée dans cette thèse. Elle représente pour nous l'indicateur financier qui pilote le choix de l'exploitant sur la maintenance de ses parcs éoliens. Cet indicateur est directement lié à l'exploitation des sites éoliens. En déclinant la FC en plusieurs sous-indicateurs, nous avons modélisé un système destiné à l'estimation de cette FC et à l'amélioration de la prise de décision en matière de stratégie de maintenance.

Cette approche de représentation des connaissances autour de la FC se traduit au sein d'une ontologie de domaine propre à LCV. Cette ontologie constitue le point de départ d'une méthode de travail qui implique deux champs théoriques à savoir : la Maintenance d'équipement industriel et les Systèmes multiagents. Afin de parvenir à l'objectif d'optimisation de la maintenance des parcs éoliens, nous avons implémenté des règles d'organisation d'un Système Multiagent (SMA). Les SMA sont des cas particuliers de systèmes complexes, souvent définis comme un ensemble macroscopique complexe de micro structures relativement similaires et partiellement connectées. Cet ensemble est formé dans le but de s'adapter à un environnement changeant. La plupart des méthodes de construction de systèmes multiagents (SMA) prennent pour toile de fond les techniques de modélisation orientées « objets » ou s'appuient sur les techniques de construction des systèmes à base de connaissances (SBDC), des ontologies par exemple. Dans le modèle de système multiagent que nous avons construit à partir de l'ontologie, nous sommes partis des concepts d'ontologie en les réifiant dans l'environnement sous la forme d'objets ou d'agents autonomes. Ce modèle multiagent est le squelette de la plateforme PROMEEO[2] que nous avons construite. Cette plateforme se différencie principalement par l'utilisation d'indicateurs financiers reliés à la FC. Dans le secteur de l'éolien, différents types de logiciels destinés à faciliter et à optimiser la maintenance des parcs éoliens sont utilisés par les exploitants. On distingue les systèmes de surveillance de type SCADA (système d'acquisition et de contrôle de données, les systèmes de type GMAO (gestion de maintenance assistée par ordinateur) et les systèmes de surveillance de type CMS (Condition Monitoring System). Tous ces outils sont liés aux aspects techniques de l'équipement ou à l'organisation de la maintenance. Par exemple les CMS sont des outils qui indiquent l'état des équipements afin de prévenir les pannes avant qu'elles ne surviennent. Ils sont largement plébiscités dans des industries comme celles du papier ou de

[2] Plateforme de Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et Exploitation des parcs Éoliens Onshores

l'aéronautique. Ils connaissent un succès croissant avec une amélioration constante mails ils ne constituent pas de réels systèmes d'optimisation de la maintenance.

Notre travail consiste à travailler sur ce dernier type d'outil qui permettrait à l'exploitant éolien, LCV en l'occurrence, d'accroître l'efficience de sa stratégie de maintenance selon les contraintes de l'environnement et les ressources. L'efficience, mieux que l'efficacité, permet de rationaliser les ressources à disposition. Un des défis que devrait relever un tel outil est d'accéder à des volumes importants de données situées dans plusieurs sources hétérogènes et distribuées. Ce défi nécessite à la phase de conception, une réflexion sur une méthode d'intégration des multiples sources de connaissances hétérogènes afin de fournir une valeur ajoutée. De plus, les nouvelles réglementations du marché pour la production et la vente d'énergies renouvelables incitent les exploitants à améliorer le coût de production du kWh. Le décret du 28 Mai 2016 relatif aux entreprises du marché de l'électricité impose de nouveaux modes de vente de l'énergie aux gestionnaires de réseaux électriques. Ce décret accroît la concurrence dans ce secteur notamment sur le tarif de rachat de l'électricité. Dans le cadre juridique précédent, le tarif de rachat de l'électricité était fixé à l'avance et réévalué chaque année ; aujourd'hui, le marché évolue vers un tarif flexible avec un complément de rémunération de l'Etat. Globalement, le secteur tend vers une libéralisation complète, de sorte qu'à terme, le prix de vente soit une valeur « équilibre » entre l'offre et la demande d'électricité issue des énergies renouvelables (ENR). La tendance est donc à une accélération de compétitivité au sein de la filière éolienne. Ce regain de compétitivité passe par une remise en question de la chaîne complète de production de l'électricité des parcs éoliens : de l'installation des parcs jusqu'au stockage de l'énergie avant la mise sur le réseau en passant par l'optimisation de la maintenance des éoliennes.

Notre réflexion a consisté à confronter la maintenance à son but initial qui est de maximiser la rentabilité du parc en dépassant la notion de disponibilité, à définir la stratégie de maintenance optimale suivant ses prévisions de production et pannes et à évaluer cette stratégie avec les indicateurs adéquats. Cette stratégie qui n'est peut-être pas forcément la meilleure au sens opérationnel, revêt cependant un caractère plus global au sens où elle permet au parc d'être compétitif. Elle permet de garantir à l'exploitant la pérennité de son parc par la maîtrise de ses gains et l'anticipation de ses pertes.

Cette thèse s'articule autour de trois chapitres : dans le premier, nous présentons le contexte de l'éolien et les méthodes d'optimisation de la maintenance. Cette partie est suivie d'un état de l'art succinct sur les systèmes multiagents et l'utilisation des ontologies dans le cadre d'un SMA.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les contributions issues de nos réflexions : d'abord dans une ontologie descriptive de la maintenance (du point de vue l'exploitant) déclinée à partir du macro-indicateur « Fonction Coût ». Ce « macro indicateur » présente l'avantage d'être un « compromis » entre la vision technique des équipements à maintenir et la vision financière. Il s'agit d'une ontologie descriptive d'un ensemble d'indicateurs permettant d'estimer la rentabilité d'un parc et d'un SMA issu de la description de ce contexte. A partir de cette ontologie de domaine, nous avons identifié les concepts qui peuvent être réifiés sous forme d'agents autonomes ou d'objets dans le système multiagent. La plateforme qui en résulte PROMEEO permettra de tester plusieurs stratégies de maintenance selon plusieurs cas de figures de fonctionnement d'un parc. Les résultats de ces tests permettront de choisir une stratégie qui maximise les objectifs de l'exploitant.

Enfin, dans le troisième et dernier chapitre, après un bilan de la plateforme que nous avons développée, nous abordons les perspectives d'amélioration des agents face à l'évolution de l'environnement du contexte chez l'exploitant.

Chapitre 1. Contexte de l'éolien, état de l'art des champs de recherche et problématique industrielle

La Compagnie du vent (Engie Green), société pionnière du secteur éolien a été créée en 1989. Elle fût successivement autonome, puis filiale partielle et aujourd'hui filiale à part entière du groupe ENGIE, troisième groupe mondiale de l'énergie (hors pétrole). Elle s'est diversifiée dans plusieurs types d'énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque. Ses principales missions sont liées à la recherche de sites, la concertation avec les publics concernés, le développement des projets, leur financement, la construction des installations et leur exploitation. L'exploitation de ses parcs éoliens revêt une importance particulière car elle contribue à l'expansion et au développement de nouveaux projets. Elle permet d'assurer des rentrées régulières de fonds financiers et reste un pilier stratégique dans le secteur de l'éolien et dans d'autres industries.

La maintenance est une fonction à part entière du secteur industriel. Elle prend une part importante dans la stratégie de développement quelle que soit sa taille de l'industrie. La stratégie de maintenance constitue un facteur clé de réussite lorsqu'elle est bien structurée et intégrée dans la stratégie globale de l'entreprise. Cet état de l'art reprend les articles principaux de chacun des domaines de recherche de la thèse. En gardant en mémoire l'objectif initial de la thèse, nous avons relevé les méthodes et outils connexes à l'approche d'optimisation des processus de maintenance telle qu'elle est pensée dans le contexte habituel de l'exploitant. Avant d'aborder notre approche de l'optimisation de la maintenance, nous allons décrire dans ce chapitre les concepts clés de la maintenance ainsi et que les principaux outils utilisés dans ce domaine. La deuxième partie est consacrée aux Systèmes multiagents et à l'ontologie de domaine.

Partie 1 : La maintenance et le contexte de l'éolien

1.1 Le contexte de l'éolien

L'exploitation industrielle peut se définir comme l'ensemble des processus et des outils utilisés pour produire un bien dans une industrie. C'est un terme qui englobe les actions permettant de créer de la valeur ajoutée à partir de l'infrastructure industrielle. Dans le domaine de l'éolien, ce sont toutes les actions qui ont pour finalité de permettre aux éoliennes de produire de l'électricité de manière optimale. Les notions d'exploitation et de maintenance sont étroitement liées car la deuxième est le prolongement de l'autre dans le cycle de production. Elles sont souvent concentrées dans le même service pour un meilleur suivi. L'activité de maintenance se définit comme l'ensemble des actions destinées à maintenir en état de fonctionnement un bien. C'est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé [1]. Dans le domaine de l'éolien, la maintenance représente environ le tiers des dépenses de gestion des parcs. Elle a pour objectif :

- D'établir le diagnostic des installations et infrastructures destinées à l'exploitation
- De remettre l'infrastructure en état de fonctionnement si nécessaire et maximiser sa disponibilité
- De garantir la sécurité des personnes intervenant directement sur l'infrastructure.
- De réduire au maximum le ratio ($\frac{dépenses\ de\ maintenance}{Valeur\ du\ service\ rendu}$).

Dans le cas de l'industrie éolienne, la maintenance représente un coût important qui influe énormément sur le coût d'exploitation des parcs. Chaque éolienne a une durée de vie approximative de 20 à 25 ans. Durant cette période, l'exploitant met en place une série d'opérations destinées à garantir la disponibilité

des éoliennes et leur bon fonctionnement. Cette disponibilité est déterminée en amont dans le contrat d'exploitation. Ce taux est généralement situé entre 80 et 95% en fonction des parcs.

C'est le vent qui pilote la production du parc éolien ; il a aussi un fort impact sur l'ensemble des arrêts et des pannes sur les éoliennes. Les données de vent, recueillies avant la construction du parc, permettent de définir le productible du parc avant sa mise en exploitation ; le productible peut être aussi réévalué pendant la phase d'exploitation.

La période de garantie intervient lors des deux premières années de fonctionnement du parc. Pendant cette période, le parc éolien est maintenu par le constructeur sauf pour les pannes exceptionnelles. Les données relatives aux arrêts et aux pannes interviennent après quelques années de fonctionnement lorsque l'exploitant sort de la « garantie constructeur ». Après la sortie de garantie, l'exploitant dispose de meilleures informations sur les pannes et peut optimiser son budget de maintenance suivant les risques de pannes observés. Comme dans les autres secteurs industriels, l'industrie éolienne a donné une place importante à la maintenance parce qu'elle a cerné les capacités de marge bénéficiaire qu'une bonne stratégie de maintenance peut lui permettre de réaliser.

Les coûts de maintenance ou O&M sont de plusieurs types. L'importance de chacun des coûts de maintenance dans le coût global d'O&M dans l'éolien terrestre est matérialisée dans la Figure 1 Répartition des postes de coûts O&M . On remarque que de nombreuses parties vont être influencées par les stratégies de maintenance choisies.

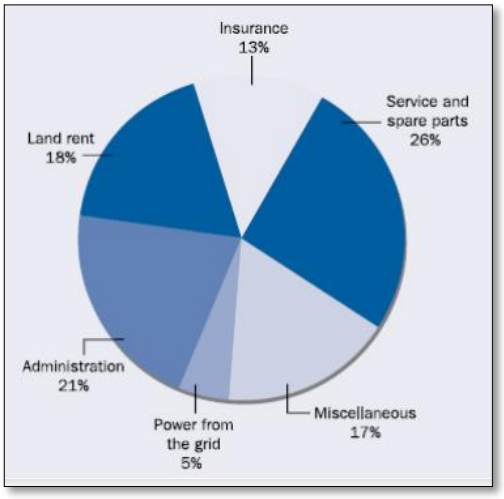


Figure 1 Répartition des postes de coûts O&M [2]

Selon l'American Wind Energy (AWE), le coût de l'O&M évolue tout au long du cycle de vie d'un parc éolien [3] et participe dès le départ à 10% du prix du kWh. En fin de vie, il est estimé que, pour les parcs éoliens terrestre, le coût de maintenance peut atteindre jusqu'à 20 à 25% du coût total du kWh produit. Pour matérialiser l'impact qu'une variation du coût de kWh peut avoir sur un parc éolien. [3]. En fin de vie, ce coût peut atteindre jusqu'à 25% du coût total du kWh. La réduction des coûts O&M de 0,18% entraînerait une réduction de 3% du coût total du kWh.

3% de baisse du coût du kWh équivalent typiquement à	10 Km de réduction de la longueur du raccordement
	81 heures de fonctionnement supplémentaires
	6,54 m de la hauteur de la tour supplémentaires
	0,077 m/s la vitesse du vent supplémentaires
	0,56% de réduction du taux d'intérêt
	0,18% de réduction des coûts d'O&M
	21,2% de réduction du coût d'investissement du mât
	26% de réduction du coût d'investissement du multiplicateur
	30,1% de réduction du coût d'investissement des pales du rotor
	38,5% de réduction du coût d'investissement de connexion au réseau
	40,5% de réduction du coût d'investissement de la génératrice
	69,8% de réduction du coût d'investissement de la fondation

Figure 2 Tableau impact 3 % sur coût O&M

Ces chiffres (Figure 2 Tableau impact 3 % sur coût O&M) sont valables pour les parcs terrestres. Les prévisions concernant l'éolien offshore sont encore plus importantes soulignant de plus grandes contraintes. En effet**, les parcs offshores sont confrontés à des difficultés supplémentaires** (météo : vent et état de mer, logistique de transport, éloignement des côtes et donc des techniciens, résistance à ces conditions, réglementation en mer). Les prévisions montrent qu'aujourd'hui, en offshore, la part de l'O&M dans le prix du kWh pourrait facilement atteindre les 25% [4].

Le métier d'exploitant éolien : cas de « La Compagnie du vent » (LCV)

LCV est un exploitant de parcs éoliens. Elle construit des parcs, revend l'électricité et assure la maintenance des parcs. L'énergie éolienne pose quelques défis en termes d'exploitation et de maintenance en termes d'amélioration des processus de maintenance notamment parce que la matière première, le vent, est une donnée fatale pour l'exploitant. Les connaissances relatives à l'exploitation et la maintenance des parcs relèvent principalement de l'ingénierie technique :

- Une partie de l'expérience acquise par LCV a été matérialisée par des arbres de maintenance qui décrivent des processus de prise en charge de pannes ou d'anomalies constatées sur les éoliennes. Ces arbres correspondent à quelques alarmes bien déterminées et sont utilisés par les chargés d'exploitation lorsque le prestataire chargé de la maintenance est bloqué et ne dispose pas de l'expertise nécessaire pour résoudre la panne.
- La supervision des parcs est réalisée à l'aide de capteurs sur les éoliennes. Ces informations transitent par le logiciel de télégestion KERWIN (logiciel de télégestion, système d'acquisition des données SCADA[3]). On y voit les différents parcs, le nombre de machines, leurs données techniques, la température des composants, l'âge des différentes maintenances.
- Le système de télégestion permet également à LCV d'arrêter à distance une machine en cas d'incident. Le logiciel KERWIN connecté au parc fournit une multitude d'alarmes dont une grande partie (parmi les alarmes mineures) n'est pas utilisée ; ces alarmes sont catégorisées en trois types (par gravité croissante) : mineures, signalisations et critiques.

[3] Supervisory Control and Data Acquisition

LCV dispose d'un logiciel de GMAO (gestion de la maintenance assistée par ordinateur) qui lui permet une gestion des stocks quasi instantanée. Il dispose aussi d'une panoplie d'indicateurs relative aux pièces utilisées et aux seuils de remplacement. Une étude est effectuée tous les ans pour équilibrer les besoins en stock. Dès qu'une pièce est sortie du stock, elle est recommandée. Pour les pièces importantes difficilement stockables, les commandes sont faites directement auprès des fournisseurs. Aujourd'hui, la société est globalement focalisée sur la gestion courante des pannes pour maintenir un taux de disponibilité élevé.

Concernant le diagnostic des pannes, les différentes procédures de pannes et arbre de diagnostics dépendent du modèle de turbine. Chaque constructeur fournit un manuel d'exploitation et de maintenance qui est disponible à la DEX. A partir de l'expérience acquise sur les alarmes, des arbres de diagnostics, sous formes de logigrammes, ont été créés afin de pouvoir réaliser les diagnostics sous forme de questions tests.

1.2 L'O&M : les types de maintenance

La maintenance est l'un des soutiens principaux de la production, son principal « client » [5]. Elle fait partie des axes de développement d'une entreprise. Elle représente environ 10,4% dans l'industrie automobile, 11,6% dans l'industrie pétrolière. Pour l'éolien terrestre, le coût de la maintenance est estimé à 1,5% du prix de la machine durant les premières années de fonctionnement, 3% pour les dernières années. Les coûts de maintenance sont plus élevés pour l'éolien en mer. Ils s'élèvent approximativement à 25,5 €/MW soit 14% du coût d'un MW (selon une étude du cabinet d'audit KPMG de 2010). En se focalisant sur la rentabilité économique, un des critères les plus importants reste le prix de l'énergie. Il tient compte du prix d'investissement initial mais aussi de l'exploitation et de la maintenance comme en témoigne la formule ci-contre qui permet de le calculer.

$$COE = \frac{ICC * FCR + LRC}{AEP_{NET}} + O\,\&\,M$$

$$AEP_{NET} = AEP_{GROSS} * Availability * (1 - Loss)$$

COE	Cost of Energy ($/kWh)
ICC	Initial Capital Cost ($)
FCR	Fixed Charge Rate (%/year)
LRC	Levelized Replacement Cost ($/year)
O&M	Operations and Maintenance Costs ($/kWh)
AEP	Annual Energy Production (kWh/year)

Figure 3: Calcul du coût du kWh du secteur éolien [6]

Dans les titres suivants, nous recensons les différents types de maintenance, les différentes méthodes et stratégies de maintenance issues de différents domaines industriels et les outils développés dans la communauté de recherche.

1.2.1. *Les différents types de maintenance*

Il existe plusieurs types de maintenance qui peuvent être classés comme ci-dessous (Cf. Figure 4 Classification des types de maintenance (J. Ribrant 2006))

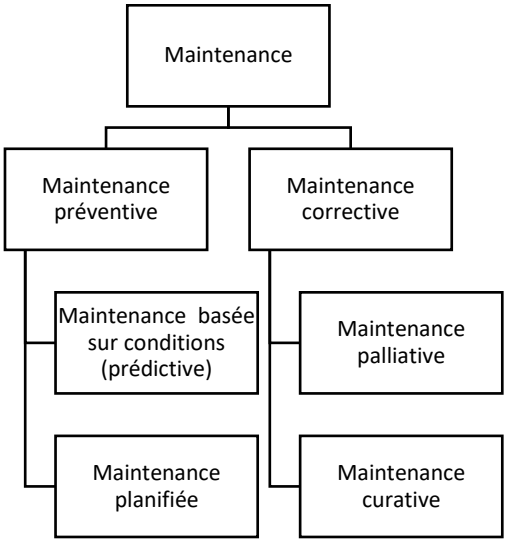


Figure 4 Classification des types de maintenance (J. Ribrant 2006)

1.2.1.1. Maintenance corrective

Elle se définit comme un type de maintenance faite après un diagnostic de panne et dont le but est de remettre un équipement en état de fonctionnement [7]. C'est une stratégie qui se traduit par un avantage certain relatif à l'utilisation maximale des composants de l'éolienne ; en effet, les équipements ne sont remplacés ou réparés qu'en cas de panne. Aussi appelée la « Breakdown » stratégie, elle est souvent utilisée à la suite d'une panne entraînant un arrêt de l'équipement. Or, c'est pendant cette période de vent fort que l'éolienne se doit d'être disponible à la production. L'arrêt de l'éolienne pendant la durée de maintenance corrective entraîne une perte de production conséquente. L'unique avantage d'une maintenance corrective est qu'elle permet d'utiliser l'équipement jusqu'à épuisement.

1.2.1.2. Maintenance préventive

Elle est aussi appelée maintenance prévisionnelle. Elle a pour objectif de réduire les pannes en les anticipant. Les interventions sont exécutées après une durée bien définie (annuelle, semestrielle etc.), après l'atteinte ou le dépassement d'un seuil ou après l'apparition d'un signal. Ce type de maintenance a pour objectif de réduire le risque éventuel de panne. Elle entre dans une logique d'optimisation des pannes et de maximisation de la disponibilité en période de panne. Idéalement, pour un parc éolien, ce type de maintenance est réalisé en période de vent faible pour garantir une disponibilité pendant les périodes de vents forts.

1.2.1.3. Maintenance prédictive

Elle est basée sur l'analyse de l'état de l'éolienne. L'identification de certains signes précurseurs est primordiale dans ce type de maintenance. Dans le domaine éolien, différents critères peuvent être analysés:

- L'analyse des huiles *:* les éoliennes sont des machines tournantes qui ont de forts besoins en lubrification. L'analyse des huiles permet de détecter des anomalies telles que l'usure par abrasion, la contamination par des particules internes ou externes à l'éolienne.
- L'analyse vibratoire : les contraintes mécaniques que subissent les pièces rotatives des éoliennes sont étudiées avec précision afin de prévenir de tout risque et tout arrêt de la production d'énergie.

Cela va permettre par exemple de prévenir l'exploitant de graves pannes dues aux déséquilibres des lignes d'arbres, à la dégradation des accouplements ou encore aux usures des roulements.

- La thermographie : en utilisant cette méthode, on peut identifier les sources d'énergie infrarouge émises par l'éolienne, effectuer des analyses sans arrêter la machine et à distance, détecter par exemple une surchauffe anormale des éléments mécaniques ou électriques.

1.2.1.4. Maintenance planifiée

Il s'agit d'une maintenance plus défensive destinée à limiter voire à empêcher les défaillances. On court cependant le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles. Ce type de maintenance est planifié sur le calendrier au vu des données fournies par les constructeurs et du retour d'expérience de l'exploitant. Il peut s'agir dans l'éolien : d'ajout d'huile, de réglages de certaines pièces ou remplacement d'appareils dit « consommables » ou de remplacement de pièces.

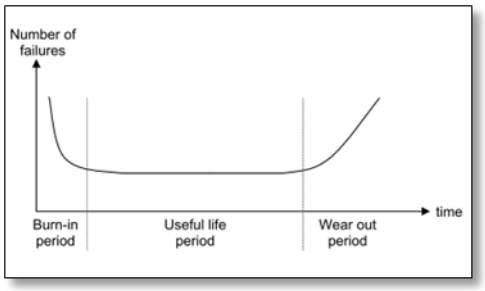


Figure 5 Evolution du taux de panne en fonction de l'âge de la pièce [8]

Comme le montre le schéma ci-dessus, les types de maintenance préventive peuvent s'adapter suivant l'âge de la pièce. En effet, en début et fin de vie, la chance de panne est plus importante sur une pièce. L'adaptation de la maintenance préventive peut se faire en faisant varier le type d'opérations et/ou sa fréquence.

1.2.1.5. Maintenance palliative

On distingue le correctif palliatif (qui apporte une correction temporaire) et le correctif curatif (qui est une réparation pour des effets à long terme). Toutefois, cette maintenance se révèle très coûteuse lorsqu'on se focalise sur les conséquences des défaillances des équipements hautement sollicités. La maintenance palliative sert essentiellement à résoudre un problème technique à court terme. Elle permet de réduire la perte de production. Elle oblige l'exploitant industriel à réaliser une deuxième opération de maintenance pour résoudre le problème de façon définitive. Cette deuxième opération de maintenance peut conduire à une perte de production supplémentaire.

1.2.1.6. La maintenance curative

Elle se distingue de la maintenance corrective parce qu'elle est utilisée pour pallier une panne urgente et remettre l'équipement rapidement en état de marche même s'il fonctionne en mode dégradé.

Utilisée de façon unique, la maintenance curative réduit certes les coûts de maintenance mais elle peut vite dépasser les prévisions et causer d'importants inconvénients liés à la production. A mesure que le parc vieillit, le nombre d'opération de maintenance corrective augmente et engendre des coûts indirects qu'il est difficile d'estimer avant la panne. Ces différents types de maintenance interviennent de différentes manières dans le processus de l'éolienne.

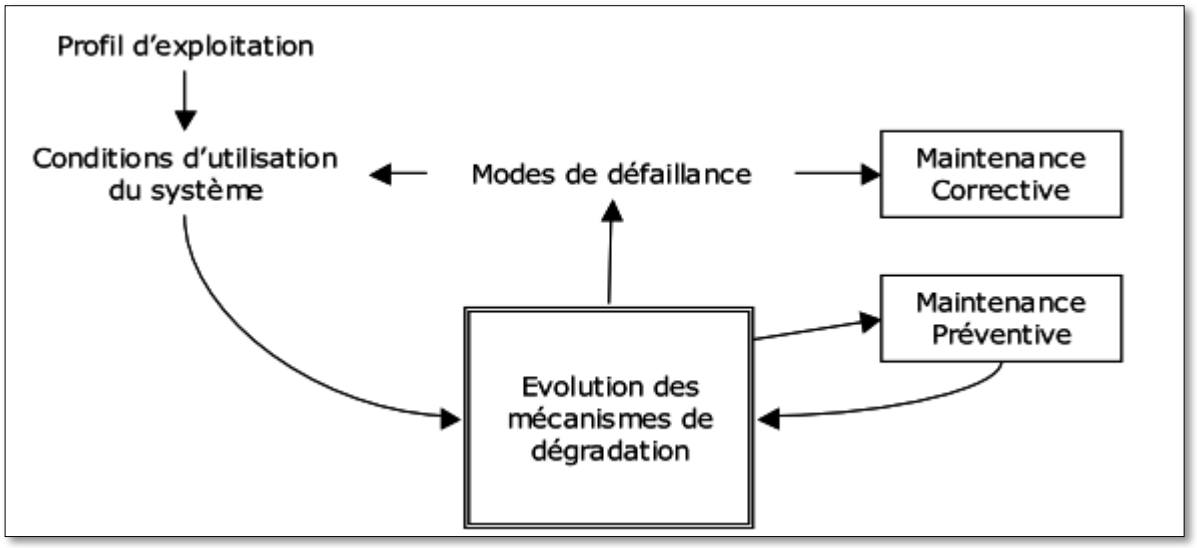


Figure 6 Interaction des différentes maintenances dans l'évolution des mécanismes de dégradation [9]

1.2.1.7. Maintenance hybride

C'est la plus courante. Elle combine les deux types de maintenances : préventives et correctives. Elle consiste à anticiper certaines pannes par le biais d'interventions préventives et à être réactif pour les interventions correctives lorsque les pannes surviennent.

	Correctives	**Préventive**	**Prédictive**
Avantages	Utilisation maximum des pièces. Peu chère à court terme. Investissement dans un outil de télégestion efficace	Perte de production prévue à l'avance Anticipation de la disponibilité	-Utilisation efficiente des pièces. -Disponibilité importante
Inconvénients	Pertes de production élevée ; Gestion difficile des stocks Risque de perte de production	Relativement chère à mettre en place. Les pièces sont parfois sous-utilisées. Utilisation peu efficiente des équipements	Nécessite une base de données d'apprentissage constant sur l'évolution technique des turbines. Lourd à mettre en œuvre à cause du nombre élevée de modèles.

Figure 7 Comparaison des types de maintenance préventive et corrective

1.3 Les outils et logiciels utilisés pour l'optimisation de la maintenance

Dans le cadre de l'éolien, plusieurs outils ont été développés par des laboratoires et certaines entreprises pour suivre et optimiser la maintenance des parcs éoliens. Chacun de ces outils adopte un angle de la maintenance. Ils peuvent être orientés soit sur un sous domaine de l'O&M, par exemple la gestion des pièces soit sur l'ensemble de la maintenance (pièces, ressources humaines, installation.).

1.3.1. *L'application SINBAD développée par la société Acte industries*

Prédire les défaillances est l'ambition du projet SINBAD [10] ; l'outil s'appuie sur l'idée de connaître à un instant t le comportement d'une éolienne. Ce projet est né d'une recommandation de « 20M » un organisme franco-britannique dédié à l'éolien marin (offshore) pour créer un outil numérique permettant la visualisation de l'arborescence d'éoliennes Offshores [11].

Le développement de cet outil résulte d'un partenariat entre Acte industrie et l'Université du Havre. L'objectif de l'outil est d'anticiper les défaillances et d'ordonnancer les interventions de maintenance. L'outil fournit aussi un retour d'expérience. Le consortium Acte Industries dispose déjà de l'expérience de deux outils :

- Le logiciel Navi' Maint : qui permet d'organiser la maintenance et la gestion réglementaire de navires et de structures connexes
- Le logiciel Idrys qui est un outil de visualisation et de retour d'expérience sur les installations industrielles.

SINBAD, résultat d'une collaboration entre le laboratoire de Mathématiques de l'Université, est un outil d'analyse des défaillances : logiciel de visualisation numérique 2D et 3D des défaillances. Il propose des stratégies de maintenance tout en participant à la maîtrise du coût économique des installations. Ce logiciel a fait l'objet d'un prototype pour EDF R&D destiné au suivi des turbines du parc nucléaire d'EDF. L'un des axes d'améliorations a été de préconiser la constitution d'une base de données commune aux exploitants nationaux pour mieux exploiter les retours d'expérience sur les turbines.

1.3.2. *Windfit : un outil d'analyse de la performance.*

La société Sereema fournit un outil de suivi servant à l'optimisation de la performance des éoliennes via une plateforme web. Associée à la maintenance. La technologie sert d'abord à déceler une baisse de performance des éoliens pour initier une maintenance. A partir de boitiers Windfit installés sur les éoliennes, les données d'exploitation du parc sont réunies dans un cloud. Il s'agit principalement de données de vent, données de températures et données de vibration des équipements au sein de l'éolienne.

Les données sont stockées dans un cloud puis interprétées avec des algorithmes de datamining et les résultats sous formes d'indicateurs mis à disposition des exploitants éoliens. Les indicateurs informent l'exploitant sur les écarts relatifs au fonctionnement normal de la machine. C'est donc un outil de comparaison qui utilise l'historique pour estimer le fonctionnement normal de machines à partir des conditions extérieures. Il faut environ entre un et deux ans d'historiques pour obtenir des résultats d'indicateurs cohérents.

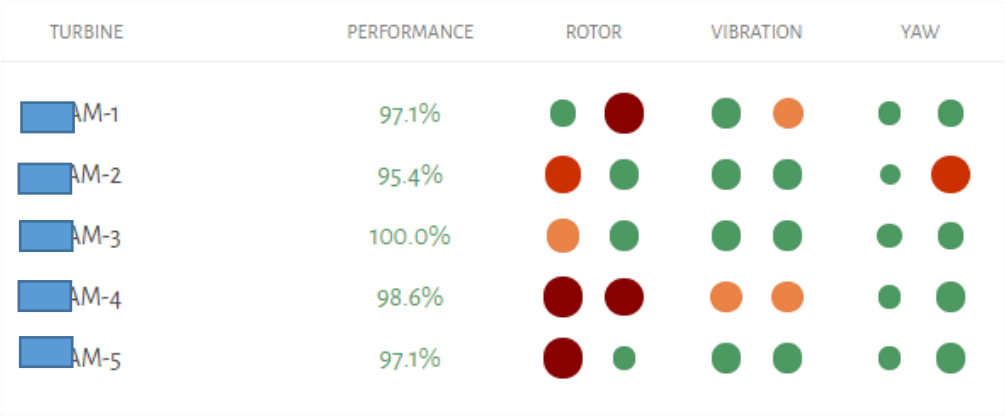


Figure 8 Extrait de tableau d'indicateurs de performance des parcs

Un indice de performance global est calculé pour chaque éolienne ; cet indicateur est déclinable pour trois aspects liés aux équipements : le rotor, le niveau de vibration et le système d'orientation de la nacelle. L'avantage d'un tel système est qu'il alerte sur l'état de la machine et peut déclencher la planification d'une maintenance préventive. Il nécessite toutefois des algorithmes d'apprentissage sur les machines, ce qui peut limiter l'exploitant qui dispose de différents modèles de machine.

1.3.3. *L'OMCE : Opération and Maintenance Cost Estimator*

C'est l'un des modèles de simulation les plus complets commercialisé depuis 2004. Le projet a été initié par un consortium comprenant le constructeur Vestas, Shell Wind Energy, DTU et ECN (Energy Research of the Netherlands) [12]. Il allie trois stratégies de maintenance : corrective, préventive et prédictives pour prédire le coût annuel des opérations de maintenance de parcs. (Onshores et Offshores). En entrée, l'outil basé sur des macros Excel enregistre les fiabilités des composants, les intervenants et les dates d'intervention pour fournir les coûts de maintenance.

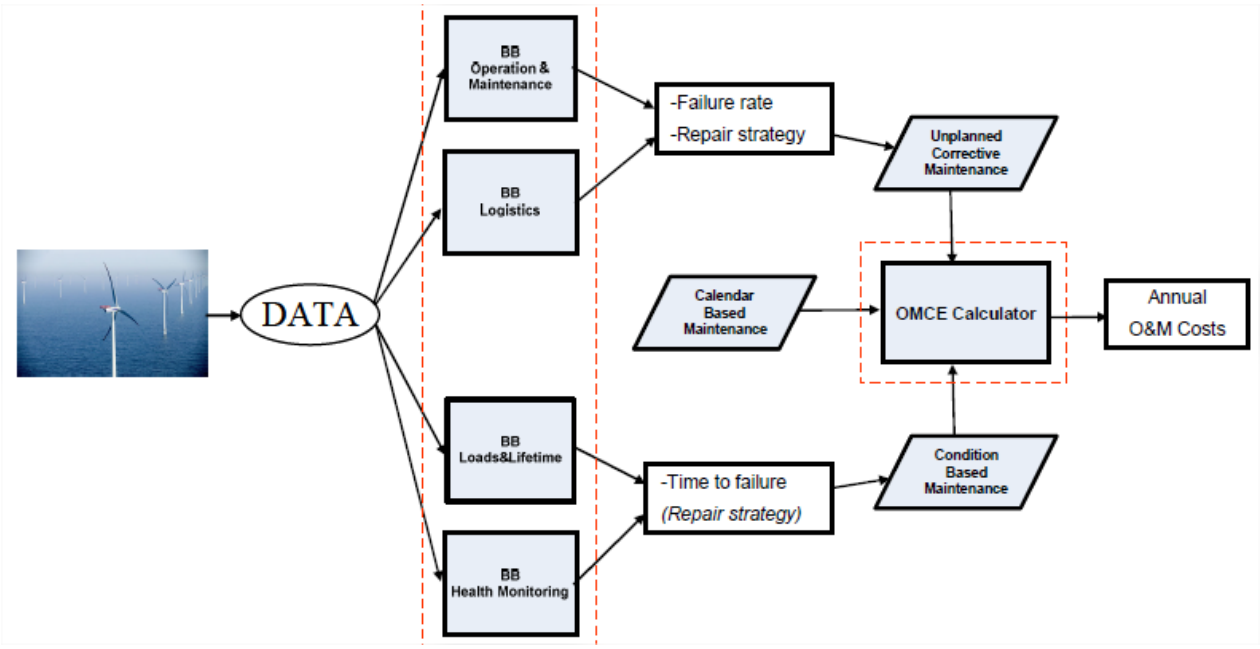


Figure 9 Principe de l'OMCE et de sa construction par blocs

1.3.4. *L'estimateur développé par MECAL*

Il a été développé pour estimer les coûts O&M de parcs éoliens terrestres [2] . Le programme prend en entrées plusieurs informations sur les turbines, les équipes de maintenance et fournit en sorties les différents coûts de maintenance et le temps d'arrêts.

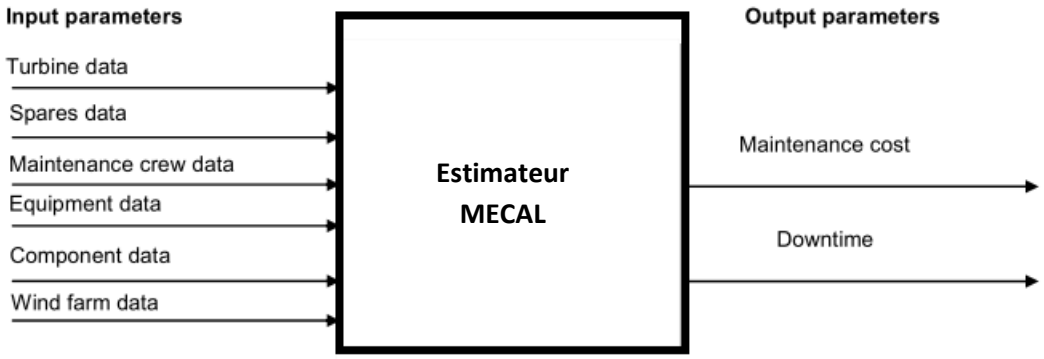


Figure 10 Black box Mecal

Le contexte de la maintenance a été modélisé avec les réseaux de Pétri (Figure 11 Modèle conceptuel MECAL); le modèle obtenu reprend les acteurs et processus utilisés dans la maintenance de parcs terrestres. L'outil fournit aussi un module de simulation basé sur le modèle de Monte-Carlo.

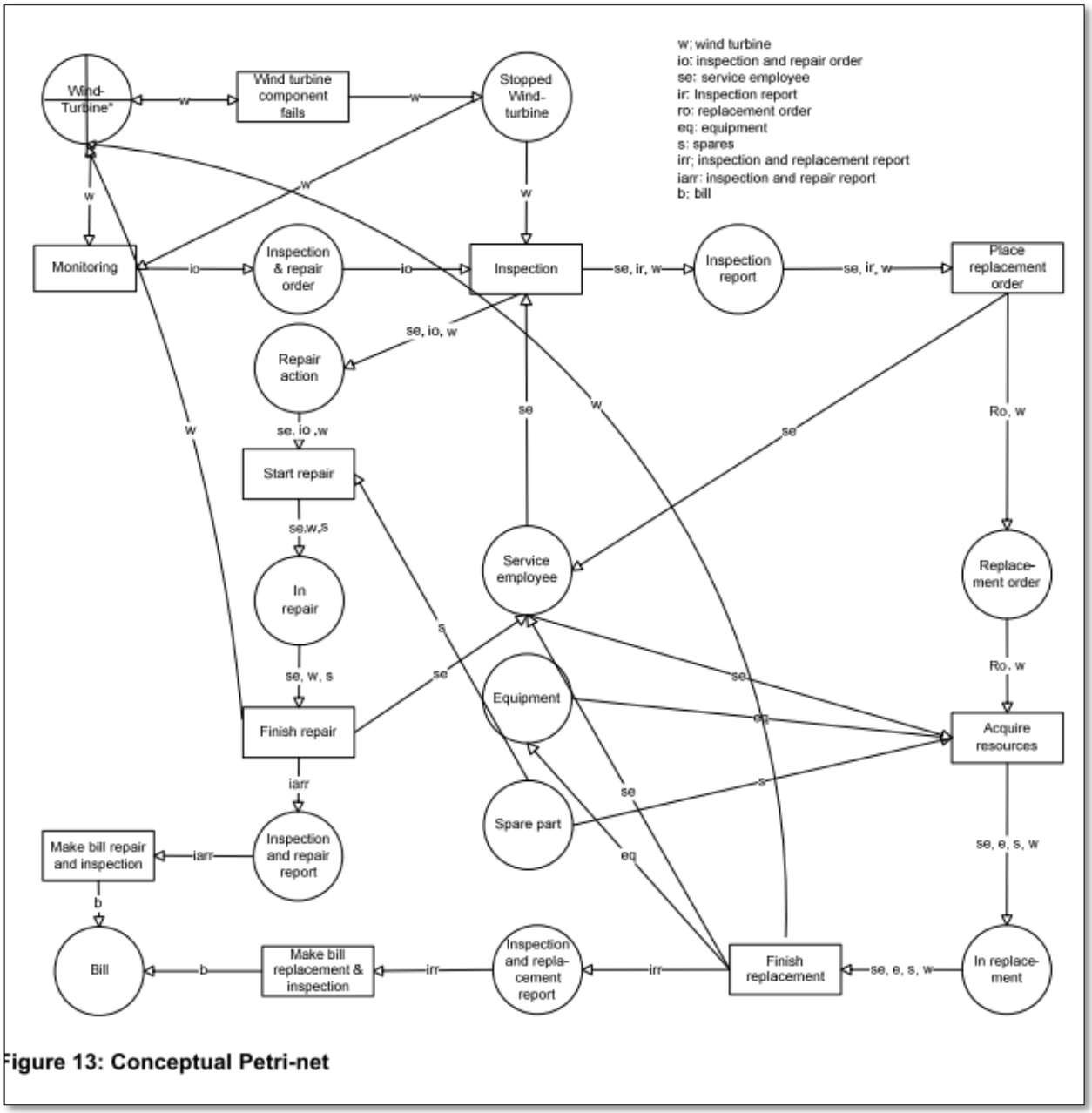


Figure 11 Modèle conceptuel MECAL

En complément du modèle de Réseaux de PETRI, ils ont fourni un modèle de classes UML. Ce modèle permet de créer une base de données et implémenter le modèle de réseau de Pétri.

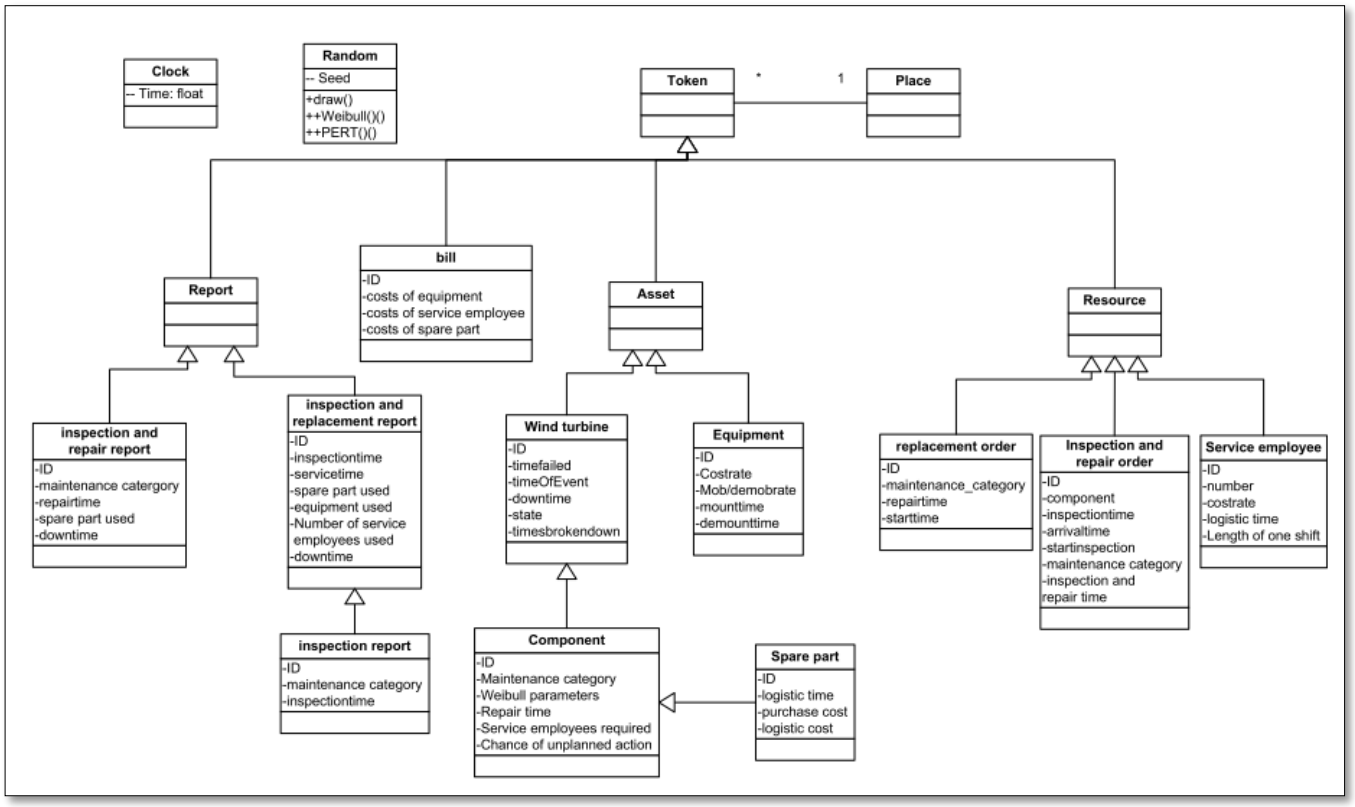


Figure 12 Modèle de classes UML

1.3.5. *Le modèle pour la maintenance d'éoliennes Offshore basé sur les SMA*

Le système propose un modèle basé sur un SMA destiné à la maintenance. Les auteurs [13] ont regroupé les défaillances des éoliennes selon le classement suivant :

- Les pannes sur le système électrique
- Les pannes sur le système d'orientation
- Les défaillances de la boîte à vitesse
- Les pannes sur le système hydraulique
- Les pannes sur les pâles.

Ces derniers ont classé les pannes en trois causes : la météo, les erreurs d'installation, et les problèmes liés à la qualité. Le modèle global est composé de 5 agents :

1. Les agents type éoliennes
2. Les agents type maintenance (préventive systémique, préventive, corrective)
3. Les agents type ressources (ressources humaines et stock.)
4. Les agents type monitoring
5. Les agents type météo.

La plateforme de SMA NetLogo a été utilisée pour le développement du simulateur. Les auteurs ont estimé que la stratégie de maintenance basée sur la maintenance préventive conditionnelle est la plus économique. Durant la période de simulation, 1130 tâches de maintenance ont été exécutées dont 17 maintenances correctives uniquement. Toutefois, cet outil ne prend pas en compte la réalité de

fonctionnement d'un exploitant éolien à savoir la disparité des parcs, des machines et des prestataires de maintenance.

1.4 Les stratégies d'optimisation de la maintenance et les méthodes développées

Les services d'exploitant appliquent différentes stratégies pour maximiser l'utilisation des équipements. Ces stratégies concernent la gestion des pièces ou des modes de prises en charge des interventions.

1.4.1. *La gestion des pièces dans le cadre de la maintenance*

La gestion des rechanges de pièces sur les parcs est liée à la politique de gestion des stocks de l'exploitant. On distingue :

- Les remplacements programmés : ce sont les rechanges systématiques d'un composant après un certain temps d'utilisation. Ils sont issus des maintenances préventives. L'exploitant doit donc disposer de ces pièces aussi souvent que possible.
- Les remplacements non programmés : ils interviennent pour des remplacements de pièces souvent pour des opérations correctives.
- Les rechanges pour remplacements exceptionnels qui sont liés aux pièces :
    - Dont les cycles d'approvisionnement sont longs
    - Qui présentent la même durée de vie équivalente à celle de l'équipement
    - Dont les prix d'achat sont élevés.

On distingue les remplacements basés sur l'âge du composant. Ce modèle prévoit le remplacement des pièces au bout d'une durée T établie en fonction du constructeur et du retour d'expérience de l'exploitant. Le choix de remplacement se fait sur une durée de fonctionnement qui maximiserait l'utilisation de l'équipement. On distingue aussi la maintenance par l'utilisation de modèles conditionnels : ce modèle privilégie la maintenance prédictive à l'aide de moyens d'analyse. Les décisions de maintenance dépendent du niveau de dégradation du système (observé par les différents techniciens ou signalé par les capteurs). L'avantage est qu'il aide à limiter les remises en état inutiles et les interventions correctives. Ce type de maintenance passe par la connaissance du processus de dégradation des composants de l'éolienne.

1.4.2. *Mutualisation du type de maintenance et stratégies opportunistes*

La mutualisation des interventions : Il s'agit de regrouper les équipements qui nécessitent le même type de maintenance. Les dépendances entre les matériels et les relations entre eux définissent ce type de stratégie. Cette approche permet de réaliser plusieurs interventions de maintenance au même moment pour maximiser la disponibilité.

Concernant la stratégie opportuniste de prise en charge appliquée dans l'optique de maximiser la disponibilité des éoliennes, elle est basée sur la prise en compte des circonstances pour réaliser d'autres opérations de maintenance qui n'étaient pas prévues à ce moment :

- L'opportunité liée à une intervention en cours : qui consiste à réaliser plusieurs opérations en une seule. La perte de production est mutualisée sur plusieurs opérations. Par conséquent, elle est globalement réduite comparée à sa valeur si les interventions avaient été effectuées distinctivement.
- L'opportunité d'une opération grâce aux conditions météorologiques.

1.4.3. *Les méthodes développées basées sur la fiabilité des composants*

Les méthodes utilisées sont souvent axées sur la fiabilité des composants. On peut citer :

- **La Méthode OMF (Optimisation basée sur la fiabilité)** [9]

Il s'agit de la technique utilisée aujourd'hui dans le nucléaire et qui pourrait être reprise dans l'éolien. La nécessité d'un niveau de sécurité élevé permanent pourrait être mis en corrélation avec le niveau de disponibilité maximum que l'on désire dans l'éolien. Les grands principes de cette méthode sont basés sur :

  - L'analyse fonctionnelle qui fournit des représentations du fonctionnement des systèmes étudiés.
  - L'analyse de dysfonctionnement et le retour d'expérience
  - La sélection des tâches de maintenances

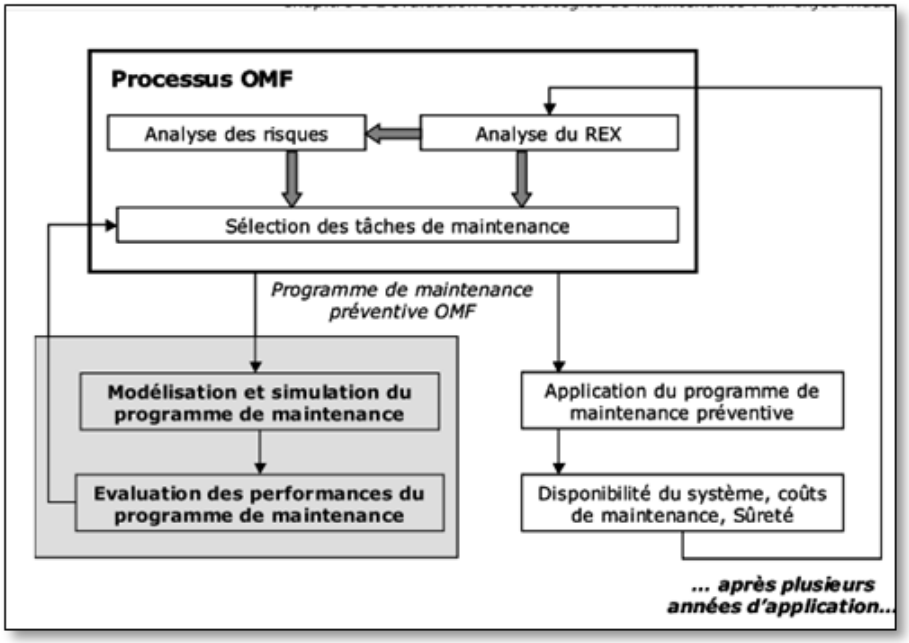


Figure 13 Description d'un processus O&M dans la méthode OMF

Il faut en premier lieu définir les objectifs de maintenance : coût, disponibilité, sécurité etc...

En utilisant les techniques d'analyse des risques, la méthode permet de déterminer les événements indésirables. L'analyse du retour d'expérience permet ensuite d'estimer la fréquence d'apparition. En tenant compte des conséquences fonctionnelles. On sélectionne les défaillances critiques sur lesquelles va s'appliquer la phase de sélection des tâches de maintenance préventive. Ces étapes et leurs contextes sont schématisés dans la description du processus O&M.

- **La Méthode FDI (Fault Detection Isolation) d'Alstom**

Il s'agit d'une méthode pour détecter les besoins d'interventions. Elle est utilisée dans plusieurs domaines et a déjà été utilisée dans l'éolien (notamment sur les différents capteurs dont on voit un exemple sur le schéma ci-dessous). [14]

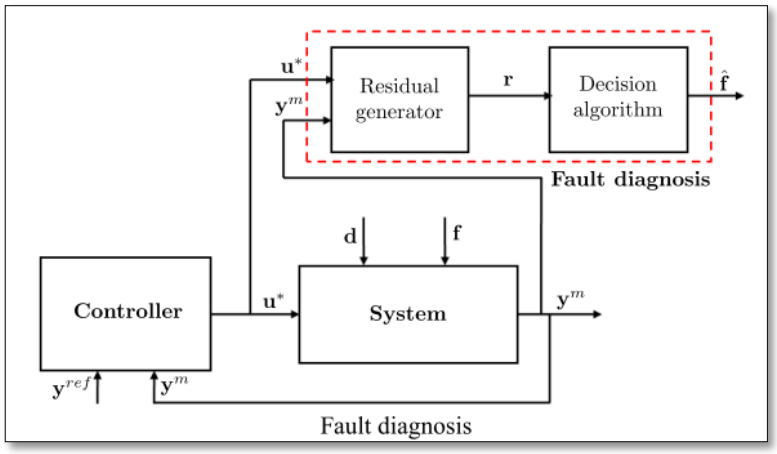


Figure 14 Fault detection system

Ce processus commence par la distinction du défaut (dysfonctionnement qui ne cause pas d'arrêt) de la défaillance (dysfonctionnement entraînant un arrêt). Vient ensuite le classement des différents défauts selon leurs sources, leurs dynamismes (permanent, progressif, brutal) accompagné de la sûreté des diagnostics (sûrs ou probables). Une fois cette classification réalisée, la méthode consiste à détecter les défauts et à les isoler avec un algorithme. Cette méthode peut être vue comme une aide à la décision pour intervenir avant une maintenance corrective qui serait plus coûteuse.

1.5 Conclusion sur l'O&M

Ces différents types de maintenances sont souvent combinés par les exploitants éoliens. Concrètement, l'exploitant éolien effectue une série d'opérations préventives à une période définie et fait face aux pannes avec les opérations correctives. Le coût de cette maintenance varie selon le type : par exemple, on estime que dans l'éolien, la maintenance préventive coûte entre 3et 5€/MW, la maintenance corrective coûte elle entre 5 et 10 €/MWh**.** L'ensemble des coûts de maintenance est budgétisé en début de période suivant des prévisions de pannes et de production théorique estimées. L'exploitant doit veiller à estimer un budget optimal des dépenses sur les opérations correctives et préventives. Pour optimiser le coût global O&M, l'exploitant rationnalise les processus de maintenance avec pour objectif de trouver un coût de maintenance qui maximise la rentabilité du parc tout en faisant un équilibre entre la stratégie corrective et la stratégie préventive. Il existe une valeur de coût O&M qui peut être considérée comme une « valeur d'équilibre » entre « sur-entretien » et « sous-entretien ».

Les différentes stratégies ont donc pour but d'atteindre ce meilleur compromis en jouant avec les termes correctif et préventif suivant les objectifs fixés et les différents paramètres du milieu. Maintenir ne veut plus dire remettre en l'état, mais atteindre des objectifs afin de maximiser le profit qu'on veut tirer de son investissement. Il s'agit de conserver les éoliennes le plus longtemps possible et au moindre coût pour amortir les frais engagés pour la construction et l'exploitation et dégager une marge bénéficiaire. Précédemment, nous avons abordé différentes stratégies de maintenance appliquées et certains logiciels qui servent à les optimiser. Grâce aux logiciels qui permettent de capitaliser sur les interventions, on garde en mémoire les interventions précédentes et on acquiert une intelligence collective sur les pannes et sur les démarches à suivre pour les anticiper.

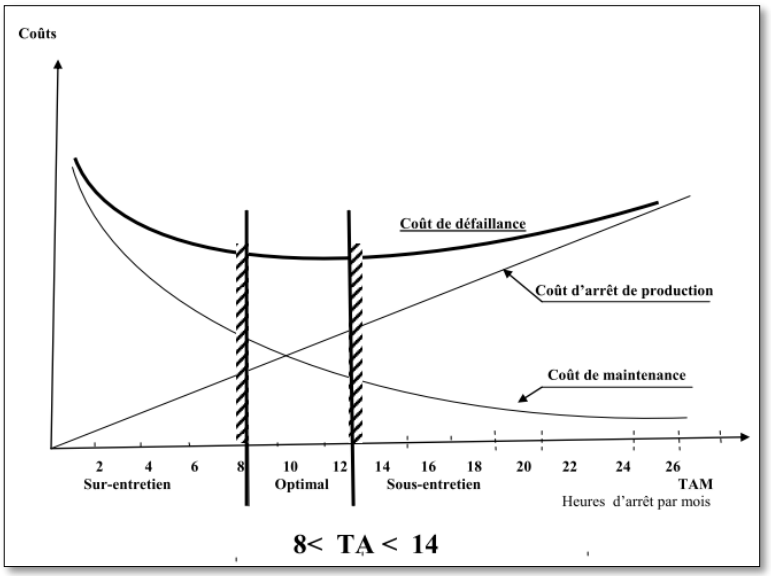


Figure 15 Compromis entre coût de défaillance et coût de maintenance

La recherche d'un équilibre optimal de coût demeure l'objectif de tout exploitant éolien [15]. Pour ce faire, l'exploitant doit maîtriser l'état de son équipement et ses budgets. A partir de prévisions de production et des arrêts plausibles, il peut ainsi estimer le coût de sa maintenance et l'optimiser. Le nœud du problème réside dans le fait que ce coût prévu doit correspondre à une réalité changeante. Par exemple, le vent n'est pas le même d'une année à l'autre, l'exploitant doit pouvoir adapter ses prévisions de budgets construisant avec un système capable de se conformer aux évolutions des conditions environnements du parc éolien. Le système doit aussi permettre à l'exploitant éolien de pouvoir trouver un équilibre de coûts qui maximise la performance de ses parcs. Nous sommes orientés avec les systèmes multiagents pour leur caractère autonome et leur forte adaptabilité aux différents contextes de simulation.

Avant de modéliser le SMA correspondant, nous avons choisi de décortiquer la « fonction coût » à travers une ontologie. Nous avons défini cet indicateur à travers une ontologie descriptive de l'O&M. Cette ontologie descriptive recense les connaissances importantes dans l'optimisation du processus de la maintenance. La description du contexte va ensuite nous permettre de modéliser un système, selon le paradigme des systèmes multiagents. Ce modèle va servir à la construction de l'outil d'aide à la décision de maintenance. Ces deux champs de recherche feront l'objet d'un état de l'art dans la deuxième partie.

Partie 2 : Etat de l'art sur les systèmes multiagent et les ontologies métiers

Pour répondre à notre objectif d'optimisation de la maintenance avec l'indicateur « Fonction Coût », nous avons choisi d'utiliser un modèle basé sur le paradigme multiagent. Dans cette partie, nous reprenons les notions essentielles dans ce champ de recherche. Notre modèle de SMA est issu d'une déclinaison de la fonction coût à travers une ontologie de domaine dont les notions théoriques sont développées à la fin de cette partie.

1.6 Introduction sur les SMA

L'approche multiagent est une alternative aux approches plus conventionnelles de coopération et de résolution de problèmes. Depuis les années 80, ce domaine de recherche s'est développé à partir de travaux dans le domaine de la robotique mobile ; il a connu son essor à partir des années 90 et des travaux de FERBER. L'approche multiagent permet en général de traiter un problème en le décomposant en sous-problèmes plus simples, de telle sorte que les agents n'aient à se consacrer qu'à une seule des sous-tâches à la fois. [16]. Les SMA sont principalement utilisés pour :

- Gérer les connaissances réparties dans plusieurs entités différentes
- Exploiter toutes ces connaissances à un moment donné afin de fournir des solutions à un problème posé.

Il faut distinguer la notion d'agent, de modèle multiagent et de systèmes multiagents. Le système multiagent est implémenté à partir d'un modèle. Le modèle définit les agents et leurs interactions dans l'environnement du système.

1.6.1. *Le concept d'agent et de système multiagent SMA*

Un système multiagent (SMA) est une organisation d'agents. Il met en œuvre un ensemble de concepts et des techniques permettant à des logiciels hétérogènes, ou à des parties de logiciels, appelés « agents », de coopérer suivant des modes complexes d'interaction. [17]. Un agent se définit comme une entité mue par un ensemble de tendances (fonction de satisfaction ou de survie à optimiser, information à obtenir ou à transmettre) qui possède ses propres ressources et ne dispose que d'une représentation partielle de l'environnement. Son but est de satisfaire ses objectifs tout en tenant compte de ses compétences, de ses ressources et de la perception qu'il a de son environnement.

Un agent est entièrement autonome et dispose d'une connaissance sur ses capacités de décision et cherche à atteindre un but précis. Une autre caractéristique d'un agent est sa capacité à coopérer avec d'autres entités de son environnement. En se conformant à son niveau de rationalité, il peut choisir d'interagir, de coopérer, de négocier ou de limiter son interaction avec l'environnement [18]. Un agent, comme un objet, encapsule un état et un comportement ; l'agent encapsule le contrôle sur son comportement alors qu'un objet n'a le contrôle que sur son état. Dans un système avec plusieurs agents, les buts à atteindre peuvent être complémentaires ou contradictoires. Les agents peuvent être séparés en fonction du type de relation en trois catégories : les agents collaboratifs, les agents indépendants et les agents compétitifs [19].

Un agent collaboratif prend des décisions et réalise des actions en accord avec d'autres agents pour atteindre leurs buts respectifs. Cet effet de groupe leur permet, par conséquent, de mutualiser les connaissances et de lier leurs buts. A contrario, les agents indépendants évoluent de façon solitaire au sein de l'environnement et leurs buts ne se confondent pas avec ceux des autres agents. Les agents compétitifs au sein d'un environnement ont des buts opposés. Leur « réussite » peut très bien passer par la défaite des

autres agents. Le SMA peut être ouvert (i.e. : les agents entrent et sortent) ou fermé (i.e. : nombre d'agents fixé sans possibilité d'ajout ou de suppression) ; homogène (i.e. : agents tous identiques) ou hétérogène (i.e. : agents de modèles et de granularités différents).

Un SMA se définit comme [20]:

- Un ensemble B d'entités présentes dans un environnement E (E est caractérisé par un ensemble d'état S)
- Un ensemble d'agents A ⊆ B
- Un ensemble d'actions permettant aux agents d'interagir dans E
- Une organisation O structurant l'ensemble des agents et définissant les fonctions remplies par les agents (cette organisation définit leurs rôles et les répartit éventuellement leurs groupes).

Dans un SMA, les agents disposent d'une vision partielle de l'environnement ; ils interagissent pour :

- Collaborer : par l'allocation des tâches ou l'échange d'informations pour évoluer dans l'environnement et atteindre leur but respectif
- Négocier : échanger avec une autre entité pour atteindre un objectif commun ou propre à chacun. La négociation peut donner lieu à des conflits
- Se coordonner : synchroniser ses actions en fonction des autres entités dans le cadre de la recherche et d'un objectif commun.

A la différence d'un objet, un agent est un objet adaptatif, rationnel, autonome. Il peut être aussi capable de communication et d'action. Il est créé sous forme d'objet et ayant les caractéristiques d'un processus. L'objet appelle une méthode existante chez un autre objet, alors qu'un agent peut se voir refuser l'exécution d'une méthode par un autre agent.

1.7 Caractéristiques des agents

On identifie quatre grandes caractéristiques des agents dans un SMA. Il s'agit de :

- **La réactivité** : pour un agent, elle se définit comme la capacité à percevoir les caractéristiques de l'environnement et à répondre, en temps réel, aux changements qui se produisent. Ces changements peuvent être internes par exemple lorsque la valeur d'une variable d'un agent est modifiée.
- **L'autonomie** : un agent autonome est capable d'établir un plan d'action par rapport à son but et aux interactions avec l'environnement. L'agent a la capacité d'évaluer son état interne et dispose d'un contrôle total sur les actions qu'il peut réaliser.
- **L'interaction et sociabilité** : l'agent est capable d'envoyer des messages et de recevoir des informations provenant des agents ou d'autres entités avec qui ils coopèrent. C'est la faculté d'interagir avec d'autres agents ou entités.
- **La proactivité** : dans un comportement orienté pour atteindre son objectif, l'agent a la faculté de prendre l'initiative de ses actions. Il peut ainsi modifier des variables qui lui sont associées et susciter des changements dans l'environnement.

Les conséquences de l'autonomie des agents peuvent être étudiées par rapport aux interactions avec les autres entités. Un agent dans son environnement peut disposer [20] :

- D'accointances : entités avec qui il échange sans pour autant en être dépendant
- De dépendances : entités qui lui fournissent des informations primordiales à l'exécution de ses propres actions
- Des gêneurs : entités dont les actions ou buts entrent en contradiction avec les siens.

1.8 Les connaissances d'un agent

Les connaissances d'un agent peuvent être de différents types. Un agent peut disposer de :

- Connaissances sur son domaine : il s'agit des concepts qui caractérisent le domaine fonctionnel dans lequel l'agent évolue (par exemple transport, maintenance…)
- Connaissances internes :
  - Les intentions
  - Les croyances dont il dispose
  - Les décisions d'action
  - Des accointances qu'il a dans l'environnement.

1.9 Les différents types d'agents

La typologie des agents dépend fortement du type d'action qu'ils doivent implémenter. On distingue plusieurs types d'agents dont :

- Agents cognitifs : leurs connaissances sont décrites au sein d'états mentaux. Ils sont capables d'adopter un comportement rationnel avec buts et plans d'actions explicites pour les atteindre. Ils disposent d'une représentation de l'environnement et d'une mémoire locale du passé. Etant des agents complexes à modéliser, le nombre d'agents de ce type dans un environnement est souvent réduit. C'est la capacité d'anticipation qui différencie les agents cognitifs des agents réactifs ; les agents cognitifs possèdent une mémoire et sont capables de représentation partielle de l'environnement.

Ci-dessous l'algorithme de fonctionnement d'un agent cognitif.

Boucle : Attente flots de données (perception, communication, raisonnement)

Boucle : Sélection de l'événement à traiter,

- Si (Communication) :
  - Validation « Accointances »,
  - Si (Décision) :
    . Mise à jour « Module Cognitif »,
    . Activer le « Raisonnement » (but : prendre une décision),
    . Attente signal « Raisonnement »,
    . Activer la « Communication » (création de décision).
  - Si (Message) :
    . Traiter le type (requête, information, réponse) :
    - Si (Requête)
      . Identifier le type de problème,
      . Activer le « Raisonnement » (but : répondre),
      . Attente signal « Raisonnement »,
      . Activer la « Communication » (réponse).
    - Si (Rationalités)
      . Mise à jour « Module Cognitif »,
    - Si (Information)
    - ...

Fin Boucle

Fin Boucle

Figure 16 Algorithme fonctionnel d'un agent cognitif

- Agents **réactifs** : ils ont des connaissances réduites et leurs comportements sont fortement dirigés par leurs perceptions de l'environnement. Ils ne disposent pas de mémoire locale et sont basés sur un fonctionnement du type stimulus➔ action.

- Agents **rationnels** : ils ont un comportement délibératif ; ils disposent de croyances, de buts et d'intentions.
- Agents **purement situés** : ils possèdent une métrique et une capacité à percevoir leur position au sein d'un environnement et à déterminer la position des autres agents ; Ils ne communiquent pas directement entre eux mais peuvent le faire via l'environnement.
- Agents **purement communicants** : il n'y a pas d'environnement au sens physique du terme ; ces agents n'ont pas d'ancrage physique. Ils communiquent directement entre eux.

Il existe plusieurs formes d'organisation des SMA ; par exemple l'organisation hiérarchique avec des agents prééminents à d'autres, l'organisation de marché ou de société où les agents interagissent comme sur une plateforme d'échanges de valeur.

1.9.1. *L'approche centralisée d'un SMA*

L'approche de gestion centralisée est souvent utilisée pour l'aide à la simulation dans la plupart des outils implémentant des SMA. L'utilisation d'un agent facilitateur a d'abord été proposée avec le langage KQML. Ces agents facilitateurs sont chargés de :

- Identifier les agents par leur nom ou par leur capacité à exécuter une action
- Faire suivre les requêtes émises aux agents concernés
- Décomposer la requête en sous-requêtes et dispatcher les différentes sous-requêtes aux différents agents concernés
- Collecter toutes les réponses et les composer dans une réponse unique à la requête initiale. Ils peuvent aussi traduire l'information entre différents vocabulaires afin de s'adapter à différentes interfaces d'agent
- Effectuer le stockage temporaire d'information (« buffer »).

La méthode FIPA [21] s'est appuyée sur les propositions provenant du langage KQML pour définir ses normes. Les caractéristiques des agents sont regroupées au sein d'une entité générale appelée « Broker » et tous les agents du système passent par ce « Broker » pour dialoguer. Chaque agent, avant de pouvoir intégrer le système, doit déclarer au Broker ses caractéristiques. L'avantage d'une ouverture centralisée est la facilité d'ajout ; pour qu'un nouvel agent puisse être intégré, il suffit d'établir un protocole d'interaction avec le Broker.

L'inconvénient associé est que la centralisation peut ralentir les échanges et la communication au sein du système [22] . Le nombre d'interactions avec le Broker peut très vite altérer la performance des agents, le risque de perte du Broker entraînant lui aussi la perte de communication et l'arrêt simple du système.

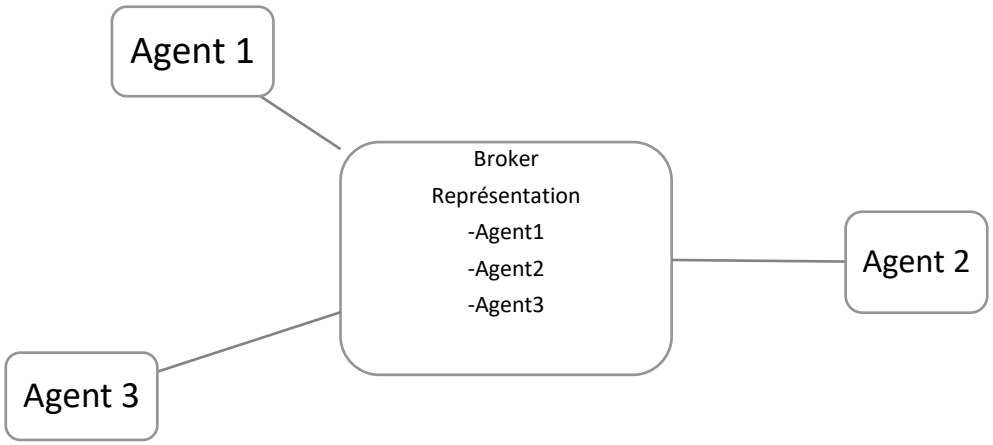


Figure 17 Architecture d'une organisation d'agents avec un broker

1.9.2. *L'approche distribuée d'un SMA*

L'approche distribuée a été préconisée par [22] . Chaque agent dispose de l'autonomie nécessaire pour interagir avec les autres agents sans intermédiaire. Il dispose d'une base locale décrivant les caractéristiques des agents avec lesquels il coopère. Avant d'émettre une requête, il recherche dans sa base l'agent qui peut lui fournir la réponse puis lui adresse directement la requête. Lorsqu'un agent veut mettre à disposition un nouveau service, il doit informer les autres sur ce nouveau service. L'avantage de l'approche distribuée est qu'elle facilite les échanges et améliore la communication. L'inconvénient est que la mise à disposition du nouveau service implique une mise à jour au niveau de la représentation de chaque agent.

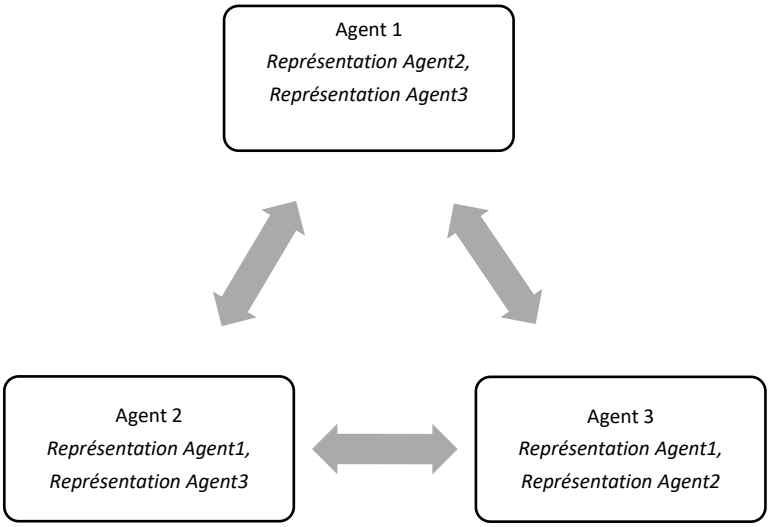


Figure 18 Approche distribuée

En effet, lorsque les agents sont modifiés, leurs représentations correspondantes doivent être mises à jour aussi auprès des agents. Ce processus peut fortement perturber le système lorsque le nombre d'agent est important.

1.9.3. *L'approche hybride*

L'approche a été proposée par [23] . Elle consiste à mettre ensemble les agents par groupe d'accointances. Si par exemple, au cours d'un traitement, un élément (agent) a modélisé son problème et cherche à le résoudre, il s'adresse d'abord aux agents de son groupe. Si aucun agent de son groupe n'est capable de lui fournir la réponse, il accède à un superviseur (équivalent au broker) qui lui indique le groupe dans lequel se trouve l'agent qui peut lui donner la réponse.

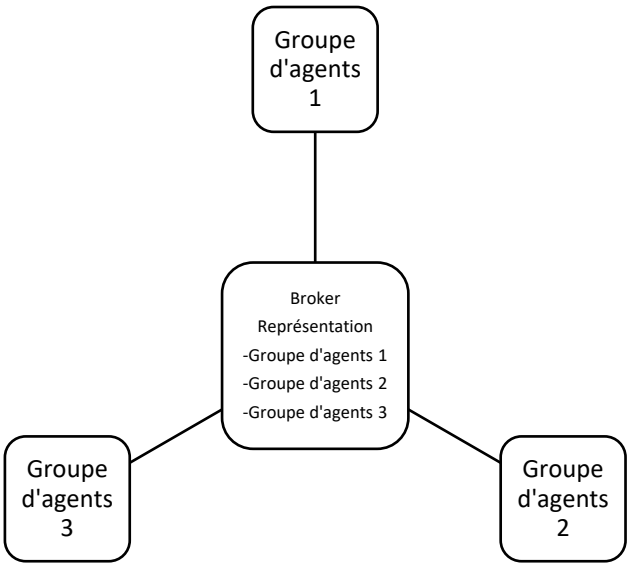


Figure 19 Approche hybride

Les communications à l'intérieur d'un groupe d'agents s'effectuent directement entre agents. Les communications entre groupes d'agents s'effectuent par l'intermédiaire du Broker. Au sein d'un groupe, chaque agent doit disposer d'une représentation des agents de son groupe et de leurs compétences. Quant au Broker, il dispose des représentations de chaque groupe à travers un catalogue de compétence ; il ne résout pas les requêtes envoyées par les groupes mais les oriente plutôt vers les agents correspondants.

1.10 L'interaction au sein des SMA

1.10.1. *La communication dans les systèmes multiagents*

Les agents communiquent entre eux :

- Pour synchroniser leurs actions
- Pour résoudre les conflits
- Pour s'aider mutuellement ou pour suppléer aux limites de leurs champs de perceptions.
- Lorsqu'ils sont face à un problème
- Lorsqu'ils ne savent pas résoudre une situation
- Pour éviter un blocage et trouver un compromis.

Il existe deux types de modèles de communication dans un SMA :

1. Via l'environnement : les agents exécutent une action et laissent des traces de celle-ci aux autres.
2. Via l'envoi de messages :
    a. Individuel : point à point
    b. Partagé : multicast.
    c. Global : broadcast à l'ensemble du système.

Tout langage multiagent est représenté par une structure de données comprenant les champs :

- Emetteur : expéditeur de l'information
- Récepteur : destinataire de l'information
- Langage utilisé : langage dans lequel le message est rédigé
- Contenu du message : le message qui fait l'objet de la communication
- L'ontologie : le vocabulaire dans un domaine donné pour que les agents puissent se comprendre entre eux aisément.

Pour échanger les informations et les connaissances, les agents utilisent les ACL (Agent Communication Langage) qui sont des protocoles de communication.

1.10.2. *La négociation dans les SMA*

1.11 La conception de SMA

On distingue habituellement deux grands types d'approche de conception : les approches Bottom-up et les approches Top-down.

1. Les approches Bottom-up consistent à partir de règles comportementales données a priori, à les transposer dans un cadre applicatif et à réutiliser les comportements émergents pour résoudre le problème posé. Toutefois, ces approches nécessitent souvent un travail fonctionnel de la part du concepteur qui doit évaluer les performances du système, adapter les comportements individuels des agents et régler les paramètres régulant leurs comportements.
2. Les approches Top-down consistent au contraire à partir du problème et à en déduire les comportements individuels des agents pour que le système collectif parvienne à résoudre au mieux le problème posé.

1.12 La simulation orientée SMA

La simulation orientée agent est utilisée dans différents domaines : de la finance à l'industrie cinématographique (Le logiciel MASSIVE) en passant par la résolution de problèmes complexes. La simulation multiagent regroupe les trois composantes essentielles ci-dessous :

- Les agents : ce sont les entités autonomes de l'environnement. Ils interagissent afin d'atteindre un but précis.
- Les règles de comportement de chaque agent qui définissent les actions pour atteindre son objectif. Ce sont les règles qui lui permettent d'interagir avec l'environnement.
- L'environnement : Les agents agissent en fonction de leur environnement ; cet environnement est composé d'autres agents ou d'objets que l'agent utilise pour parvenir à ses fins.

Quel que soit le domaine de simulation, la condition sine qua non pour que le modèle soit valable est la prise en compte d'un contexte réel. Il doit transcrire une réalité à un instant T ; par exemple, la réalité des marchés financiers se base sur les hypothèses et les modèles.

1.13 Modélisation des agents en SMA

La représentation de la dynamique des agents peut se faire avec différents formalismes comme :

1. Les réseaux de Pétri (Rdp) : le modèle de Rdp est destiné à la modélisation de systèmes dynamiques. Les RDP peuvent être utilisés pour représenter les protocoles de communication entres des entités communicantes [24] ou pour représenter des protocoles de négociation entre agents.
2. L'approche UML : approche de modélisation « Objet » qui a été a adapté aux agents qui est celle que nous avons adoptée parce qu'elle nous permet aisément de gérer les objets présents dans l'environnement.

1.13.1. *Les plateformes existantes*

Il existe plusieurs plateformes multiagents utilisées dans la communauté. Elles fournissent une base d'algorithmes qui sont adaptées par les développeurs pour répondre à leurs problèmes de simulations.

1. La plateforme Jade : JADE (Java Agent Developement Framework) est une plateforme créée par le laboratoire TILAB (Telecom Italia). Cette plateforme permet le développement de systèmes multiagents conformément aux normes FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents). Elle est implémentée en JAVA.
2. La plateforme BORIS.NET : c'est une plateforme de programmation multiagent basée sur Microsoft .NET. Il existe une extension de Boris qui permet le développement des systèmes multiagents dans les langages .NET tels que C # et VB.NET. [25] .
3. Madkit : c'est une plateforme de SMA en Java proposée par Olivier Gutknecht et Jaques Ferber [24]. C'est une plateforme générique de conception et d'exécution des agents. Dans cette plateforme, les agents sont systématiquement définis par leurs groupes et leurs rôles.

On peut aussi citer plusieurs d'autres plateformes comme : Zeus, D-Mason, Netlogo, Gama, AgentBuilder, Jack MT, CORMAS [26].

Les différentes plateformes permettent de créer un ensemble d'agents et de les faire interagir entre eux. Les développeurs peuvent aussi choisir de développer tout le système sans faire appel à une bibliothèque ou une plateforme existante.

1.13.2. *Conclusion sur les SMA*

Les systèmes multiagents sont utilisés dans différents contextes. Dans la littérature, la définition des capacités d'action de l'agent et de ses interactions avec les autres entités est primordiale pour effectuer une simulation. Les systèmes performants ne prennent pas en compte forcément tous les cas possibles auxquels fera face l'agent. Ils reposent beaucoup plus sur la capacité de l'agent à s'adapter aux modifications de son environnement. Pour l'environnement de l'exploitant, la réalité mouvante contraint le système à prendre les données réelles pour produire en sortie les informations réelles qui seront jugées utiles à caractériser les coûts et la performance des installations.

1.14 Les ontologies

Le terme « Ontologie » est apparu dans les années 90. A l'origine, il vient de la philosophie et pouvait se définir comme une méthode de classification des « choses » du monde. Plusieurs définitions ont été admises par la communauté de l'Ingénierie des Connaissances :

- Pour [27]« l'ontologie définit les termes et les relations de base constituant le vocabulaire d'un domaine ainsi que les règles qui indiquent comment combiner les termes et les relations de façon à pouvoir définir les extensions du vocabulaire ». Le principal atout de cette définition est qu'il explicite clairement le contenu d'une ontologie.
- La définition de [28] reste à ce jour la référence dans le domaine : « une ontologie est une spécification explicite d'une conceptualisation ». L'ontologie est donc partagée entre les experts du domaine qu'elle traite.
- Une autre définition de [29] prend en compte le partage de la conceptualisation : l'ontologie est une spécification explicite formelle d'une conceptualisation partagée.
    - Une conceptualisation est un modèle abstrait de connaissances sur un phénomène identifié caractérisé par des concepts pertinents. L'ontologie est explicite si les concepts et les contraintes associées à ces concepts sont définis.
    - La notion de formalisme de l'ontologie implique sa compréhension automatique et son intégration dans une machine.

- Enfin, la conceptualisation partagée est un ensemble de connaissances reconnues et validées au sein d'un groupe. Ce groupe peut être identifié comme un ensemble de personnes ou de machines.

Au-delà d'un vocabulaire, l'ontologie englobe le sens sous-jacent de ce vocabulaire dans toute sa complexité. « Une ontologie n'est pas qu'une représentation dans une machine d'un ensemble de connaissances d'un domaine, elle reflète aussi le niveau de consensus sur ces savoirs » dans un groupe [29]. Les ontologies sont utilisées par plusieurs types d'acteurs différents : êtres humains et/ou machines informatiques. Par conséquent, le formalisme de communication et de vocabulaire représentant la conceptualisation prend une importance considérable dans la mise en place d'un système d'ontologie. Plusieurs autres types d'ontologies existent.

Parmi les principaux que nous avons cités, nous nous focaliserons sur les ontologies de domaines. Pour [30] une ontologie est « un catalogue des types de choses que l'on assume qui existent dans un domaine d'intérêt D du point de vue d'une personne qui emploie le langage L dans le but de parler de D ». Sowa considère lui aussi les ontologies comme les points de vue des personnes impliquées, mais il limite ultérieurement la définition en introduisant le concept de domaine.

Nous situons le travail d'ontologie dans le domaine de l'O&M avec le point de point de vue de l'exploitant éolien La Compagnie du Vent (LCV). Ce point de vue se caractérise par un « macro-indicateur » appelé : « Fonction Coût » : fonction économique de l'O&M pour un exploitant éolien qui servira à l'évaluation des coûts de maintenance d'un parc éolien lors des simulations. Cette fonction sera intégrée dans la plateforme PROMEEO.

D'un point de vue de l'exploitant, l'ontologie récapitule les notions de maintenance, de gestion de pannes, la gestion des pièces et du personnel qui participe à la maintenance. La démarche que nous avons adoptée consiste à définir tous les concepts qui caractérisent la maintenance des parcs dans une fonction économique. Avec les experts du métier, nous avons construit une ontologie qui répertorie l'ensemble des notions relatives aux critères d'évaluation et d'optimisation d'une stratégie de maintenance. Cette ontologie est construite d'un point de vue LCV. L'ontologie est construite autour d'un indicateur de fonction coût qui constitue le fil directeur de notre réflexion : elle est présentée dans nos contributions dans le chapitre 2.

1.15 Positionnement de la thèse par rapport à l'état de l'art et choix des systèmes multiagent

Le chapitre précédent nous a permis de connaître les outils utilisés pour anticiper les pannes dans le domaine de l'éolien. Nous avons choisi d'identifier dans une ontologie tous les concepts liés à la gestion de la maintenance. A partir de ces connaissances, nous avons constitué le modèle de connaissance sur lequel va se baser l'outil pour répondre à la problématique.

Dans un contexte concurrentiel dense comme celui de la production d'électricité issue de parcs éoliens, les entreprises doivent maitriser leurs coûts de production. L'objectif de LCV est double : réduire son coût de maintenance et maximiser sa production d'électricité. Toute sa stratégie est construite sur une politique d'optimisation associée à des outils pouvant lui permettre d'anticiper les pannes (à travers leurs causes) et d'estimer en amont leurs coûts [31]. Au-delà de cet objectif, notre problématique intègre la notion de système autonome qui s'appuie sur les connaissances identifiées ; ce système serait capable de simuler l'environnement de la maintenance de parcs éoliens, et de fournir des résultats de simulation.

La question induite réside dans le mode d'organisation au sein du système et de combinaison des différentes contraintes qui permettront de baisser le montant global des charges de maintenance tout en maximisant le chiffre d'affaires. Concrètement ces contraintes s'articulent autour de deux axes principaux : les pannes et leurs conséquences financières sur les équipements et la rentabilité des parcs. Pour répondre à cette question, nous avons choisi d'utiliser les systèmes multiagent. Par leurs caractéristiques, les SMA sont capables de servir de socle à un système autonome répondant à des objectifs de simulation. Ils présentent les avantages suivants :

- La proactivité des agents dans l'environnement.
- La prise de décision autonome des agents.
- La communication et la recherche de compromis entre agents.

D'un point de vue SMA, l'objectif est de faire émerger des comportements globaux cohérents d'agents et d'objets en fonction d'objectifs prédéfinis. C'est principalement la typologie des agents dans le système autonome et la capacité de celui-ci à concevoir ses possibilités d'actions et à choisir la ou les bonnes actions à exécuter qui rendront pertinentes ses décisions. Le niveau de granularité adopté permet aussi d'affiner les échanges entre entités. Enfin, l'adaptabilité du système au sens où il se conforme à l'évolution de l'environnement et de ses contraintes entre en compte dans la validité des décisions émergentes.

Les acteurs humains ne sont pas modélisés sous forme d'agents. Ils ont un rôle d'utilisateur du système. Par exemple, le responsable des budgets O&M est un type d'utilisateur du système. Pour mesurer l'efficacité des différentes opérations de maintenance sur un parc éolien, il observe différents indicateurs comme :

- La disponibilité d'un parc qui est une notion centrale chez tout exploitant industriel
- Le coût de maintenance : on peut estimer ce coût en calculant le coût des opérations sur le site puis en y rajoutant la valeur en euros de la perte de production (en ramenant le coût de l'électricité au kWh).
- Les temps d'arrêts des éoliennes qui regroupent plusieurs opérations O&M : le diagnostic de la panne, l'approvisionnement, l'acheminement, la réparation et le redémarrage.

Notre approche dépend fortement de la définition de l'exploitation et de la maintenance telles qu'elles sont perçues par un exploitant éolien. Toutes ces notions sont exploitées dans le système que nous avons construit. A partir de l'ontologie, on déduira le modèle multiagent correspondant. Les concepts représentent toutes les entités de l'environnement. Ces concepts lorsqu'ils en présentent les caractéristiques et expriment un but, les concepts peuvent être réifiés en agent et interagissent entre eux dans l'organisation. Dans notre cas, l'organisation à prendre en compte est celle qui définit l'allocation de tâches spécifiques à chaque agent du système (« Task-based Organization ») [32]. Cette organisation présente l'avantage de permettre à chaque agent un assignement de tâche lié à son but dans le système.

Dans la littérature, parmi les outils que nous avons passés en revue, deux se rapprochent le plus de notre approche. Il s'agit de :

- L'application SINBAD qui est un outil plutôt axé sur la prédiction des défaillances pour minimiser les coûts de maintenance. Elle est basée sur l'approche matérielle de l'éolienne mais ne prend pas en compte tout le process de coûts de maintenance : panne, coût etc..).

- La plateforme de SMA développée par [13]. Cette plateforme a pour objectif principal l'utilisation des SMA pour la maintenance des parcs éoliens. Elle aborde les éléments qui caractérisent une éolienne mais la démarche reste peu opérationnelle par la prise en compte faible de l'environnement d'un exploitant.

Le principal verrou dans notre positionnement s'articule autour du choix de la méthode d'agentification à adopter. Quelles démarches permet de passer des connaissances acquises formalisées sous la forme d'objets UML à un ensemble d'agents autonomes chacun disposant de ses règles de proactivité et de sociabilité ? Cette démarche doit prendre en compte la vision de l'exploitation et la maintenance pour l'exploitant éolien qui représente le fil d'Ariane de notre réflexion.

1.16La définition de la fonction Coût de l'O&M pour un exploitant éolien

Nous sommes partis du point de vue selon lequel la FC est le point culminant de toute optimisation de processus de la maintenance. Nous avons avec les experts du domaine, essayé de décortiquer les connaissances les plus importantes dans le cadre d'une optimisation de la maintenance des parcs éoliens.

Ce travail sera formalisé dans une ontologie descriptive à partir du travail sur la « Fonction coût » de l'O&M et indicateurs associés. Les indicateurs de la Fonction Coût traduisent les concepts de la maintenance au niveau LCV ; ils permettent d'évaluer la qualité des interventions et leur impact sur le taux de disponibilité des parcs (une éolienne est considérée comme disponible lorsqu'elle est en état de produire de l'électricité). Il faudra ensuite regrouper les indicateurs d'évaluation par groupes selon les trois aspects ci-dessous :

- **Pannes et leurs causes** : il s'agit de l'analyse des alarmes et des premières causes qui ont pour conséquences les défaillances des composants.
- **Intervention** : ici rentre toute la partie relative à l'évaluation du coût de l'intervention pour résoudre la panne et les indicateurs de perte de production.
- **Après l'intervention** : il s'agit de la partie qui évalue l'intervention et les conséquences sur la production.

1.17Modélisation des agents à partir de l'ontologie (démarche méthodologique)

La FC qui exprime la rentabilité et les indicateurs associés constituent le socle sur lequel nous allons bâtir toute l'optimisation. Ils représentent la connaissance de l'agent. Considérant que le contexte et les contraintes de l'O&M sont évolutifs, nous nous situons dans un environnement ouvert dans lequel des agents pourront être ajoutés ou supprimés sans altérer la cohérence globale du système de la PROMEEO. Pour cela, il faudra :

- Définir le modèle agents en vue de la simulation : pour nous, il s'agira d'abord de définir l'agent dans le contexte de LCV (prestation réalisée par des externes, gestion des pièces par LCV, disponibilité etc…). Ensuite, nous identifierons l'ensemble des agents nécessaires à la prédiction de pannes et ceux qui évaluent les conséquences sur l'appareil de production.
- Définir pour chaque agent son but, ses règles de comportement et ses interactions avec les autres composants à l'intérieur du système. Cet agent dispose d'une représentation de lui-même et de l'environnement qui l'entoure.

Chaque agent se définira par :

A {b_{List}, r, E} avec
A comme identifiant de l'agent
b_{List}: la liste des buts à atteindre
r : les ressources utilisées pour atteindre ses buts
E : sa représentation de l'environnement de l'O&M à LCV.

- Différents indicateurs seront construits pour le suivi de l'état des éoliennes et du parc. La simulation a pour objet les indicateurs de la maintenance sur une panne : coût O&M, perte de production causée par l'arrêt suivant le vent prévu.

Nous avons dressé un état des publications dans les deux champs de recherche impliqués dans le cadre cette thèse : la maintenance industrielle et les systèmes multiagents. L'optimisation de la maintenance dans le secteur éolien s'articule principalement autour de stratégies et d'outils. Ces outils se basent le plus souvent sur la connaissance et la mémorisation d'un état de fonctionnement normal des éoliennes ; les alertes et alarmes sont envoyées sur la base de comparaisons avec l'état courant des éoliennes. Nous avons aussi évoqué les travaux relatifs à l'utilisation des SMA à partir d'une formalisation de connaissances de domaines. Il en ressort que l'identification des agents, l'attribution des rôles à chacun des agents et leurs organisations au sein de l'environnement sont primordiales pour la cohérence du système. La démarche proposée sur le processus d'agentification pour aboutir au SMA comporte plusieurs étapes qui reprennent partiellement les méthodes préconisées par [33] et [34] dont l'agentification à partir d'une ontologie.

Chapitre 2. L'approche de l'optimisation basée sur le coût

Dans ce chapitre, nous déclinons les apports de la thèse : d'une part, avec les experts du domaine nous avons identifié la « Fonction Coût » (« FC »). C'est l'indicateur sur lequel s'appuie toute notre approche de l'optimisation de la maintenance. A partir de la FC, nous avons identifié plusieurs indicateurs auxquels elle est liée dans une ontologie. La particularité de cette panoplie d'indicateurs est qu'ils sont reliés aux parcs et à leur rentabilité. Tous ces indicateurs sont décrits dans la première partie de ce chapitre. L'autre contribution de la thèse est le modèle de SMA que nous avons identifié à partir de l'ontologie.

Le système d'aide à la décision des stratégies de maintenance PROMEEO qui est issu de la réification de concepts de l'ontologie : ce système, composé de 4 sous-systèmes fonctionnels, repose sur un modèle multiagent que nous présenterons dans la deuxième partie de thèse.

2.1 L'optimisation par la recherche de rentabilité : un « EBITDA » adapté au contexte de la maintenance

2.1.1. *Ontologie descriptive de la maintenance du point de vue LCV*

Ce document reprend la liste des concepts de l'ontologie de la maintenance établie à partir d'informations issues de l'expérience de LCV et des indicateurs associés à l'indicateur global qui est la Fonction Coût. Ces concepts ont été intégrés dans une ontologie avec l'outil PROTEGE. L'ontologie est à la fois une base de connaissances et un fichier informatique en XML. Elle peut être interrogée via des outils informatiques ou réutilisée par des systèmes ou des acteurs. Elle peut aussi de modèle pour schématiser des relations entre concepts.

Une ontologie est une structuration des concepts propre à un domaine particulier, en l'occurrence la maintenance de parcs éoliens. Elle permet d'identifier les relations de dépendance entre les notions manipulées par la communauté d'experts du domaine. En premier, l'ontologie permet de hiérarchiser les concepts entre eux, de fixer les liens d'hyponymie. On peut aussi définir nos propres relations sémantiques entre les différents concepts qui peuvent être de plusieurs types.

1. **Fonctionnelle** : une relation est dite fonctionnelle lorsqu'un seul individu au plus peut y être relié. Ex : une alarme a une seule criticité.
2. **Inverse** : chaque relation peut avoir une relation inverse : la relation « est composée de » est l'inverse de la relation « est située ». Par exemple, une éolienne est située dans un parc et un parc est composé de plusieurs éoliennes.
3. **Transitive** : la relation est dite transitive lorsqu'une suite de concepts reliés consécutivement nous permet d'obtenir une relation du même type entre le premier et le dernier. La fonction Coût est calculée à partir des coûts O&M ; les coûts O&M sont calculés à partir des coûts de prestation ; la fonction Coût est calculée à partir des coûts de prestation (sous-entendu que la valeur de la fonction Coût est liée à la valeur des coûts de prestation).
4. **Symétrique** : une relation est symétrique lorsqu'elle est valable dans les deux sens. Un lieu de stockage est rattaché à une zone d'exploitation ; une zone d'exploitation est liée à un lieu de stockage. (Dans le cas contraire, on peut préciser que la relation est asymétrique)
5. **Réflexive** : une relation est dite réflexive lorsque le concept est relié à lui-même ;

Tous les concepts ont été regroupés au sein de 4 « top concepts ». Ces « top concepts » représentent les grandes catégories qui caractérisent le domaine industriel. Il s'agit :

1. **Des équipements** : groupes de parcs éoliens, parc éoliens, éoliennes sur lesquels se basent notre analyse.
2. **Des indicateurs** : indicateurs O&M destinés à estimer les stratégies de maintenance et leur rentabilité. Il s'agit aussi d'un ensemble d'indicateurs destinés à évaluer la performance des financières des parcs en les comparant.
3. **De la maintenance** : toutes les notions associées aux métiers de la maintenance.
4. **De la production et des chiffres d'affaires associés aux parcs** : les top concepts qui sont associés aux productions de parcs éoliens. On distingue plusieurs types de production en fonction des paramètres de calculs choisis. En l'appliquant au tarif d'achat, on obtient des valeurs de production qu'on peut exploiter pour définir une analyse financière des parcs éoliens.

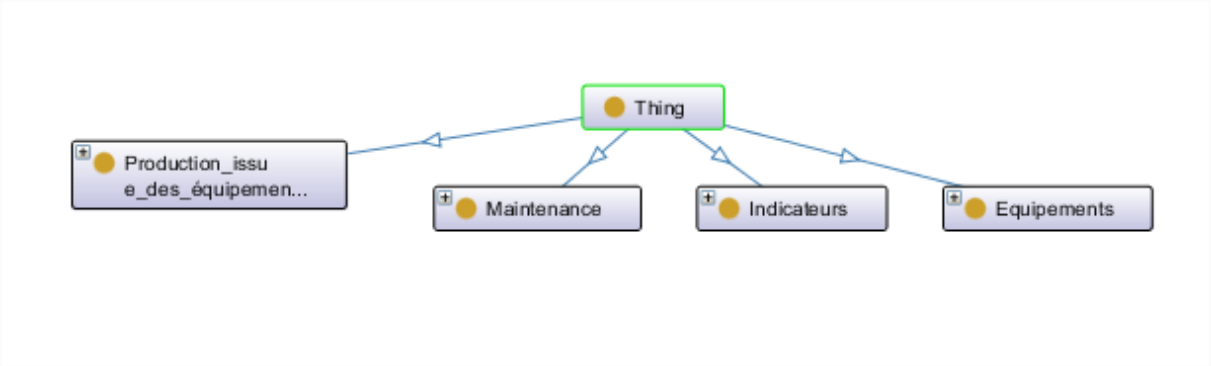


Figure 20 Ontologie et les tops concepts

Les tops concepts ont été identifiés avec les experts du domaine. La démarche a consisté à identifier tout le savoir potentiellement utilisable dans le cadre de l'O&M . L'approche top-down en partant des concepts les plus généraux jusqu'à l'identification des concepts les plus spécifiques.

2.1.2. *Equipements*

Les équipements sont les installations industrielles sur lesquelles portent les activités de maintenance. Ils regroupent tous les concepts qui décrivent les entités physiques des parcs éoliens.

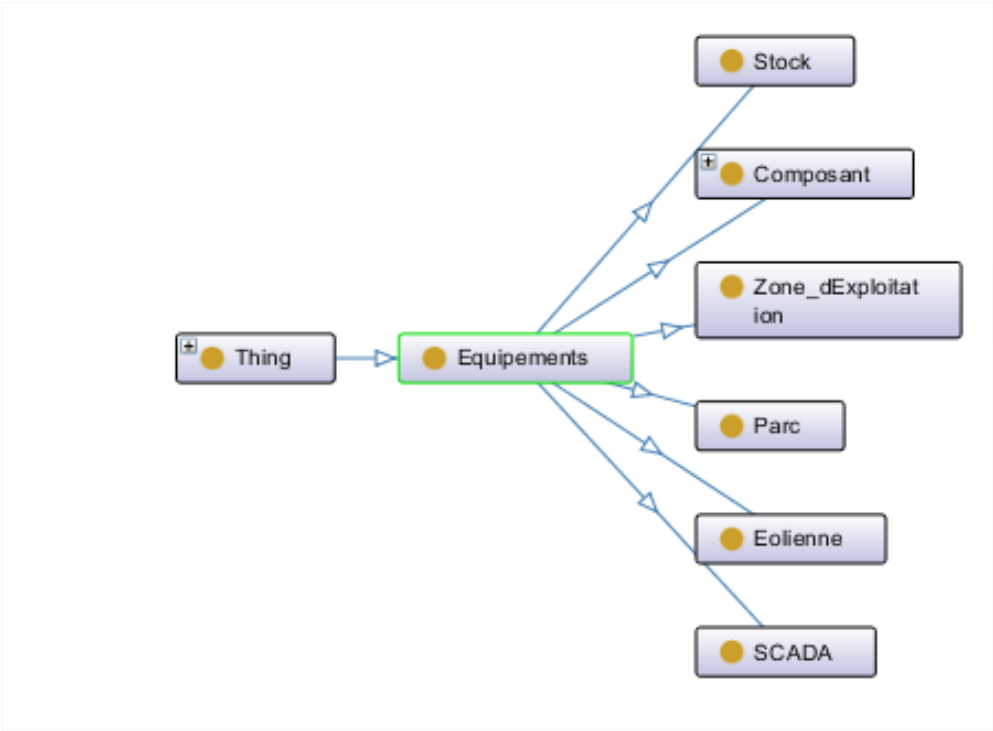


Figure 21 Top concept Equipement

2.1.3. *Indicateurs*

Les indicateurs évaluent l'état et le comportement des installations physiques. Ils quantifient l'état de maintenance des parcs et le confrontent à la production. Pour un exploitant, il peut s'agir des résultats de la stratégie de maintenance ou des leviers qui lui permettent de piloter la stratégie.

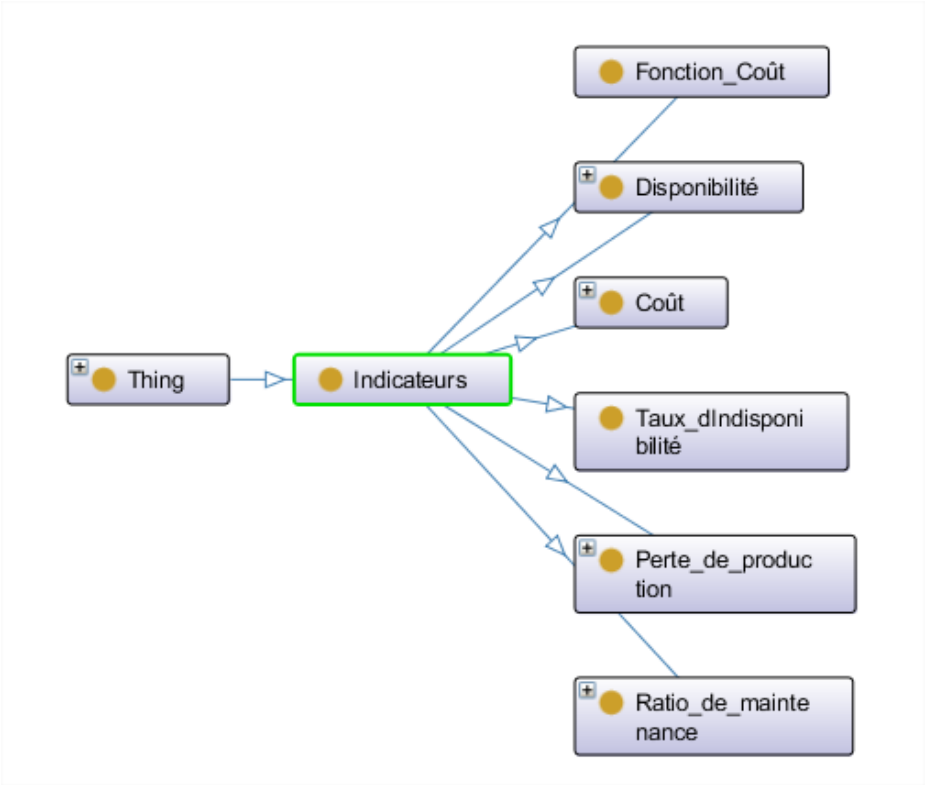


Figure 22 Top concept Indicateurs

2.1.4. *La maintenance*

La maintenance est l'activité principale autour de laquelle l'ontologie est construite. C'est l'un des principaux concepts de l'ontologie. Elle reprend tous les concepts propres aux métiers de la maintenance sauf pour les indicateurs d'évaluation. Les différences dépendent des contextes industriels ; dans le cas de LCV, nous avons identifié les concepts importants par rapport aux réalités du domaine. Les concepts considérés comme fondamentaux sont censés être figés quel que soit le contexte industriel.

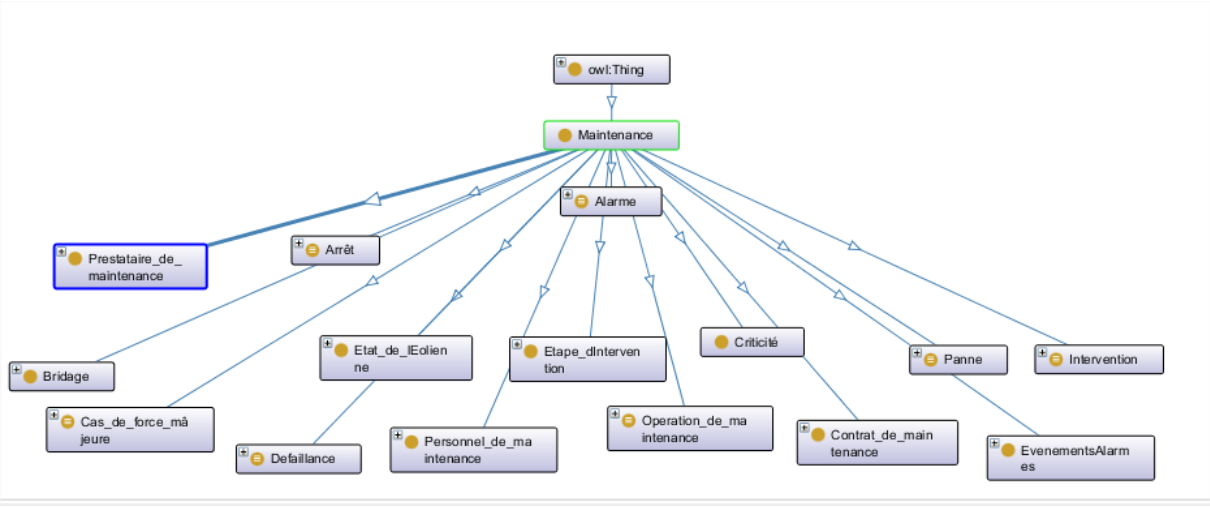


Figure 23 Top concept Maintenance

2.1.5. *Production issue des équipements*

Le concept de « production issue des équipements » regroupe l'ensemble des concepts relatifs aux équipements. Même si la production est liée aux équipements, elle est surtout le résultat de la stratégie de la maintenance (gestion adéquate des prestations des pièces etc…).

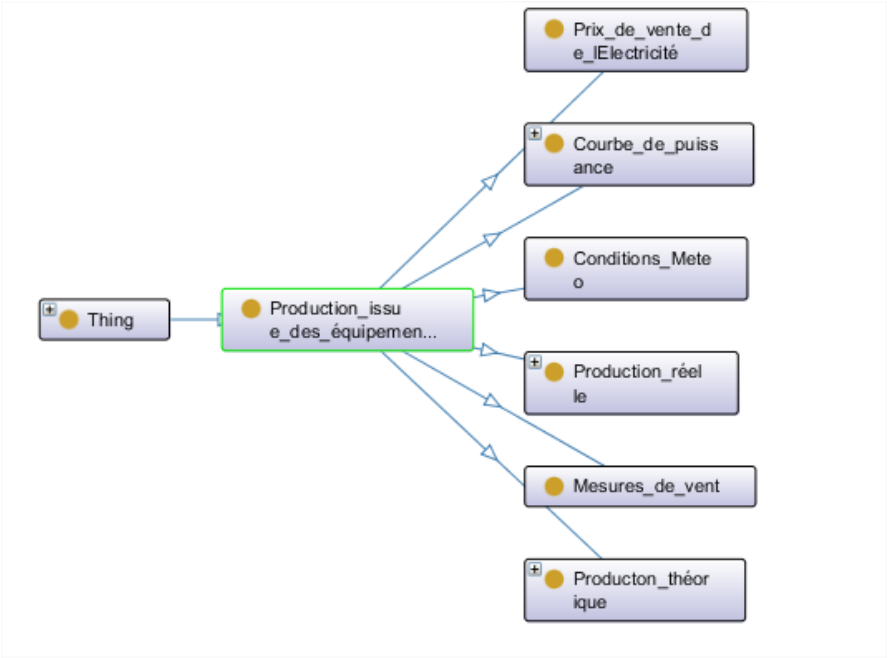


Figure 24 Top Concept production issue des équipements

Chaque concept de l'ontologie est décrit par le top concept qui lui est rattaché et les relations avec les autres concepts. C'est l'indicateur Fonction Coût qui, en tant que principal concept, qui a guidé la construction de notre approche de l'optimisation des coûts de maintenance.

2.2 La « Fonction coût » et la performance financière des parcs éoliens

La « Fonction Coût » est l'indicateur le plus important dans notre approche de l'optimisation de la maintenance de l'exploitant éolien. Sa définition trouve son origine d'un indicateur financier largement utilisé dans la comptabilité analytique : l'EBITDA. La FC est un indicateur qui agrège plusieurs autres indicateurs (sous-indicateurs) directement en lien avec le fonctionnement des parcs éoliens. Nous l'avons adapté au contexte éolien compte tenu des particularités inhérentes à ce domaine.

2.2.1. *Cadre général*

La fonction Cout se définit comme un « **macro indicateur** » de performance du système de production d'électricité de l'ensemble des parcs éoliens de LCV. Nous avons choisi de l'assimiler à un EBITDA délesté de certains paramètres non pertinents dans le contexte de la maintenance. Au sens propre, l'EBITDA[4] se définit comme le bénéfice avant intérêts et impôts (BAII) ou résultat avant intérêts et impôts (anglais : *earnings before interest and taxes*, EBITDA). Il indique la rentabilité du système de production de l'entreprise. Connaître sa valeur permet de confronter le chiffre d'affaires avec tous les frais

[4] Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation, and Amortization

engagés dans la production. L'EBITDA mesure donc la création de richesse de la structure. Comme tout indicateur, il doit être utilisé en fonction d'un objectif recherché.

En règle générale, l'EBITDA peut être utilisé afin de se faire une idée de la santé financière d'une entreprise [35] . L'indicateur est obtenu à partir de la différence entre le chiffre d'affaires réalisé et les coûts engendrés par la production de cette électricité sur une période définie.

Il existe deux modes de calcul de l'EBITDA [35]:

a. Méthode additive en partant du résultat net :

$$EBITDA = Résultat\ net\ de\ l'entreprise + Charges\ d'intérêts + Charges\ d'impôts + Amortissements\ et\ provisions$$

b. Méthode soustractive en partant du chiffre d'affaires :

$$EBITDA = Chiffre\ d'affaires - Consommations\ en\ provenance\ de\ tiers - Services\ extérieurs\ consommés - Charges\ de\ personnel\ (salaires\ et\ charges\ sociales)$$

L'EBITDA est d'abord un indicateur destiné à des fins comptables. Notre objectif initial d'analyse de la maintenance des parcs éoliens nous a amené à adapter la formule en reprenant à notre compte certaines variables.

2.2.2. *Cadre particulier de l'O&M chez l'exploitant LCV*

Pour calculer la Fonction Coût dans le contexte LCV, nous utiliserons la méthode soustractive car elle est basée sur le CA lui-même dépendant de la production du parc. Les postes de l'EBITDA dans le cadre de l'O&M à LCV sont :

Chacun des postes de l'EBITDA adapté au contexte O&M correspond à des postes définis. Ci-dessous les correspondances :

- **Le Chiffre d'Affaires** : production vendue dans le cadre de l'activité. Pour LCV, c'est la production d'électricité issue de l'éolienne ou du parc en euros sur la période considérée ; il est soit théorique soit réel (en fonction de la prise en compte des pertes de production). Contrairement au chiffre d'affaires réel qui est mesuré sur le poste de livraison, la valeur du CA théorique est estimée à l'avance.
- **Les Consommations en provenance de tiers** : il s'agit de la consommation de biens lors du processus de production. Adapté au contexte de l'O&M à LCV, il s'agit exclusivement des consommations de pièces qu'on désignera par les « Coûts de Revient Pièce » ;
- **Les Services extérieurs consommés** : il s'agit des services fournis par des entités extérieures. Pour LCV, ce sont principalement des contrats de prestation de maintenance. Ces contrats peuvent être annuels (plusieurs opérations de maintenance courante sur une période annuelle) ou ne concerner qu'une opération en particulier (prestation hors contrat).

  Dans ces services extérieurs consommés, nous avons fait le choix de mettre de côté certains frais généraux d'exploitation des parcs. N'étant pas imputables aux pannes, ils n'en sont pas moins des charges réelles. Ce sont les frais payés par LCV annuellement qui ne sont pas directement liés aux interventions et à la gestion des pannes. Il s'agit :

- **Des loyers du terrain** : le terrain sur lequel sont implantées les éoliennes est soumis à un loyer payé par LCV.
- **Les assurances** : une assurance est souscrite sur les parcs pour se prémunir de risques éventuels conséquences de l'activité d'exploitation. Ces assurances sont de plusieurs ordres : les dommages corporels, les dommages matériels et les pertes de production.
- **La taxe professionnelle** : l'implantation d'une éolienne sur le terrain d'une collectivité rend obligatoire l'acquittement d'une taxe professionnelle estimée à environ 11000 € / MW.
- **Charges de personnel** : il s'agit du coût du personnel interne à la structure directement impliquée dans la réalisation du chiffre d'affaire ; dans le cas de LCV, il s'agit des charges salariales et frais de personnel de la Direction Exploitation et Maintenance. C'est une variable importante dans le calcul d'un EBITDA classique mais notre analyse porte d'abord sur les pannes et les opérations de maintenance associées : nous l'intégrerons ultérieurement dans nos calculs.

Chaque indicateur peut être contextualisé dans le cadre d'un exploitant éolien tel que la Compagnie du vent. Ci-dessous le tableau de correspondance des indicateurs suivant le cas où on se situe :

Cas Général	**Cas LCV**
Chiffre d'Affaires	CA théorique ou CA réel (Production théorique)
Consommations en provenance de tiers	Coût de Revient Pièce(s)
Services extérieurs consommés	Coût Prestation(s) (uniquement les contrats de prestation)
Charges de personnel	Charges de personnel LCV (Négligées)

Tableau 1 Tableau de correspondance entre les postes de coûts

Tous les coûts retenus dans le cadre de la FC sont regroupés au sein d'un coût global qu'on désigne par « Coût O&M » : les coûts des pièces et des prestations.

$$\boldsymbol{Co\hat{u}t\ O\&M = Co\hat{u}t\ de\ Revient\ Pi\grave{e}ces + Co\hat{u}t\ de\ Prestation}$$

2.3 Le calcul de la Fonction Coût

L'indicateur nommé « fonction coût » FC est donc un EBITDA adapté au contexte de LCV avec les postes associés précédemment. Si on devait rester dans cette adaptation rigoureuse de la formule de l'EBITDA, nous aurions la formule suivante :

$$\mathbf{FC}\ (€) = \mathbf{Chiffre\ d'affaires\ R\acute{e}el} - \mathbf{Co\hat{u}t\ O\&M}$$

Cette formule a pour principal inconvénient de ne pas mettre en lumière la notion de perte de production ; or cette dernière constitue l'une des clés pour améliorer les processus de maintenance. La perte de production se définit comme un manque à gagner consécutif à un arrêt ou à une baisse de performance de l'éolienne. Ces arrêts sont causés par les pannes, les arrêts planifiés et les causes fatales (cas de force majeures) ; les baisses de production sont causées par le vieillissement des composants de l'éolienne, le bridage (pour des raisons acoustiques ou de mode dégradé), de mauvais réglages, etc…

Ces événements qui surviennent réduisent les disponibilités des éoliennes à savoir :

- La disponibilité temporelle de l'éolienne : dans le contexte éolien, elle se définit comme le pourcentage de temps (sur une période) pendant lequel l'éolienne est prête à produire de l'électricité.
- Et la disponibilité énergétique qui se définit comme un indicateur qui montre la capacité de production de l'éolienne.

Les défauts de performance des éoliennes ne réduisent que la disponibilité énergétique tandis que les pannes réduisent les deux types de disponibilité. Lorsque la disponibilité de l'éolienne est à 100%, le chiffre d'affaires réel est l'équivalent du chiffre d'affaires prévu (C.A théorique). Il correspond alors à la production possible estimée avec une disponibilité maximum de 100%. Le CA Théorique correspond donc à un CA idéal où l'on considère que l'éolienne est toujours prête à produire (ne s'arrête jamais de produire tant que les conditions de vent le permettent).

On peut donc écrire que :

CA réel = CA Théorique – Pertes de Prod

Par conséquent la FC devient :

$$\boldsymbol{FC}\ (€) = \boldsymbol{Chiffre\ d'affaires\ théorique} - \boldsymbol{Pertes\ de\ Prod} - \boldsymbol{Coût\ O\&M}$$

Cette formule présente l'avantage d'inclure les pertes de production qu'on pourra associer à des causes d'arrêt ou de baisse de production. En termes de granularité, la FC est calculable à l'échelle d'une panne, d'une éolienne, d'un parc ou d'une zone d'exploitation.

On sait que le chiffre d'affaires théorique est le résultat des mesures de vent auxquelles on applique une courbe de puissance et un prix de kWh.

$$CA\ th(€) = (\ \boldsymbol{CP}\ (\boldsymbol{v\ période}) * \boldsymbol{Prix\ kWh}(€)]$$

$$\boldsymbol{FC}(€) = [(\ \boldsymbol{CP}\ (\boldsymbol{v\ période}) * \boldsymbol{Prix\ kWh}(€)] - \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{i}} (\mathbf{Ctpièce\ i} + \mathbf{CLPièce\ i} + \mathbf{Loyer\ i}) - \sum_{\boldsymbol{p=1}}^{\boldsymbol{p}} \boldsymbol{Ct\ Prestation}\ (€) - \sum_{\boldsymbol{CML=1}}^{\boldsymbol{CML}} \boldsymbol{CML}\ (€) - \sum_{\boldsymbol{pp=1}}^{\boldsymbol{pp}} \boldsymbol{Pertes\ de\ production}$$

i représente la pièce

p représente la prestation

pp *représente les pertes de production*

CML *: Cout de location du matériel lourd*

CP (v période) =vent sur la période, appliqué à la CP

Chacun de ces indicateurs est décrit dans l'ontologie.

2.3.1. *Le Chiffre d'affaires d'un parc éolien*

En fonction de la période évaluée et des paramètres de calcul qu'on choisit, on peut calculer le chiffre d'affaires issu des parcs éoliens. Le CA dépend des choix internes (notamment la courbe de puissance) et des mesures de vent prévues de l'exploitant . Le chiffre d'affaires théoriques peut donc être différent du chiffre d'affaires réalisé.

2.3.1.1. Le chiffre d'affaires théorique

C'est la production avec une disponibilité à 100% c'est- à-dire qu'il n'y a aucun temps d'arrêt sur la période. Sur une période choisie, on peut obtenir une production théorique de l'éolienne à partir des variables d'entrée que sont les données de vent mesurées sur le parc et la courbe de puissance réelle.

Les données de vent : ce sont les vitesses du vent mesurées par l'anémo-nacelle de l'éolienne. En cas d'indisponibilité, elles sont récupérées sur l'anémomètre de l'éolienne la plus proche. Si aucune donnée n'est fournie sur les éoliennes, ce sont les données du mât de mesure qui sont utilisées (Cf. Annexes).

La courbe de puissance (CP) : on distingue la courbe théorique fournie par le constructeur et la courbe de puissance « empirique » ou réelle reconstituée (CPR) grâce aux données de vent mesurées sur le site. Le productible théorique sur la période considérée est donc calculé en appliquant les données de vent mesurées à la courbe de puissance, le tout multiplié par le prix d'achat de l'électricité sur le parc :

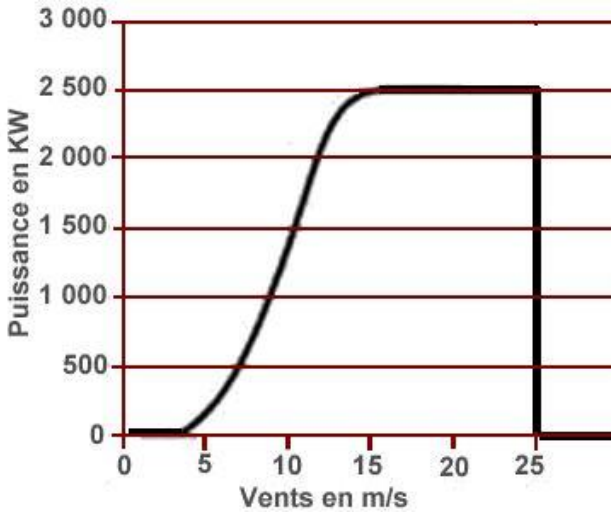


Figure 25 montre une courbe de puissance d'une éolienne de 3000 kW.

La courbe de puissance est une loi physique, résumant le comportement de l'éolienne, faisant le lien entre le vent arrivant sur la machine et la puissance électrique développée par cette dernière. Ce graphe montre une courbe de puissance d'une éolienne de 3000 kW. de la figure 2 montre une courbe de puissance d'une éolienne de 3000 kW. (Figure 25 montre une courbe de puissance d'une éolienne de 3000 kW.)

CA théorique $_{\text{période}}$ (€) = CP ($v_{\text{période}}$)* Prix kWh (€)

Pour obtenir la production, on effectue la somme des puissances de production en fonction des mesures de vents relevées sur la période considérée. Pour obtenir le CA, on multiplie ce résultat par le prix du kWh.

$$CA = [\sum_{d=1}^{d} CP(Vd) * Pd] * PrixkWh(€)$$

Avec :

Vd : mesure de vent en m/s

Pd : Puissance du vent associée à *Vd* en kWh

2.3.1.2. Le chiffre d'affaires réel

C'est la production réelle télé-relevée sur la période via le poste de livraison ERDF. Il s'agit de la production réellement vendue. Il peut y avoir un décalage entre le total des productions relevées sur les éoliennes et la production télé relevée sur le poste de livraison (propriété d'ERDF), dans ce cas la valeur de CA réel à considérer est celle du poste de livraison.

CA Réel $_{période}$ (€) =Prod au poste de livraison (kWh) * Prix kWh (€)

2.3.2. *Les pertes de production*

La perte de production se définit comme une production qui aurait dû être réalisée pendant la période où l'éolienne a été arrêtée ; elle est déduite avec la formule théorique du calcul de la production. La perte de production représente un manque à gagner qui peut être analysé selon ses causes. Les causes des pertes de production peuvent être regroupées selon quatre aspects :

- Les pannes : ce sont les arrêts de l'éolienne dus à une défaillance de l'éolienne
- Les arrêts des éoliennes planifiés pour réaliser les opérations de maintenance. Lorsque les arrêts de l'éolienne sont planifiés pour exécuter des interventions, le temps d'arrêt peut être estimé à l'avance.
- Les bridages : les nuisances sonores ou liées aux raisons environnementales peuvent exiger de l'exploitant qu'il réduise la production des parcs ou qu'il les arrête complètement ; dans ce cas, il en résulte un manque à gagner synonyme de perte de production.
- Défaut de performance : il arrive que l'éolienne soit disponible à produire tout en ne produisant pas à sa capacité maximale ; c'est le cas où des défaillances mineures (différentes pannes) réduisent la production des éoliennes mais n'entrainent pas leur arrêt. Cet état entraîne une perte de production conséquence d'un état interne de l'éolienne.
- Les pertes de production dues aux causes externes

2.3.2.1. Pertes de production dues aux pannes

Du déclenchement d'une panne jusqu'à la résolution de celle-ci, il s'écoule un temps qui peut être évalué en perte de production. L'indisponibilité de l'éolienne est totale pendant la durée de la panne. Le calcul de cette perte de production équivaut à estimer un montant du CA perdu sur cette période de panne.

PP $_{Panne}$ (€) : Perte de production associée à la panne

PP $_{Panne}$ (€) = CP (v $_{période\ de\ la\ panne}$) *Prix kWh (€)

Avec CP (v $_{période\ de\ la\ panne}$) : mesure de courbes de puissance associées aux mesures du vent.

L'arrêt de l'éolienne pour maintenance entraîne un manque à gagner pour l'entreprise pendant la période d'arrêt. Le temps de perte de production part de l'arrêt de l'éolienne jusqu'à sa remise en marche. Ce temps est composé de plusieurs « temps » dans l'ordre et dans le cas d'une seule panne :

1. **Le temps de « latence »** : qui part du moment d'arrêt de l'éolienne jusqu'au diagnostic ; il est directement lié au temps de réactivité du prestataire. Toutefois, il n'est pas à confondre avec « le temps d'attente opération » qui est un temps d'attente dû à l'impossibilité pour le prestataire d'intervenir sur l'éolienne pour exécuter une quelconque opération.
2. **Le temps de diagnostic** : c'est le temps de maintenance destiné à identifier la nature et les causes de la défaillance des composants de l'éolienne.
3. **Le temps d'attente pièce(s)** : c'est le temps écoulé lorsque le prestataire va chercher la pièce dans le local de stockage pour la ramener sur le parc ; ce temps peut être encore plus important lorsque la pièce a été commandée par l'exploitant CV et que le prestataire est en attente de livraison.
4. **Le temps d'intervention sur l'éolienne** : c'est le temps associé à l'ensemble des manipulations techniques destinées à remettre l'éolienne en marche.
5. **Temps d'attente d'opération de maintenance** ($T_{\text{attente opération}}$) : Dans certains cas, le prestataire est dans l'incapacité de se déplacer sur le parc pour réaliser l'opération de maintenance (diagnostic ou intervention) pour des raisons indépendantes de sa volonté (par exemple météo défavorable) ; dans ce cas, il s'écoule un temps de perte de production pour LCV.

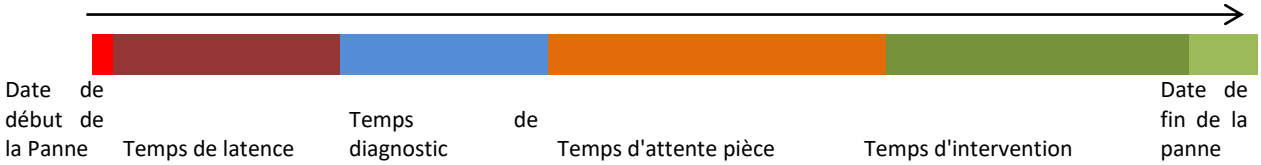


Figure 26 Différents temps qui composent la gestion d'une panne

Pour arriver aux calculs de ces différents temps pour chaque panne, il faudra renseigner pour chaque opération de maintenance les dates de début et de fin de chacune des étapes de la gestion de la panne (notamment date de début et date de fin).

La date de début de la panne (qui correspond à l'arrêt de l'éolienne) et sa date de fin (correspondant à la remise en marche de l'éolienne) peuvent être récupérées automatiquement.

Concernant la perte de production, le principe de calcul sur chaque temps est le même dès qu'on dispose de la durée totale de l'étape. Par exemple, le calcul de la perte de la production sur le temps de latence équivaut à :

$PP_{\text{temps de latence}}$ (€) = CP (v ($_{\text{temps de latence}}$)) *Prix kWh (€)

En règle générale, dès qu'on dispose de la **date de début** et **date de fin** de l'étape de l'opération, la perte de production est égale à :

$PP_{\text{étape}}$ = CP (v période $_{\text{(datefin Etape - dateDeb Etape)}}$ * Prix kWh (€)

2.3.2.2. Pertes de production dues aux arrêts planifiés

Il s'agit des arrêts effectués lors des opérations de maintenance préventive. Ces opérations de maintenance préventive sont en général réalisées pendant des périodes de vent faible afin de réduire au maximum les pertes de production.

Par arrêt planifié, on désigne aussi les arrêts de fonctionnement obligatoires fixés dans le cadre d'un plan de fonctionnement du parc. Le plan de fonctionnement du parc peut stipuler des heures de fonctionnement ; il est le résultat de réglementations imposées par les autorités administratives.

$PP_{\text{Arrêt planifié}}$ = CP (v période $_{\text{(durée arrêt planifié)}}$) * Prix kWh (€)

2.3.2.3. Pertes de production dues aux bridages

C'est une manipulation qui entraîne soit la réduction de la production de l'éolienne ou son arrêt complet. Le bridage est exécuté pour des raisons environnementales : nuisances sonores, présence d'oiseaux etc... Un parc bridé dispose du plan de bridage permettant de déclencher des arrêts entre des plages horaires spécifiques. Il s'agit donc d'une perte de production, conséquence soit d'une baisse de production, soit d'un arrêt de l'éolienne

La perte de production associée est la différence entre la production théorique possible (à partir des mesures de vent et de la courbe de puissance) et la production théorique après application du plan de bridage. Ainsi sur une période d'arrêt :

PP_{bridage} = CA théorique- CA après bridage

En cas d'arrêt complet de l'éolienne pendant la période de bridage, la perte de production peut se calculer à partir des données de vent recueillies sur l'éolienne.

PP_{bridage} = CP ($v_{\text{temps de bridage}}$) *Prix kWh (€)

2.3.2.4. Pertes dues au défaut de performance

Il s'agit d'un mode de fonctionnement où l'éolienne ne produit pas au maximum de sa capacité de production. L'éolienne n'est donc pas en arrêt mais certains de ses composants sont soit défaillants ou mal réglés. Le mode dégradé est lié à un défaut de performance. Nous avons identifié les causes suivantes :

- La mauvaise orientation de la nacelle : le système d'orientation de la nacelle (**Yawl**) [36] fait référence à l'orientation de celle-ci par rapport au vent. Le système d'orientation utilise des moteurs électriques pour faire pivoter la nacelle par le biais du pivot d'orientation de sorte à placer le rotor face au vent. Le dispositif d'orientation est contrôlé par un automate qui enregistre la direction du vent grâce aux signaux émis par la girouette. Il permet aussi de « verrouiller » l'éolienne dans l'axe du vent grâce à un frein. Un anémomètre et une girouette placés sur la nacelle permettent de mesurer en continu la force et l'orientation du vent. Ce sont ces mesures qui permettent d'orienter la nacelle. La mauvaise orientation de celle-ci par rapport au vent incident entraîne une perte de production partielle.
- La mauvaise orientation des pales : pour une bonne exploitation du vent, les pales des éoliennes sont articulées autour de leur axe longitudinal pour orienter leur profil suivant la force du vent. Le système d'orientation des pales (**Pitch**) des éoliennes a pour but de positionner les pales selon un angle d'attaque permettant de faire tourner le rotor de la façon la plus performante possible.

Lorsque le Pitch n'est pas bien orienté, le vent sous exploité entraîne un manque à gagner de production.

2.3.2.5. Les pertes de production imputables aux causes extérieures à LCV

Il s'agit des pertes de production issues des arrêts causés par des facteurs extérieurs à LCV. On peut regrouper ces causes sur trois axes : les cas de force majeure, le fonctionnement dégradé dû aux causes internes à l'éolienne et les coupures réseaux.

- Cas de force majeure : la force majeure désigne un événement à la fois imprévu, insurmontable et indépendant de la volonté d'une personne. Juridiquement, la force majeure est susceptible de dégager une personne de sa responsabilité ; d'ailleurs, la durée de la force majeure n'est pas prise en compte dans le temps d'indisponibilité lors du calcul de l'indicateur de disponibilité de l'exploitant qu'on désigne « Disponibilité LCV » qui permet de mesurer le temps de fonctionnement garanti par LCV. (Cf. **Indicateurs de maintenance Disponibilité LCV**). Elle est considérée comme une cause de perte de production indépendante de l'action de LCV. Elle part du moment de déclenchement de l'événement jusqu'à sa fin.

Exemples de cas de force majeure pour un parc éolien : inondations, intempéries (neige, pluie), perturbation du trafic routier, foudre, tremblement de terre, incendie, guerre etc...

$PP_{\text{Force majeure}}$ = CP ($v_{\text{Force majeure}}$) *Prix kWh (€)

Coupures du réseau ERDF

Il arrive que le réseau électrique soit en incapacité d'absorber la production réalisée par les parcs ; les éoliennes ne produisent donc pas d'électricité. Les causes de ce type de perte de production sont multiples ; il s'agit de :

- Coupures du réseau pour travaux
- Limitation de la charge du réseau
- Pannes sur le réseau
- Coupures mineures nécessitant un réarmement à distance.

Pour mesurer ces pertes de production, on compare à une date donnée, la production totale de toutes les éoliennes au niveau des automates à la production télé relevée niveau du poste de livraison d'électricité.

$PP_{\text{Coupures Réseau ERDF}}$ = CP ($v_{\text{Coupures Réseau ERDF}}$) *Prix kWh (€)

2.3.3. *Le Coût de l'O&M*

L'objectif en calculant ce coût est d'évaluer dans sa totalité le coût de la maintenance des parcs et de le confronter au chiffre d'affaires réel. Le coût de l'O&M regroupe les charges de maintenance qu'on a identifiées dans le cadre de la FC.

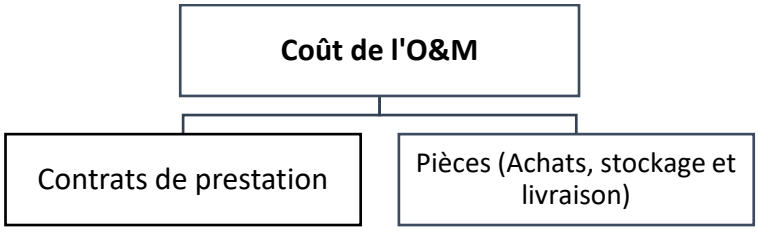


Figure 27 Composition du coût O&M

A l'échelle d'une intervention le coût de l'O&M regroupe le coût de la prestation et le coût de revient de la pièce. C'est un total des frais directs engagés pour remettre la pièce en état de fonctionnement normal.

Coût O&M (€) = ∑ $CR_{pièce}$ (€) +Ct Prestation (€)

Avec

$CR_{pièce\ i}$ (€) : Coût de revient de la pièce i

Ct Prestation : Coût des prestations d'intervention.

Le coût de la prestation d'intervention (Ct Prestation)

On distingue deux types de prestation : contractuelles et hors contrat. Les prestations contractuelles font référence à un contrat de maintenance sur une ou plusieurs années. Les prestations hors contrat sont réalisées pour résoudre une panne à un moment donné.

La prestation dans le cadre d'un contrat de prestation

On distingue deux types de contrat de prestation selon le niveau de garantie :

1. Le contrat de maintenance en « **full scope** » : le prestataire de maintenance s'occupe de toute la maintenance préventive, corrective et dispose aussi des pièces de rechange ; LCV ne fournit pas les pièces et paie une prestation complète. Le prestataire réalise toutes les opérations de maintenance nécessaires quelle que soit leur importance pour garantir le taux disponibilité du parc fixé dans le contrat.

2. Le contrat en **maintenance pilotée** : la maintenance du parc est assurée par un prestataire et LCV fournit les pièces importantes dont le prix est supérieur à un montant forfaitaire relativement faible (il est de l'ordre de 60€ pour LCV). Il comprend tous les frais associés à la mission et en particulier, sans que cette liste ne soit exhaustive, les frais de main d'œuvre, de déplacement, d'entretien des véhicules, de renouvellement du petit outillage, des consommables et pièces détachées dont le montant est inférieur à 60€.

Sont exclues du cadre contractuel du forfait annuel les interventions lourdes nécessitant l'intervention d'une grue ou d'une nacelle élévatrice (correctif de pale, remplacement du multiplicateur, génératrice, transformateur…)

La prestation est un forfait payé au sous-traitant chargé de la maintenance. Elle est composée de :

- **D'un montant fixe annuel** réévalué chaque année à partir d'un coefficient de révision défini dans le contrat.

- **D'une part variable composée de** :
    - Sanctions financières si les clauses du contrat ne sont pas respectées. Par exemple, le non-respect des règles d'hygiène et de sécurité entraîne une sanction de 0,5% du montant du contrat de maintenance. Les sanctions se cumulent tout au long de l'année et leur compte exact est effectué lors du versement du solde.
    - Un bonus/malus calculé par point de disponibilité gagné/perdu sur le parc : en cas de bonus (disponibilité réelle > disponibilité contractuelle), LCV paie un supplément au prestataire ; en cas de malus, le montant du total à payer par LCV est déduit.

Par exemple, le contrat de prestation de maintenance sur un parc définit comme objectif le taux de disponibilité P_{resta} égal à 96,50% ;

A la fin de l'année, le calcul du bonus/malus est fait selon les conditions d'applicabilité résumées dans le tableau suivant :

Conditions	Application du bonus	Aucun bonus/malus	Malus
Cas 1 : Disponibilité Presta≥ 96,50% Et toutes les éoliennes ayant un $T_{DPresta}$ ≥94%	X		
Cas 2 : Disponibilité Presta≥ 96,50% Et toutes les éoliennes ayant un P_{resta} <94%		X	
Cas 3 : Disponibilité Presta<96,50%			X

Dans le cas de ce parc, les malus /bonus sont calculés en comparant le taux de disponibilité du parc et le taux fixé au prestataire ; pour obtenir le montant du bonus/malus, la différence du nombre de points entre ces deux taux est multipliée par un montant forfaitaire défini (environ 3000 € par point d'écart entre les deux taux de disponibilité). Le montant des 3000 euros a été négocié avec le prestataire.

Dans l'évaluation de la prestation associée à l'intervention, le chiffre qui nous intéresse est le coût de la prestation individuelle. Trois approches sont envisageables :

1. **Le mode de calcul à partir d'un forfait horaire** par prestation : une première étape est de fixer un prix horaire global par contrat de prestation. Ce coût horaire serait un montant regroupant tous les postes nécessaires à la maintenance (livraison des pièces, intervention) sur une heure. Il faut ensuite multiplier ce coût horaire identifié par le nombre d'heures d'intervention pour avoir le prix de la prestation.

   Prix de la prestation (€) = $forfait\ horaire * Tps\ d'intervention$
   L'inconvénient de cette méthode est que le montant de la prestation n'évolue pas en fonction de la panne. De plus, cette méthode a pour inconvénient de ne pas prendre en compte l'importance de l'intervention.

2. **Le forfait par prestation** : une autre approche est de définir un montant forfaitaire. C'est un montant basique fixé à l'avance qu'on pourra ensuite faire varier en fonction des pièces utilisées

lors de l'intervention. Pour obtenir ce montant horaire, nous avons proposé de diviser le montant du forfait d'abord par le nombre d'éoliennes puis par un nombre d'opérations prévues par éolienne.

Pour chaque prestation, on obtiendra un coût de prestation par éolienne calculé par :

$$Ct\ prestation\ = \frac{Montant\ du\ contrat\ annuel}{nbre\ d'éoliennes\ du\ parc} * \frac{1}{Nbre\ d'opérations}$$

Le nombre d'opérations (*Nbre d'opérations*) est soit estimé à l'avance, soit pris de l'année précédente. Ainsi, le prix de prestation est égal à un « Ct prestation » en partant de l'hypothèse que les pièces ont toutes la même importance.

Toutefois l'hypothèse de donner la même valeur à toutes les pièces quelle que soit l'intervention peut se révéler simpliste car remplacer un multiplicateur n'a pas la même « valeur » que remplacer une carte électronique. Il faut donc relier l'intervention avec l'importance de la pièce qui est utilisée. Pour cela, nous avons proposé de réaliser une table dans laquelle sont listées les pièces des éoliennes avec leur coefficient d'imputation respectif (**Coef. Pièce**). Ce coefficient traduirait l'importance de la pièce au sein de l'éolienne. Les valeurs de ces coefficients sont données par rapport à l'expérience de la direction de l'exploitation.

Pièce	Valeur (**Ct pièce**)	Coefficient (**Coef pièce)**
Moteur IP55	228, 55 €	0,20
Support pour disque de frein	103,22 €	0,09
Carte électronique	229 €	0, 21

Pour obtenir le Coût réel de la prestation, on applique au Ct prestation précédent un coefficient d'imputation Coef (Pièce) qui rend compte de la difficulté à installer la pièce. On obtient un coût de la prestation avec la formule suivante :

Ct Prestation (€) $_{pièce(s)}$ = Ct prestation (€) (1+ ∑ Coef (Pièce(s))

Exemple : Considérons le changement des deux pièces suivantes : une carte électronique et un support de frein. La valeur du Ct prestation basique de 300€. On obtiendrait un coût de prestation incluant les pièces équivalent à :

Ct Prestation (€) $_{pièce(s)}$ = 300 (1+0,21+0,09) =390 €.

Dans le cadre de cette thèse, cette hypothèse n'a pas été retenue car elle demande une profonde connaissance des pièces et les exploitants font le choix d'avoir différents modèles de machines ; il faut y consacrer un temps important sans compter le risque que les machines évoluent.

3. **La recherche du Ct Presta à partir du taux** de disponibilité convenu dans le contrat de prestation. En effet, le contrat de prestation prévoit un taux annuel de disponibilité que le prestataire doit garantir par éolienne et par parc. En dessous de ce taux fixé, le prestataire paie des pénalités précisées dans les clauses du contrat.

Exemple : Le contrat de maintenance du parc de Névian fixe un taux de disponibilité ($\mathbf{T_{Dpresta}}$) de 96,5% sur tout le parc. Le taux d'indisponibilité sur une période d'un an est : $T_{Indpresta}$=100-96,5=3,5%.
Qui peut être ramené en nombre de jours :
Nbre Jours $_{indpresta}$= 3,5% *360 =12,6 jours

Ce nombre de jours obtenu correspond à la durée totale des interventions que devrait réaliser le prestataire, pour un montant total égal à celui du contrat (9000 €). Le ratio 9000/12.6 nous donne le coût d'intervention moyen à la journée, ce qui permet d'obtenir le coût de n'importe quelle prestation d'une durée donnée :

CtPresta = $\frac{Durée\ intervention}{12{,}6} * 9000\ €$

Formule générique :

CtPresta = $\frac{\text{DateFin Intervention} - \text{DateDebIntervention}}{\text{Nbre Jours indpresta}} * \text{Montant Contrat}\ €$

Il peut arriver que la durée de l'intervention dépasse la durée totale de l'indisponibilité tolérée sur l'année, on dépasse la limite d'indisponibilité fixée dans le contrat. Dans l'exemple donné, ce cas survient lorsque la durée de la panne est supérieure à 12,6 jours. Alors la disponibilité réelle du parc baisse et affecte le contrat.

A la fin de l'année, au moment du calcul de disponibilité réalisée sur le parc, on compare le taux réel de disponibilité au taux fixé dans le contrat. Lorsque le taux réel est plus faible que celui fixé dans le contrat, le prestataire est sanctionné par des pénalités. Ces pénalités sont censées couvrir la perte de production associée à la baisse de disponibilités.

Dans notre cas, si la somme des durées d'interventions est supérieure au nombre de jours d'indisponibilité, une pénalité d'un montant fixé dans le contrat multiplié par le nombre de point d'écart est appliquée au prestataire.

Si (∑**Durée d'intervention)**> **Nbre Jours indpresta ➔ Pénalités*($\mathbf{T_{Indpresta}}$ - Taux réel de dispo)**

Cet écart de point de disponibilité en fin d'année sera utile dans le cadre d'un bilan annuel sur les coûts de prestation.

La prestation hors contrat

Les prestations ponctuelles effectuées hors contrat pour des opérations exceptionnelles sont directement facturées à la direction d'exploitation et maintenance. A l'apparition de la panne, les chargés de maintenance choisissent entre plusieurs devis fournis par les prestataires. Le coût de la prestation est donc connu dès la validation du devis par le chargé de maintenance. Il peut être soit horaire soit forfaitaire selon le nombre d'heures/de jours à passer. Les pièces sont à la charge de LCV ; en général ce sont des pièces dont le prix est supérieur à 60 euros.

Le coût de la pièce

C'est le coût de la pièce au moment où elle sort du stock du LCV car même si, pour une intervention, la pièce doit être utilisée tout de suite, elle est enregistrée dans le stock. Dans le cadre de prestations définies dans le périmètre contractuel, seules les pièces au-delà d'un montant forfaitaire relativement faible (60€) peuvent provenir du stock de LCV ; les pièces courantes dont la valeur est en dessous du seuil sont fournies par le prestataire.

Il existe quatre modes de calcul pour estimer le coût de la valeur de la pièce en sortie de stock :

- **FIFO** : Premier Entré - Premier Sorti (First In – First Out) : elle est appelée méthode d'épuisement des lots. La méthode FIFO est plus utilisée pour la valorisation des sorties de produits périssables dont la longue conservation est déconseillée à cause de la perte de valeur ou de qualité (produits laitiers, produits agroalimentaires…). Cependant, son principal inconvénient est qu'elle répercute avec retard les variations de coût ou de prix réel des marchandises à l'achat.

Exemple :
La valorisation du stock selon la méthode FIFO se fait de la façon suivante :

- Achat 1 en date du 1er Août 2014 : 100 pièces à 1€
- Achat 2 en date du 22 Septembre 2014 : 100 pièces à 2€

Sortie des pièces effectuées le 13 Octobre 2015 : 125 pièces soit 100 pièces à 1€ et 25 pièces à 2€. Il reste donc en stock 75 pièces à 2€. La règle consiste à sortir en premier les pièces achetées les premières avec leurs tarifs associés.

- **LIFO** : Dernier Entré - Premier Sorti (Last In – First Out) : Contrairement à la méthode FIFO, la méthode du dernier entré, premier sorti consiste à calculer la valeur des consommations en supposant que les lots entrés les derniers seront sortis les premiers. En se référant particulièrement à la fonction technique des stocks, il est évident que l'utilisation de cette méthode de valorisation n'est pas simplement un jonglage dans les écritures comptables afin de se mettre à l'abri des variations des prix. Le stockage de certaines catégories de marchandises obéit strictement à cette règle. Car plus leur séjour dans les aires de stockage est long, plus les produits acquièrent de la qualité et de la valeur (vins par exemple).

  La valorisation du stock selon la méthode LIFO se fait de la façon suivante :

  - Achat 1 en date du 1er Août 2014 : 100 pièces à 1€
  - Achat 2 en date du 22 Septembre 2014 : 100 pièces à 2€

Sortie effectuée le 13 Octobre 2015 : 125 pièces soit 100 pièces à 2€ et 25 pièces à 1€. Il reste donc en stock 75 pièces à 1€. On sort en premier les dernières pièces achetées avec leurs tarifs associés.

- **NIFO** : (Next in First Out) la méthode de la valeur de remplacement : Adaptée pour la valorisation des stocks de spéculation, cette méthode consiste à évaluer les sorties à leurs valeurs de remplacement. Pour valoriser les sorties et les existants en stocks, la valeur de référence sera par exemple le prix de la dernière facture ou le cours du jour. Quelles que les soient les valeurs et les quantités entrées, le prix à considérer est le prix sur le marché lors de la sortie du stock :
  - Achat 1 en date du 1er Août 2014 : 100 pièces à 1€
  - Prix d'un marché au 13 Octobre 2015 : 1,5€

Prélèvement effectué le 13 Octobre 2015 : 80 pièces à 1,5€. **Il reste donc en stock 20 pièces à 1,5€.**

- **PUMP** : Prix Unitaire Moyen Pondéré : il est le plus adapté au contexte industriel ; Adapté aux matières non périssables (marchandises pouvant faire l'objet d'un stockage sur de longues périodes), la méthode du PUMP se présente sous deux variantes :
    - La méthode du PUMP périodique. Les sorties sont évaluées à un coût unitaire moyen pondéré des entrées marchandises + stock initial, calculé sur une période mensuelle, trimestrielle ou annuelle, suivant le choix de l'entreprise.

$$PUMP\ (sur\ la\ Période) = \frac{(Stock\ initial + Entrées\ de\ la\ période) en\ €}{(Stock\ initial + Entrées\ de\ la\ période) en\ quantités}$$

    - La méthode du PUMP après chaque entrée de pièces dans le stock. Les sorties sont évaluées au dernier coût unitaire moyen pondéré calculé après chaque entrée de marchandise.

$$PUMP(Après\ entrée) = \frac{(Stock\ initial + nouvelle\ Entrée) en\ valeur}{(Stock\ initial + nouvelle\ Entrée) en\ quantités}$$

Le montant de la pièce est fourni par le biais de la GMAO en temps réel. Le mode de calcul du coût de la pièce retenue par LCV est le PUMP après chaque entrée. Le Cout de la pièce se calcule donc par :

$$Ct\ pièce\ i\ (€) = \frac{(Stock\ initial + nouvelle\ Entrée) pièce\ i\ en\ valeur}{(Stock\ initial + nouvelle\ Entrée) pièce\ i\ en\ quantités}$$

i se réfère au type de pièce

Exemple : PUMP (après entrée) pour un boulon :

- Stock initial 1er Août 2014 : 100 pièces à 1€
- Achat en date du 22 Septembre 2014 : 100 pièces à 2€

$$Ct\ boulon\ (€) = \frac{(100€ + 200€)}{(100 + 100)} = 1{,}5€$$

Le Coût de sortie de la pièce est donc de 1,5€ au 22 Septembre 2014.

Le coût de Livraison ($CL_{Pièce}$)

Le coût de livraison représente la dépense nécessaire pour acheminer une pièce du local de stockage au parc dans le cadre d'une intervention. On peut différencier les coûts de livraison en fonction du cadre de l'intervention :

- Dans le cadre d'une prestation définie dans le périmètre d'un contrat de prestation, lorsque la pièce est récupérée en stock par le prestataire, on ne parle pas de coût de livraison On suppose qu'il est englobé dans le coût payé par l'exploitant dans le cadre du contrat de prestation.

- Pour une intervention hors contrat, la livraison est facturée à l'exploitant directement par le transporteur. L'intérêt du coût de livraison est réel pour les interventions hors contrat parce qu'elles sont souvent réalisées avec des pièces lourdes nécessitant un transport spécifique. Ce coût sera intégré systématiquement s'il est connu pour les interventions hors contrats.

2.3.4. *Le coût de location du stockage (Loyer Pièce)*

Les pièces sont stockées dans un local loué par LCV. Ce local sert à alimenter plusieurs parcs en même temps et il est souvent défini par zone d'exploitation. Le montant de loyer est enregistré dans la GMAO de LCV. Lorsqu'une pièce sort du stock dans le cadre d'une intervention sur un parc, il faut lui imputer le coût de location au prorata du nombre de mois de stockage dans le local. Avant d'obtenir ce coût par pièce, nous avons souhaité relier par une formule le loyer du local de stockage à chacun des parcs de la zone en fonction de leurs caractéristiques. En effet le local de stockage étant associé à plusieurs parcs, les fréquences d'interactions entre les parcs et le local peuvent être différentes.

Pour obtenir cette quote-part du loyer par parc, plusieurs modes de calcul peuvent être utilisés :

- La puissance du parc installé : dans cette approche, on estime que le parc ayant le plus d'interactions avec le stock est celui sur lequel il y a le plus de MW installés. On estime que le nombre de pannes est le plus important ($\frac{Nb\ MW\ Parc}{Nb\ MW\ Zone} * \boldsymbol{Loyer\ mensuel}$)
- L'ancienneté du parc demandeur : plus un parc est vieux, plus le nombre de pannes est censé être élevé et plus l'interaction avec le stock est forte. On procède par une règle de trois en rapportant la durée de vie du parc[5] sur la durée de vie du stock ; $\frac{\boldsymbol{Durée\ de\ vie\ du\ parc}}{\boldsymbol{Durée\ de\ vie\ du\ stock}} * \boldsymbol{Loyer\ mensuel}$
- Un loyer moyen : ici on estime que chaque parc « paye » une part équitable du loyer qui équivaut à une moyenne ($\frac{\boldsymbol{Loyer\ mensuel\ stock}}{\boldsymbol{NbParcsZone}}$)

Ces trois modes de calcul établissent un rapport entre le parc et la zone d'exploitation sur un critère spécifique qui peut être discutable selon différents points de vue. Pour simplifier, on retient le rapport entre le coût de la pièce et la valeur du stock.

La formule du loyer de la pièce revient donc à :

$$\boldsymbol{Loyer\ (Pièce\ i)} = \frac{\boldsymbol{DateFinAttentePièce\ i - DateEntrée\ \ Pièce\ i}}{\boldsymbol{30}} * \frac{\boldsymbol{CtPièce\ i}}{\boldsymbol{Valeur\ totale\ du\ stock}}$$

Le coût de revient de la pièce ($CR_{pièce}$)

Le coût total de revient de la pièce est sa valeur à la sortie plus le coût de la livraison sur site. On peut considérer ce coût comme le total des dépenses engendrées pour acheter cette pièce, la stocker puis l'amener sur le parc pour l'intervention. Le montant dépend du type d'intervention réalisée :

- Pour une intervention inscrite dans le cadre contractuel de la prestation, la livraison est déjà comprise dans le forfait.

$CR_{pièce\ i}$ (€) = $Ct_{pièce\ i}$ + Loyer $_{pièce\ i}$

[5] Durée de vie à partir de sa date de mise en service

- Pour une intervention hors du périmètre convenu avec le prestataire, la livraison de la pièce et la location du matériel lourd (s'il a été loué pour l'intervention) viennent en complément du coût initial

$$\mathbf{CR_{pièce\ i}\ (€) = Ct_{pièce\ i} + Loyer_{\ pièce\ i} + CL_{Pièce\ i} + CML}$$

Avec

$CR_{pièce\ i}$: Coût de revient de la pièce **i**

$Ct_{pièce\ i}$: Valeur de la pièce **i** en sortie de stock de l'exploitant

Loyer i : part de loyer de la pièce i

$CL_{Pièce}$: Cout de la livraison (pour les opérations hors contrat)

CML : Coût du matériel lourd si nécessaire pour l'intervention

Le coût du matériel lourd (CML)

Il s'agit de la location des grues et matériels lourds qui peuvent être utilisés lors d'interventions lourdes. Les interventions lourdes sont toujours considérées comme des prestations hors contrat. La location du matériel dans ce cadre est directement facturée à LCV et est prise en compte dans la GMAO.

Les charges de personnel

Les charges de personnel sont les frais de personnel (salaires, charges patronales) qui sont payées aux membres de services associés à la maintenance des parcs éoliens (Direction d'exploitation). Ce sont des frais sur lesquels nous ne nous appesantissons pas dans l'étude actuelle.

2.3.5. *Les indicateurs de la maintenance*

En complément de la fonction Coût et des indicateurs associés, d'autres indicateurs peuvent donner des informations sur les opérations de maintenance et leurs évolutions dans le temps. Les valeurs de ces indicateurs informent sur la fréquence et la qualité des interventions réalisées.

La disponibilité

La disponibilité est un ratio qui mesure la performance d'un équipement à produire un bien pendant une période. Elle s'exprime généralement en pourcentage. Elle peut être temporelle c'est-à-dire exprimer la capacité de l'équipement à être en état de produire, ou énergétique c'est-à-dire exprimer un niveau de production d'énergie (dans le cas où l'électricité est le bien produit). Il existe plusieurs types de disponibilités calculées à LCV dans l'application XWIND selon leurs types.

Les disponibilités temporelles

La disponibilité temporelle permet de connaitre le ratio correspondant au temps de fonctionnement de l'éolienne. C'est l'aptitude d'un équipement à être en état d'accomplir une fonction donnée dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs soit assurée [37]. Le pourcentage de disponibilité permet de déduire la perte de production globale associée.

La formule générale à prendre en compte pour une disponibilité temporelle est :

$$Type\ de\ dispo\ sur\ une\ période\ (en\%) = \frac{Type\ de\ Temps}{Temps\ total\ de\ la\ période} * 100$$

La disponibilité brute

Elle ne tient compte d'aucun filtre ; elle permet juste d'avoir une information sur la disponibilité de l'éolienne ou du parc à produire quelle que soit la période. Ici, le type de temps au numérateur est le *Temps de fonctionnement*

$$Dispo\ brûte\ (en\%) = \frac{Temps\ de\ fonctionnement\ \ de\ l'éoliennne}{Temps\ total\ de\ la\ période} * 100$$

La disponibilité LCV

C'est la disponibilité garantie par LCV pour l'exploitation de ses parcs. A partir du temps de fonctionnement de l'éolienne, on soustrait les éléments suivants pour avoir le type de temps : *Temps DispoLCV* :

1. Les durées de sinistre,
2. Les temps pendant lesquels les conditions climatiques rendent impossible l'accès aux parcs pour réaliser les opérations de maintenance,
3. Les coupures réseaux,
4. Les arrêts courts de l'éolienne (arrêt et redémarrage automatique de l'éolienne pour raisons de sécurité).

$$Dispo\ LCV(en\%) = \frac{Temps\ DispoLCV}{Temps\ total\ de\ la\ période} * 100$$

La disponibilité du sous-traitant dite « disponibilité sous-traitant »

La valeur de disponibilité du parc à respecter est définie dans le contrat de prestation signé avec l'entreprise prestataire. Pour le calcul de la disponibilité, le temps pris en compte (*Temps Dispo Presta*) comprend le temps utilisé pour le calcul de la disponibilité LCV (*Temps DispoLCV*,) auquel on soustrait les temps d'attente des pièces dont le poids est supérieur ou égal à une tonne.

Temps Dispo Presta= Temps Dispo LCV-Temps Attente pièce (Poids supérieur à une tonne)

Cette disponibilité est pertinente dans le calcul d'un MTTR (Mean Time To Repair) qui évalue la capacité de réactivité du prestataire à garantir une certaine disponibilité.

$$TDpresta\ (en\%) = \frac{Temps\ Dispo\ Presta}{Temps\ total\ de\ la\ période} * 100$$

La disponibilité « constructeur »

Les constructeurs effectuent leur calcul de disponibilité avec ces deux compteurs (le « Grid » et le « turb »). Le « Turb » donne le temps où l'éolienne est en fonctionnement (toujours pour le constructeur), c'est-à-dire que certains défauts ne sont pas pris en compte dans le calcul de la disponibilité (exemple : vitesse de vent élevée, température ambiante élevée, temps d'orientation etc…). Ensuite le Grid qui donne le temps de présence réseau (les coupures réseau n'étant jamais imputées au constructeur...)

$$Dispo\ Constructeur\ (en\%) = \frac{Compteur\ Turb}{Compteur\ Grid}$$

La disponibilité énergétique

Elle montre les capacités de production de l'éolienne ou du parc. Elle mesure la production réalisée par rapport à la production théorique (qui aurait été réalisée si les machines avaient été disponibles).

$$Dispo\ énerg\ (en\%\ durant\ la\ période\ ) = \frac{Production\ réelle\ sur\ la\ période}{Production\ théorique\ sur\ la\ période} * 100$$

Exprimée en fonction des pertes de production :

$$Dispo\ énerg\ (en\%) = 100 - \frac{\sum PP}{Production\ théorique}$$

Dans le cadre de la FC, elle permet de mettre en balance le niveau de production atteint et les pertes de production durant la période d'analyse.

Les ratios de maintenance

Ils permettent de mesurer un indicateur et de le comparer avec les objectifs de départ. Ce sont des taux de réalisation d'objectif. Nous évoquerons d'abord les principaux indicateurs de maintenance industrielle puis nous proposerons un autre avec le Coût O&M.

Le MTBF (Mean Time Before Failure)

C'est un indice de fiabilité de l'éolienne. Il désigne le temps moyen de fonctionnement entre des défaillances consécutives. Sur une période passée, si le calcul du MTBF est effectué alors que le système est en panne, le MTBF se calcule par :

$$MTBF(période) = \frac{Temps\ total(période) - \sum_{n=1}^{n} durées\ des\ pannes}{Nombre\ de\ pannes\ \ n(période)}$$

Exemple :

Supposons que

- La disponibilité brute de l'éolienne $TDpresta$ est estimée à 95% (Valeur de disponibilité définie dans le contrat)
- Le nombre de pannes *n* est estimé à 2.
- La période d'analyse considérée est de 30 jours

Dans ce cas, il est possible de prévoir le MTBF sur la période.

Le calcul du MTBF visé sur la période de maintenance s'effectuera de la manière suivante :

Temps de bon fonctionnement total= Dispo brute * Période Considérée = 0 ,95*30=28,5 jours

D'où : $MTBF = \frac{28,5}{2}$= 14,25 jours

Ainsi, au début du contrat, on fixe à 14,25 jours la durée moyenne entre les pannes gérées par le prestataire. L'objectif étant de maximiser la disponibilité de l'éolienne, plus le MTBF est important plus la disponibilité sera élevée parce que l'intervalle de temps entre deux pannes sera plus élevé.

MTTR (Mean Time to Repair)

C'est un indicateur de maintenabilité. Il désigne le temps moyen de réparation des pannes et se calcule en additionnant les temps actifs de maintenance (quand le prestataire exécute réellement des actions de maintenance) et les temps annexes de maintenance (temps pendant lesquels il est en attente d'exécution des actions de maintenance : temps de latence par exemple), le tout est divisé par le nombre d'interventions.

$$MTTR(période) = \frac{\sum_{m=1}^{m} durées\ des\ interventions}{Nombre\ d'interventions\ \ m}$$

Dans une stratégie d'optimisation de la FC, le MTTR peut servir à analyser la réactivité du prestataire de maintenance ou à réévaluer le contrat de maintenance. La disponibilité à prendre en compte est la disponibilité « sous-traitant » car elle est directement liée au rythme d'intervention. A titre d'exemple, dans une logique de simulation, on peut convenir, par exemple, avec le prestataire, d'une durée moyenne de réparation des pannes de 5h.

Supposons qu'à l'échelle d'une éolienne, nous disposons des informations suivantes :

Période considérée	30 jours=720h
Disponibilité « Sous-traitant »	96%
Temps d'arrêt total	(1-0,96) *720=28,8h
MTTR	5h

A partir de ces chiffres, il est possible de déduire le nombre d'interventions maximum possible que le prestataire peut exécuter en respectant le MTTR initial moyen :

$$5h = \frac{28,8h}{Nombre\ d'interventions\ \ m}$$

$$m = \frac{28,8h}{5h} = 5,76$$

Nombre d'interventions maximum sur 30 jours = 6 interventions avec une durée moyenne de 5 heures.

Début d'utilisation	Défaillance		Réparation		Défaillance
Temps					
MTBF		MTBF			
MTTR					

Figure 28 Ratios et temps

On peut déduire la relation entre le taux de et les indicateurs du MTBF et du MTTR à travers la formule :

$$TDpresta\ (en\%)\ = \frac{Temps\ d'utilisation\ et\ temps\ de\ latence}{Temps\ d'utilisation\ et\ temps\ de\ latence + temps\ de\ maintenance}$$

$$TDpresta\ (en\%)\ = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Le Coût Moyen de fonctionnement

Il désigne le rapport entre la totalité des dépenses engagées en O&M sur le chiffre d'affaires réel. C'est un indicateur qui informe de façon synthétique sur la manière dont l'ensemble des coûts liés à la maintenance est réduit et dont la production est augmentée (Chez [38] c'est la notion de service rempli augmenté) Dans le cadre de LCV, il s'agira de confronter les coûts de maintenance (Coût O&M) et la production.

$$CMF = \frac{Co\hat{u}t\ O\&M}{CA\ th - PP}$$

L'indicateur peut servir à faire un choix à la suite d'un incident sur le matériel. Il faut alors décider entre une réparation coûteuse et un remplacement. Ceci permet de comparer le montant des dépenses et la production qui pourrait être réalisée.

2.3.6. *Stratégies d'optimisation de la fonction Coût.*

La fonction Coût de la maintenance dans le contexte LCV est issue du chiffre d'affaires théorique, auquel on retire les pertes de production et les coûts engendrés durant cette période.

Un premier objectif est d'avoir une fonction Coût toujours positive sur la période considérée : période sur laquelle plusieurs incidents se sont déroulés. Deux stratégies peuvent guider la maximisation de cet indicateur. Il s'agit soit d'une production maximale (conséquence d'une disponibilité des éoliennes), soit d'une limitation des charges de l'O&M ou soit d'une stratégie hybride où on adapterait les coûts de maintenance en fonction du chiffre d'affaires visé.

- **Stratégie de maximisation de la production** : c'est une stratégie d'abord orientée sur le chiffre d'affaires. Elle se traduit par une disponibilité maximale des parcs ; cela induit qu'il n'y ait pas forcément de limitation des charges de la maintenance. Selon cette stratégie, nous obtiendrons des productions élevées, mais pour un montant des charges qui pourrait s'avérer important.
- **Stratégie de réduction des charges** : une autre stratégie peut être de réduire au maximum les charges de maintenance. Il s'agit d'abord d'influer essentiellement sur l'optimisation des opérations d'intervention et de la gestion des stocks. A l'inverse de la première stratégie, l'exploitant choisit de sécuriser le montant des charges. L'inconvénient est une baisse de la production donc du chiffre d'affaires. En effet, réduire les charges de maintenance a pour conséquence d'intervenir moins souvent ou de manière partielle sur les machines, donc augmenter

la probabilité que ces dernières tombent à nouveau en panne, ou qu'elles produisent en mode dégradé (en sous-performant).

- **Stratégie hybride** : il s'agit ici d'agir sur les deux composantes de la fonction Coût ; en fonction d'un niveau de production souhaité, on module les coûts de maintenance. C'est une stratégie d'équilibre qui tient compte des exigences de disponibilités (donc du chiffre d'affaires éventuel) et des contraintes de coûts.

Le choix de la stratégie dépendra de la valeur de Fonction Coût en cohérence avec la stratégie globale de LCV. L'objectif de la Fonction Coût est de mettre en valeur des indicateurs afin d'évaluer ou de construire une stratégie complète d'O&M [39]. Elle permet de quantifier l'impact des stratégies adoptées sur la production des parcs : gains en production, baisse des coûts de maintenance, optimisation des stocks et adaptation des coûts de prestation. Il est aussi possible d'analyser la fonction Coût par objectifs :

- Objectif de disponibilité maximum : L'objectif est de garantir une disponibilité maximum des éoliennes, ce qui implique une stratégie de maintenance constante donc des coûts O&M importants et pas forcément tous pertinents.
- Objectif de production énergétique : L'objectif est de produire le maximum d'électricité pendant les périodes de grands vents. On axe la maintenance pour qu'elle soit effectuée pendant les périodes de « vents faibles ». C'est une logique opportuniste qui nécessite une forte réactivité des prestataires.
- Objectif de rationalisation des coûts O&M : La logique dominante dans cet objectif est de réduire les coûts quitte à ce que la production en pâtisse. La valeur de la Fonction Coût peut aussi augmenter si on baisse les Coûts O&M mais, cette stratégie rentrerait en contradiction avec la politique générale de LCV qui est d'accroître son productible en optimisant ses coûts de production y compris les Coûts O&M.

L'efficacité des stratégies de maintenance est complexe à mesurer pour l'exploitant éolien. Dans cette optique, nous avons essayé de développer la notion de performance financière. Elle revêt un aspect capital dans le cadre d'une analyse et d'un classement de la rentabilité de plusieurs parcs même si ceux-ci n'ont pas la même taille (puissance des machines, nombre d'éoliennes et budget de maintenance). Dans l'ontologie donc, la performance financière et la disponibilité financière sont des indicateurs d'analyse de parcs qui permettent d'observer et de comparer les parcs entre eux.

Conformément à notre objectif initial qui est de simuler l'activité de parcs afin déterminer la meilleure stratégie de maintenance, notre approche a été d'approfondir le concept de FC. On part de l'hypothèse selon laquelle une stratégie de maintenance est d'abord basée sur le budget O&M et les résultats financiers à la fin de l'exercice ; les résultats financiers sont exprimés à travers la FC mais elle seule ne suffit pas. Pour comparer les parcs entre eux et mieux juger de l'efficience des parcs, nous avons décomposé la Fonction Coût afin d'isoler d'autres indicateurs qui matérialisent mieux la performance financière d'un parc éolien.

2.4 La performance financière d'un parc éolien

La FC est un résultat brut qu'on ne peut interpréter que par parc éolien. Or, pour un exploitant qui dispose de parcs de différentes tailles, la FC doit être normalisée pour être interprétée sans se soucier de la taille des parcs. Cette notion de performance financière est traduite en un indicateur que nous avons nommé le performance ratio (PF). Il a été isolé à partir de la décomposition de la FC en plusieurs sous indicateurs.



Figure 29 De la fonction Coût à la disponibilité financière

2.4.1. *De la fonction Coût à la disponibilité énergétique*

La disponibilité énergétique exprime la réalité de la production d'un parc par rapport à sa capacité maximum de production. Nous l'avons isolé en partant de la FC qui prend en compte la capacité réelle de production du parc (courbe de puissance réelle des éoliennes).

La fonction coût décomposée et le lien avec la disponibilité énergétique d'une année *n* :

$$FC = CA\ th - \ PP - \ Ct_{O\&M}(n)$$

$$FC = \big((Pth\ \ (CPR, n) - PPn\big) * Ta\ - Ct_{O\&M}(n)$$

Avec

- Pth (CPR, n) (courbe de puissance réelle d'une année n) : production théorique
- PPn : perte de production d'un année n
- Ta : tarif d'achat de l'électricité
- Ct O&M : ensemble des coûts O&M
- *n* : année n

Les pertes de production prises en compte sont celles uniquement liées aux pannes et aux arrêts de maintenance ; on soustrait donc celles qui sont associées aux bridages qui sont des mesures obligatoires contractuelles de l'exploitant. Elles ne constituent donc pas de pertes liées à la stratégie de maintenance au sens propre.

$$PPn\ = PP\ panne\ (n) - PPbridage\ \ (n)$$

Avec cet indicateur sur la perte de production, on peut déduire la disponibilité énergétique qui exprime le niveau de production du parc.

Soit une disponibilité énergétique De :

$$De\ (n) = \frac{Pth - PP}{Pth} = Pth(CPR, n) - \frac{PPn}{Pth(CPR, n)}$$

Avec De(n), la fonction FC se réécrit :

$$FC = De\ (n) * Pth(CPR, n) * Tar - Ct_{O\&M}(n)$$

2.4.2. *De la fonction coût à la disponibilité financière*

La disponibilité financière est une disponibilité sur laquelle on « impacte » les coûts de maintenance. Pour l'isoler nous sommes partis de la FC et de la disponibilité énergétique. La définition de cette disponibilité nous a permis d'isoler un terme correctif qui est un indicateur exclusivement lié aux coûts O&M associés à une production théorique dans les conditions réelles du parc.

En mettant en facteur Pth, FC devient :

$$FC = [De\ (n) - \frac{\boldsymbol{Ct\ O\&M\ (n)}}{\boldsymbol{Pth\ (CPR,\ n) * Tar}}]\ \ * Pth\ (CPR, n)\ Ta$$

En décomposant la FC, on a isolé un autre terme correctif **R2**. C'est un ratio qui exprime la part d'un budget coût O&M dans le cadre d'une production théorique en condition réelle.

$$FC = [De\ (n) - R\mathbf{2}\ (\boldsymbol{n})]\ \ * Pth\ (CPR, n)\ Ta$$

$$\boldsymbol{FC = Df\ (n) * Pth\ (CPR, n) *\ \ Ta}$$

La disponibilité financière est un rapport de coût en euros sur la production théorique valorisée en euros. Elle est égale à :

$$Df(n) = De(n) - \underbrace{\frac{Ct_{\ O\&M}(n)}{Pth\ (CPR,\ n) * Ta}}_{\text{Terme correctif R2}}$$

2.4.1. *Le performance ratio*

Le « Performance Ratio » de l'année n mesure le ratio entre une production théorique avec une courbe de puissance réelle sur une production avec une courbe de puissance constructeur. L'intérêt est de voir l'écart entre les deux résultats de production.

$$PR(n) = \frac{Pth\ (CPR, n)}{Pth\ (CPC, n)} *\ \ Ta$$

La valeur de la fonction coût de l'année n est :

$$FC(n) = Df\ (n) - PR(n)\ * Pth\ (CPR, n) *\ \ Ta$$

$$FC(n) = Df\ (n) * PR(n)\ * Pth\ (CPR, n)\ * AM\ * Pth(CPC,\ LT) * Ta$$

2.4.2. *La performance financière*

La performance financière est un indicateur qui permet d'estimer la compétitivité du parc par rapport aux autres parcs. La production théorique doit prendre en compte des mesures de vent d'une année « normale ». Cette notion d'année normale est traduite avec le facteur d'ajustement météo : AM. La notion de facteur d'ajustement météo AM avec la courbe de puissance constructeur (CPC) permet d'obtenir un coefficient qui va ajuster les mesures de vent obtenues sur une année n et les mesures de vent observé sur une année normale dite de long terme (LT).

$$AM = \frac{Pth\,(CPC, n)}{Pth\,(CPC,\ LT\,)} * \ Ta$$

Alors la Fonction calculée avec ce facteur d'ajustement météo

$$FC(n) = Df\,(n) * PR(n)\ * Pth\,(CPR, n)\ * AM\ * Pth(CPC,\ LT) * Ta$$

Elle équivaut à un productible annuel moyen net des coûts. Elle exprime la productivité du parc en prenant en compte les coûts et la production. La performance financière d'un parc PF s'exprime par :

$$PF(n) = \frac{FC(n)}{Pth(CPC, LT)}$$

$$PF(n) = Df\,(n) * PR(n) * AM(n)$$

2.4.3. *Les termes correctifs*

- Le ratio R1 : nous avons défini pour une analyse plus approfondie de la productivité des parcs. C'est un terme qui a été défini dans le cadre de l'analyse de la production théorique. Il permet d'exprimer un ratio de perte de production sur la période . R1 est lié à la réduction du temps de perte de production. Il permet de comptabiliser l'ensemble des durées de pertes de production.

$$De(n) = \frac{Pth(CPR, n) - PPn}{Pth\,(CPR, n)} = \frac{1 - <\mathrm{P}> Ttot\ \ \mathrm{T\ PP}}{<\mathrm{P}> Ttot\ \ \ T\ tot}$$

$$De(n) = 1 - \ \frac{[< P > PP + \ < \boldsymbol{P} > \boldsymbol{tot} - < P > tot]\ T\ PP}{< P > tot\ \ Ttol}$$

$$De(n) = 1 - \ \frac{< \boldsymbol{P} > \boldsymbol{tot}\ .\ \boldsymbol{T\ PP}}{< \boldsymbol{P} > \boldsymbol{tot}\ \ \boldsymbol{Ttol}} - \frac{< P > tot - < P > PP}{< P > tot} * \frac{T\ PP}{T\ total}$$

Avec une disponibilité énergétique :

Dispo énergétique = Dispo temporelle + R1

R1 $\quad 1 = \frac{<P>tot - <P>PP}{<P>tot} \ * \frac{Tpp}{T\ tot}$

- Le ratio R2 : c'est un terme correctif identifié à partir de la disponibilité énergétique. R2 est lié aux coûts de maintenance et à la production théorique qui lui est liée.

$$R2 = \frac{Ct\ O\&M\ (n)}{Pth\,(CPR, n) * Ta}$$

L'ensemble de ces indicateurs O&M que nous avons décrits précédemment permettront d'évaluer les coûts de maintenance et la performance globale du ou de l'ensemble des parcs. Ces indicateurs représentent les critères qui devraient être optimisés oui qui seront le résultat des facteurs à optimiser.

Nous avons constitué l'ontologie permettant d'estimer d'abord le budget d'un parc ou d'un groupe de parc ensuite la rentabilité de ce parc ou groupe de parcs éoliens.

Pour répondre à notre objectif de simulation, nous avons réifié les concepts de cette ontologie dans système. Ce système dénommé PROMEEO dont l'épine dorsale est constituée d'un système multiagent se décompose en 4 gros sous-systèmes fonctionnels que nous décrirons dans nos contributions.

2.5 Le modèle agent

Dans la première partie des contributions, nous avons déterminé les critères qui permettent, du point de vue d'un exploitant éolien, d'optimiser le budget de maintenance et d'analyser la performance de ses parcs. Dans notre conception de l'optimisation de la maintenance, l'aspect financier domine l'aspect technique. Cet aspect financier se traduit dans la FC qui exprime la rentabilité du parc et la plus-value dégagée par rapport à une production prévue et une stratégie de maintenance définie. A partir de la FC, et dans le but de standardiser la comparaison des parcs entre eux en faisant fi de leurs tailles, nous avons développé le concept de « Performance financière ». A partir de cette notion de PF, nous avons déterminé différents ratios pour

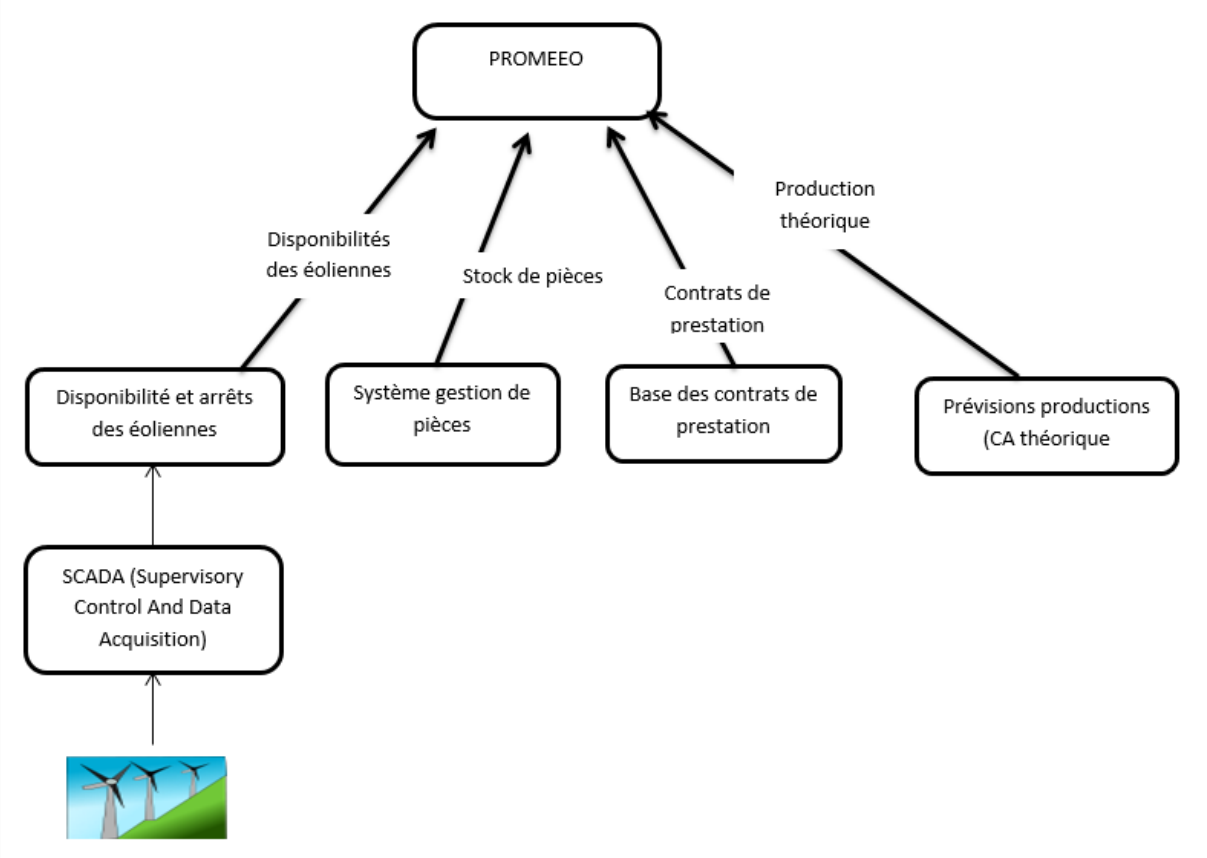


Figure 30Sources de données de PROMEEO

- Les pannes et arrêts : ils sont déclarés dans le SCADA ; ils sont considérés comme des objets dans le système ;
- Les données de production théoriques ;
- Les contrats de prestation : Un contrat de maintenance implique un prestataire de maintenance. Le contrat en général annuel stipule la disponibilité à laquelle doit se conformer le prestataire. Cette disponibilité influera donc fortement sur la gestion des ressources que les prestataires de

maintenance alloueront au parc pour les interventions. En effet, le niveau de disponibilité mentionné dans le contrat influe sur la gestion des ressources du prestataire. De facto, plus le niveau de disponibilité est élevé plus les ressources devront être réactives pour intervenir sur les pannes. L'objectif sous-jacent étant pour le prestataire de réduire au maximum la durée de d'indisponibilité qui pourrait lui être imputé.

2.5.1. *Développement du prototype : les sous-systèmes de PROMEEO*

Nous avons décomposé le système Promeeo en plusieurs sous-système pour mieux identifier les sorties qui seraient les plus pertinentes dans le système global. Nous en avons identifié quatre.

TCHEX : Travail du Chargé d'Exploitation relatif à la gestion d'une intervention.

TCHEX est un sous-système destiné à la gestion et au suivi d'une panne individuelle par le chargé d'exploitation. C'est une vue du système pour un opérationnel de l'exploitation.

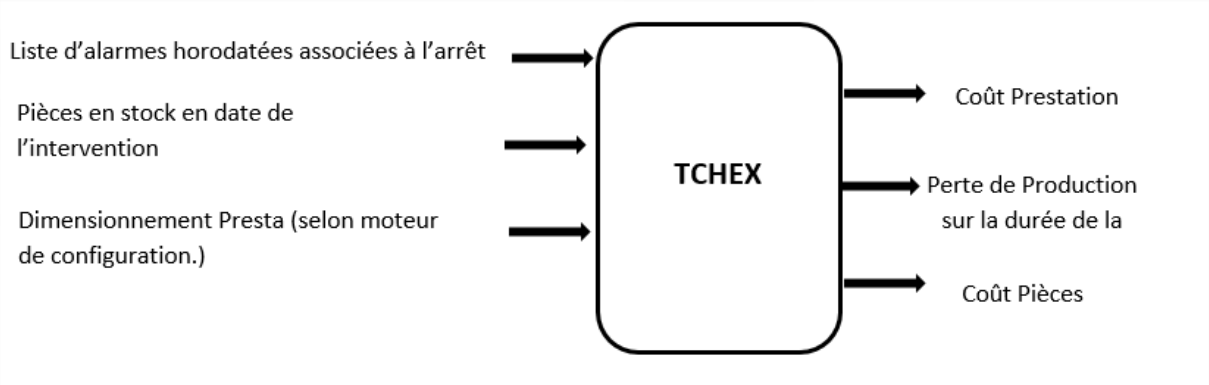


Figure 31 Sous-système TCHEX

Le cas d'utilisation de ce sous-système est présenté ci-dessous.

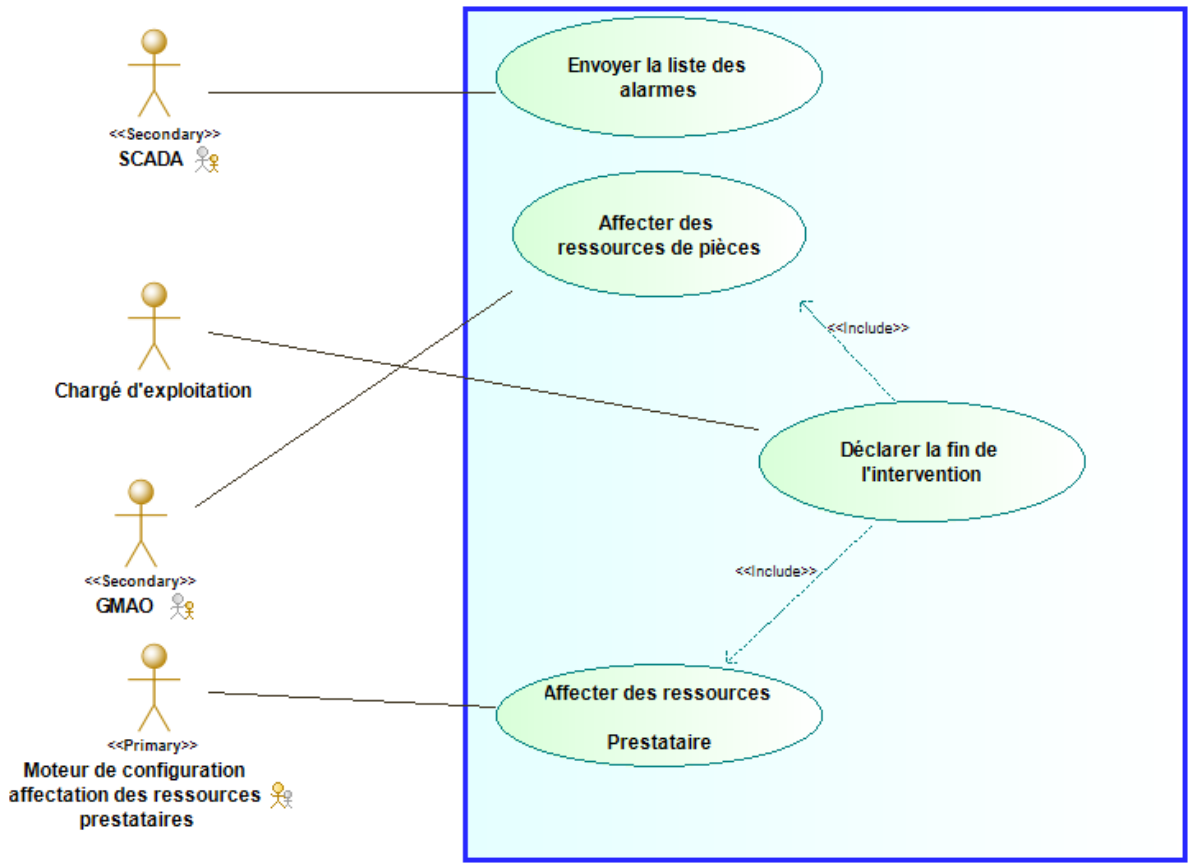


Figure 32 Cas d'utilisation TCHEX

Nom : Déclarer la fin de l'intervention.

Objectif :
A la fin de l'intervention, le chargé d'exploitation déclare la fin de la panne. Le SCADA aussi fournit la même information puisque l'état de l'éolienne passe à « en marche ».

Acteurs principaux :

- Chargé d'exploitation
- SCADA

Dates : La date est fournie soit par le chargé d'exploitation ou par le SCADA.

Responsable

- Chargé d'exploitation
- SCADA

Version : TCHEX (PROMEEO 0.1)

Les préconditions :

- L'affectation des ressources à l'intervention doit avoir été effectuée.

Des post conditions :

- La liste des indicateurs est mise à jour
- L'intervention est archivée avec toutes les indicateurs de maintenance associés pour pouvoir faciliter la recherche.

Diagramme d'activités TCHEX

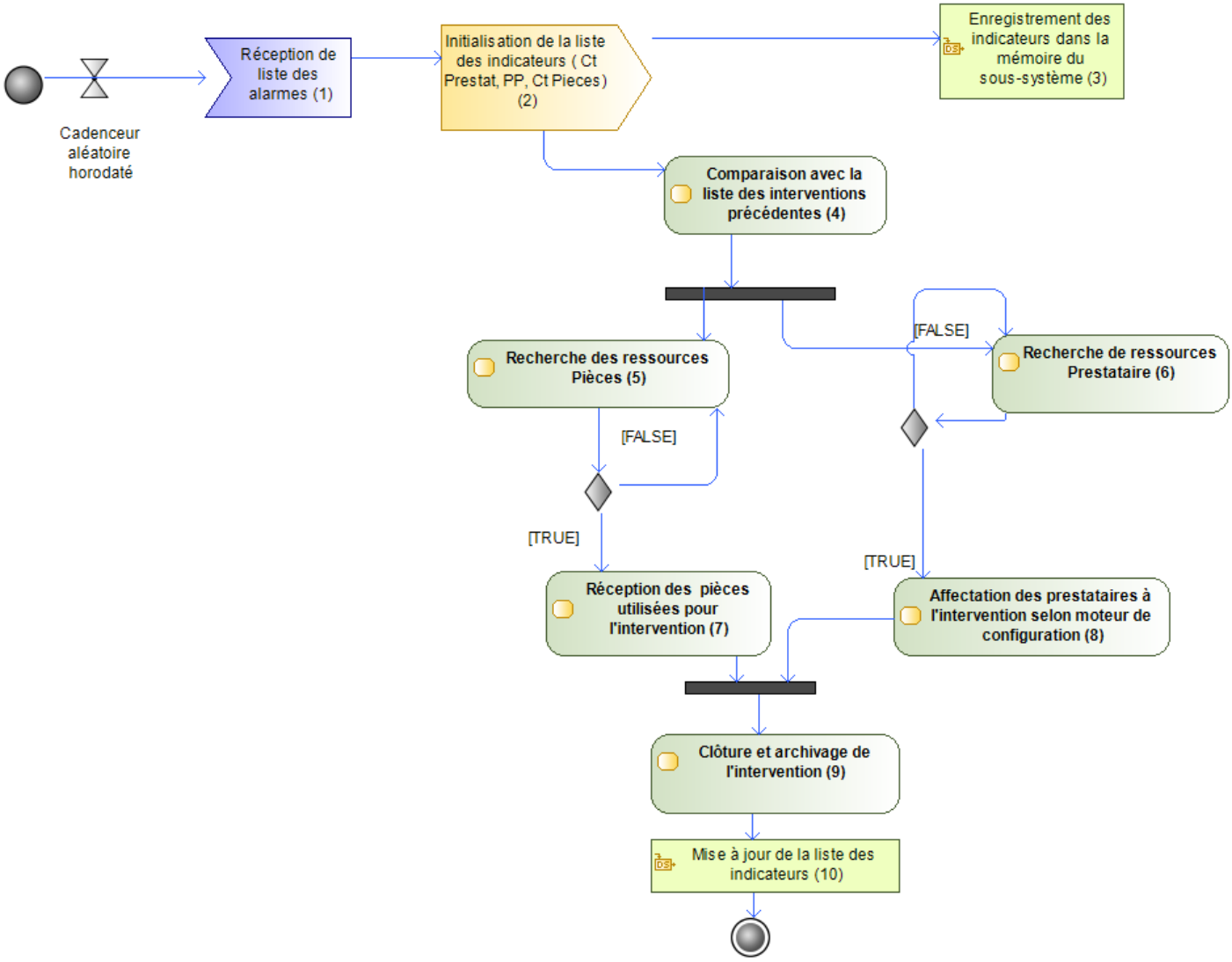


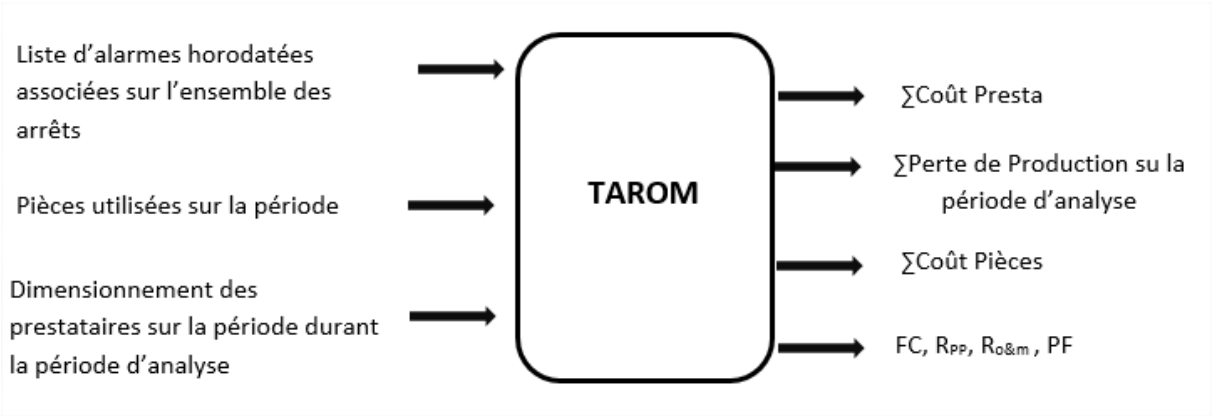
Figure 33 Diagramme d'activités TCHEX

Liste des activités

1. Réception de la liste des alarmes : réception des alarmes envoyées par le SCA signifiant l'arrêt de l'éolienne.
2. Initialisation de la liste des indicateurs (Ct Prestation, PP, Ct Pièces): on initialise tous les indicateurs associés.
3. Enregistrement des indicateurs dans la mémoire du sous-système : ils sont recalculés et mis à jour à tout moment lorsqu'ils sont consultés
4. Comparaison avec les interventions passées : il s'agit de rechercher dans la mémoire du système les interventions déjà réalisées dans le passé.
5. Recherche des ressources Pièces : une requête est envoyée à la GAMO pour
6. Recherche de ressources Prestataire
7. Réception des pièces utilisées pour l'intervention
8. Affectation des prestataires à l'intervention selon moteur de configuration:
9. Clôture et archivage de l'intervention
10. Mise à jour de la liste des indicateurs.

TAROM : Travail d'Analyse d'un Responsable O&M relatif au suivi et à l'analyse d'une période de fonctionnement d'un(e) éolienne/parc/zone.

TAROM est le sous-système destiné à la gestion et au suivi d'une panne individuelle par le chargé d'exploitation.



Son cas d'utilisation est décrit ci-dessous :

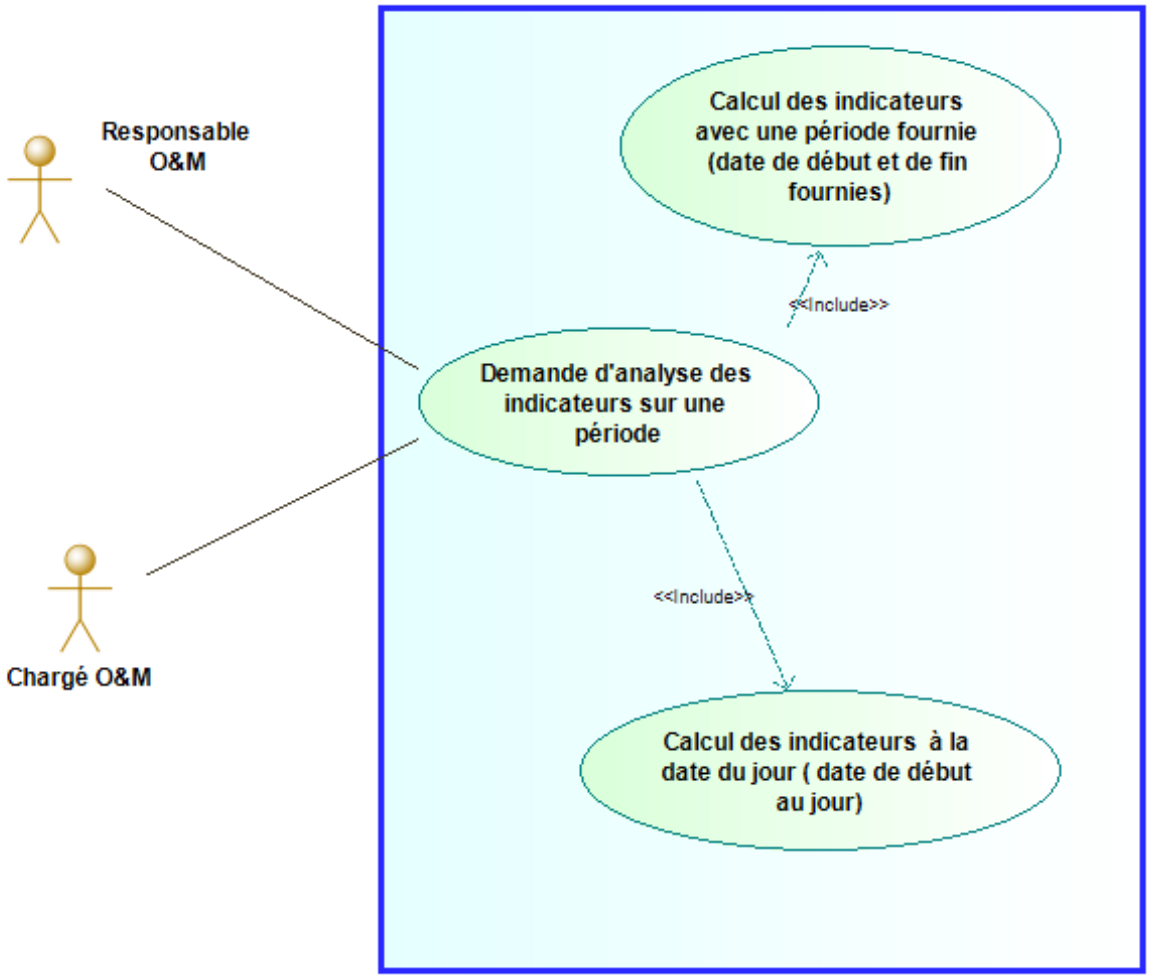


Figure 34 Cas d'utilisation TAROM

SOREM : Système d'optimisation d'un responsable de maintenance.

SOREM est un sous-système destiné la simulation des coûts d'une panne qui n'est pas prise en charge dans le cadre d'un contrat de prestation classique. Ce sont des pannes qui nécessitent un diagnostic et une prise en charge spécifique.

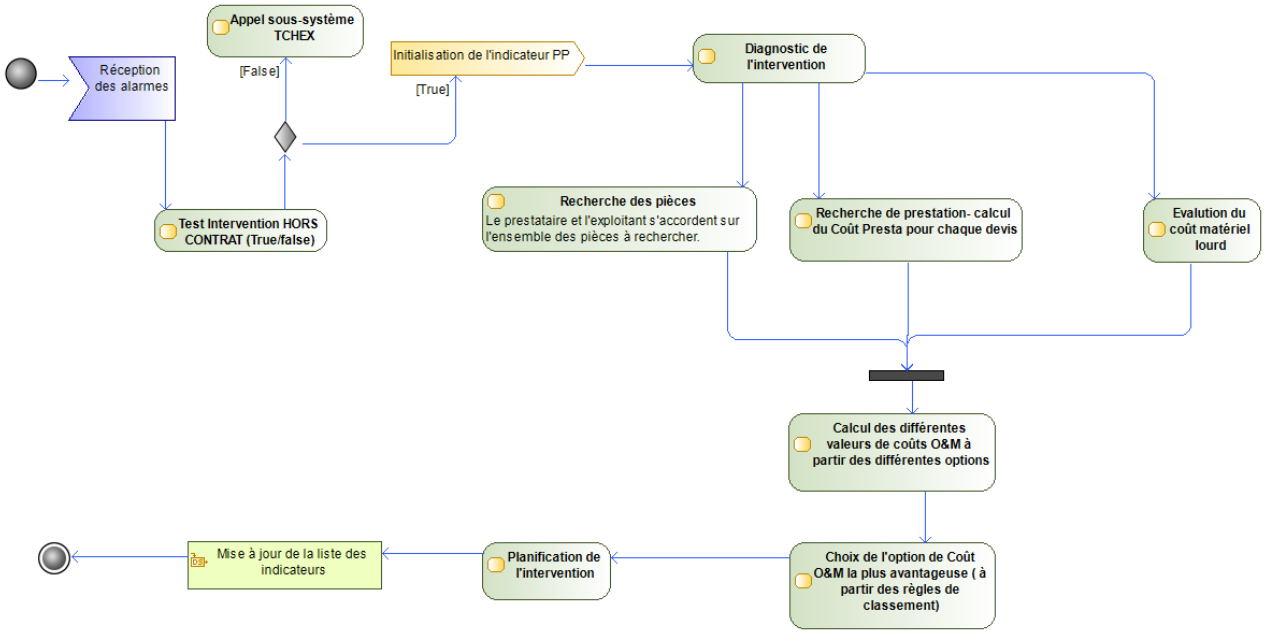


Figure 35 Diagramme d'activités SOREM

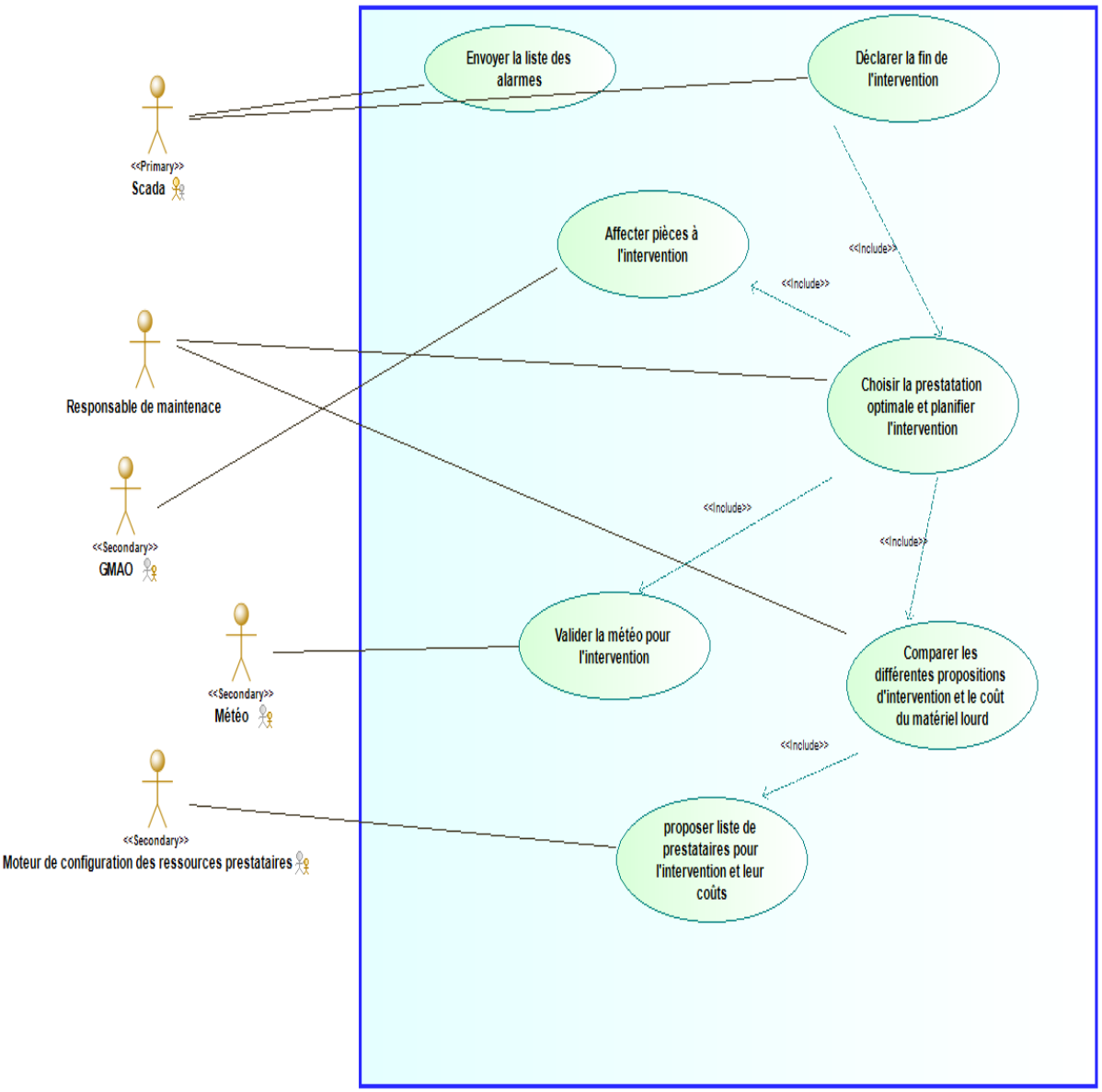


Figure 36 Cas d'utilisation de SOREM

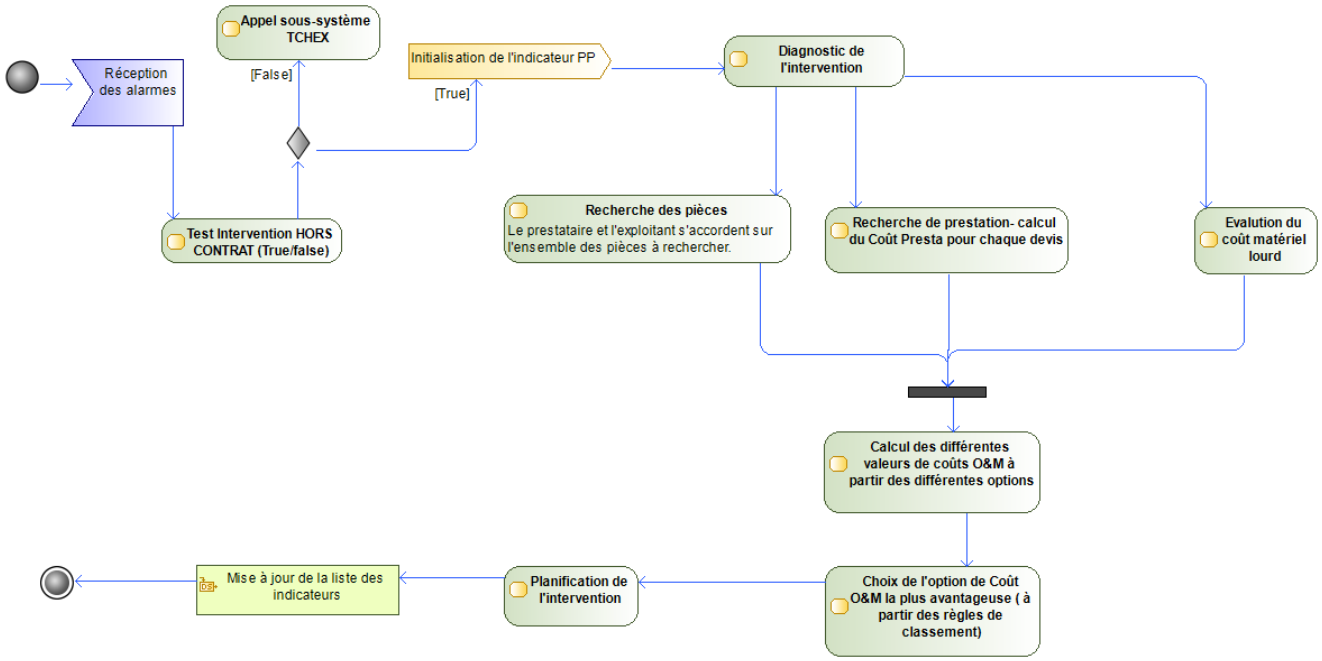


Figure 37 Diagramme d'activités SOREM

SYPOM : système d'optimisation pour un responsable d'O&M.

Le responsable simule l'activité du parc pour obtenir le budget qui maximise la performance du parc. Il s'agit d'un sous-système qui permet de dérouler des scénarios de maintenance sur une durée donnée. C'est le sous-système le plus important de PROMEEO.

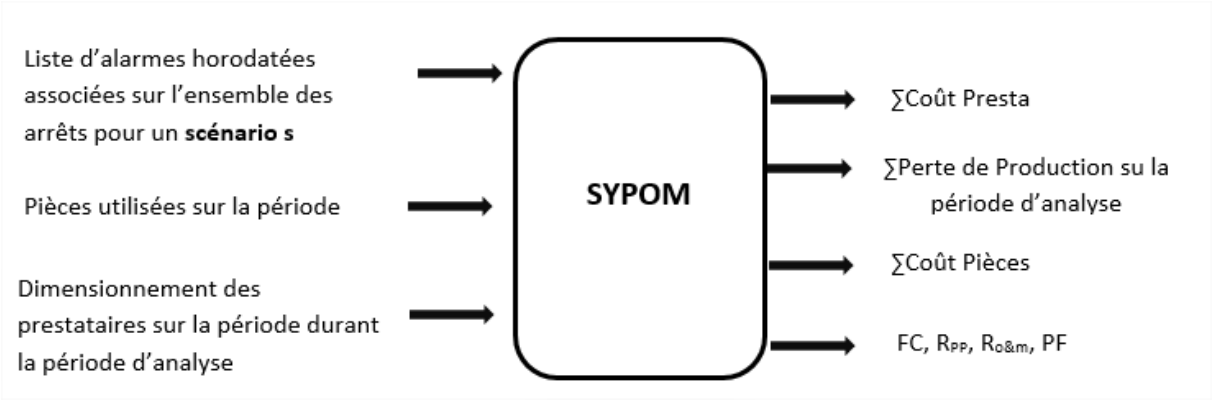


Figure 38 Sous système SYPOM

Le responsable simule l'activité du parc pour obtenir le budget qui maximise la performance du parc. Il s'agit d'un sous-système qui permet de dérouler des scénarios de maintenance sur une durée donnée. C'est le sous-système le plus important de PROMEEO.

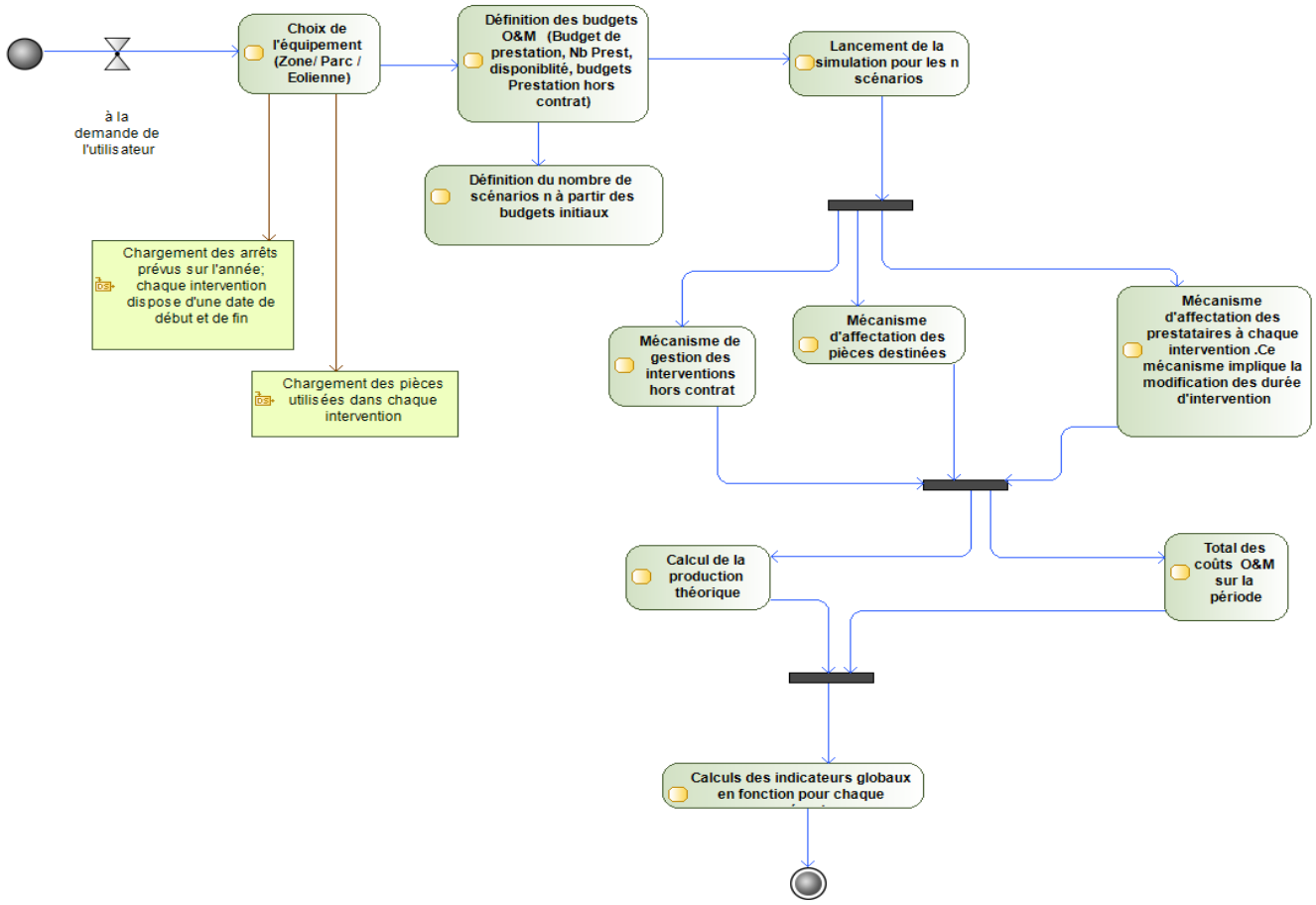


Figure 39 Diagramme d'activités SYPOM

2.6 Le modèle Agent au sein de la plateforme PROMEEO

La plateforme est constituée comme une application construite sous le paradigme (Modèle Vue Contrôleur) composée :

1. D'une base de données SQL qui est reliée aux agents. Chaque agent disposant d'une base de données SQL qui est reliée aux agents. Chaque agent disposant d'une table pour stocker les informations relatives aux pannes qu'il traite par ricochet, alimenter l'historique des pannes.
2. D'un environnement d'interaction avec les agents.
3. Des agents et de leurs traitements.
4. D'une IHM pour afficher des indicateurs autour de FC les résultats.

2.6.1. *L'environnement*

Les objets présents dans l'environnement qui n'ont pas été réifiés en agents en objet sont autonomes. Dans notre approche, tous les concepts liés à la panne dans l'ontologie appartiennent à l'environnement dans le système. Ils sont représentés soit sous la forme d'agent soit sous la forme d'objet. Par exemple, la panne est liée à un équipement (l'éolienne) ; elle reprend les informations relatives au descriptif, aux composants reliés et à la criticité de l'alarme. Le coût de la panne est relié à tous les paramètres financiers : coût de la pièce, coût de la prestation, coût de la perte de production. Les agents présents dans l'environnement sont en interaction avec des objets et d'autres agents. Qu'ils soient physiques ou abstraits, ils exécutent des actions en vue de se conformer aux objectifs qui leurs prédéfinis ; les objets peuvent interagir avec des bases de données et fournir des réponses aux demandes des agents. Nous avons défini quatre groupes au sein de l'ontologie. Ces groupes nous ont permis de regrouper les concepts en fonction de leurs caractéristiques. Nous reprenons dans ce document les règles « d'AGENTIFICATION » à partir de concepts d'ontologie de l'O&M. Les règles que nous avons définies s'appliquent à tout concept d'ontologie qui serait susceptible d'être utilisé dans un environnement multiagents.

Le paradigme « multiagent » est utilisé pour simuler une situation particulière et obtenir les résultats finaux issus des interactions entre agents. Les agents sont construits pour un domaine particulier et leurs comportements traduisent des règles de fonctionnement dans ce domaine.

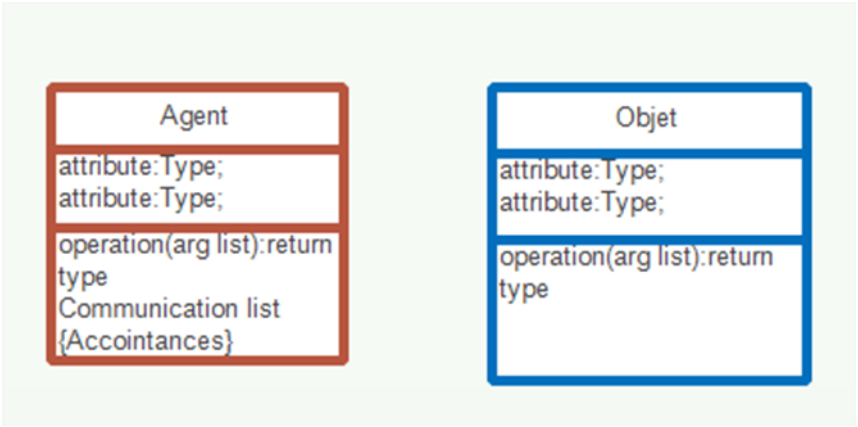


Figure 40 Agents et objets dans notre système

Dans notre approche, tous les concepts de l'ontologie appartiennent à l'environnement dans le système. Une première étape est de définir la situation à simuler ainsi que les sorties du système. On identifier le concept de l'ontologie à simuler.

Supposons qu'on souhaite estimer le coût d'une panne (Ct Panne). Pour identifier les entités présentes dans l'environnement, on va d'abord se référer aux entités les plus proches des concepts présents dans la simulation. Ainsi :

- La panne est liée à un équipement (l'éolienne) ; elle est composée d'une série d'informations représentées sous forme de concepts dans l'ontologie : descriptif, composant relié, criticité de la panne.

- Le coût de la panne est relié à tous les paramètres financiers : coût de la pièce, coût de la prestation, coût de la perte de production.

Toutes ces entités de l'ontologie constituent les composantes du système visé. L'étape suivante consiste à définir les entités proactives dans ce système : celles qui expriment un objectif (état optimal) et qui sont capables d'exécuter un certain nombre d'action (appel de méthodes, communication). Les agents présents dans l'environnement sont en interaction avec des objets et d'autres agents. Qu'ils soient physiques ou abstraits, ils exécutent des actions en vue de se conformer aux objectifs qui leurs prédéfinis ; les objets peuvent interagir avec des bases de données et fournir des réponses aux demandes des agents. Les agents correspondent à des métiers de l'activité de maintenance. On les considère comme purement situés dans l'environnement par rapport aux fonctions qu'ils exercent. Par exemple, l'agent Pièces, chargé de fournir les coûts de pièces et les délais d'attente pièces, correspond à un métier propre à LCV. L'environnement fournit un ensemble d'objets (provenant d'entités extérieures) que les agents perçoivent et utilisent pour effectuer leurs actions.

2.6.2. *Les interactions dans le système*

Les échanges et interactions sont codés sous formes de méthodes. Nous arrivons ici sur les types de relations dans l'ontologie :

1. Relation fonctionnelle : un concept « A » a une relation R dite fonctionnelle avec un concept « B » lorsque « A » ne peut avoir qu'une relation B.
2. Relation symétrique : les concepts ont des relations entre eux dans les deux sens.
3. Relations transitives (si une propriété est transitive, elle ne peut pas être fonctionnelle).

Les relations entre concepts de l'ontologie déterminent aussi les interactions entre agents. La relation est du type (Concept ➔ relation ➔ concepts reliés). Pour chaque agent identifié, les relations qui lui sont attachées sont importantes pour caractériser les demandes d'informations auprès des autres entités de l'environnement. Ainsi, sur chaque relation entre concepts identifiés comme agents, on doit s'interroger sur le type de relation qui les relie :

- La relation est-elle une propriété : **Concept « A » a** pour propriété **concept « B »**. Dans ce cas, il n'y pas d'échanges de message entre l'agent. La propriété ne sera considérée que comme un attribut de l'agent auquel il appartient.
- Lorsque la relation représente un transfert d'information, il s'agit d'un envoi de message. Le propriétaire de la relation est le propriétaire de l'information transmise et le récepteur de l'information est le concept de l'autre côté de la relation.
- Que se passe-t-il dans le cadre des relations transitives ?

2.6.3. *Un agent dans le système*

Les agents présents dans l'environnement sont en interaction avec des objets et d'autres agents. Qu'ils soient physiques ou abstraits, ils exécutent des actions en vue de se conformer aux objectifs qui leurs prédéfinis ; les objets peuvent interagir avec des bases de données et fournir des réponses aux demandes des agents.

Tout concept est issu de l'ontologie .Le concept de l'ontologie peut être à la fois des éléments physiques ou abstraits. Pour le concept lorsqu'il est une entité physique peut être « agentifiée » lorsqu'elle exprime un comportement au sein d'un environnement. Si l'entité physique dispose d'abord d'un attribut qui peut être considéré comme un but ; cette même entité communiquant avec l'environnement sous forme de l'appel de résultats de méthodes ou de communications.

Chaque agent doit pouvoir exprimer au moins un objectif à atteindre, une valeur à atteindre. Cette valeur est à maximiser ou minimiser en fonction de critères propres. Il doit pouvoir être proactif sur les actions qu'il peut exécuter et entreprendre de façon autonome l'ensemble des demandes qui concourent à l'exécution de ces objectifs.

Ces concepts transformés en agent se définissent comme des agents aspectuels développés par Cardon. Un agent aspectuel désigne *tout élément caractéristique du domaine qui a à la fois un comportement dépendant de ses relations avec d'autres entités, un comportement et une évolution propre due à la transformation de sa structure.* Par exemple l'éolienne (l'équipement) exprime un objectif de fonctionner avec une disponibilité de 100%. Même si elle dispose d'un objectif de fonctionnement (Taux de disponibilité =100%), ses comportements sont régis par l'atteinte de seuils ou de valeurs d'indicateurs. L'éolienne ne peut pas être proactive sur son environnement, elle ne fait qu'exprimer un ensemble d'états qui vont être évalués par des indicateurs.

Lorsque que le concept de l'ontologie exprime une entité physique, il doit pouvoir exprimer à la fois des objectifs, des comportements autonomes pour pouvoir être décliné en agent. Par exemple les indicateurs sont des concepts abstraits ; le Coût O&M qui est l'indicateur du coût de maintenance global dispose d'un objectif qui lui est propre ; cet objectif est de minorer sa valeur dans toutes les situations (Cas d'une alarme, ou sur une période …).

Un agent dans le système se définit comme un sous-système disposant d'un objectif interne. Pour atteindre cet objectif interne, il utilise les informations provenant d'autres agents et issus des traitements.

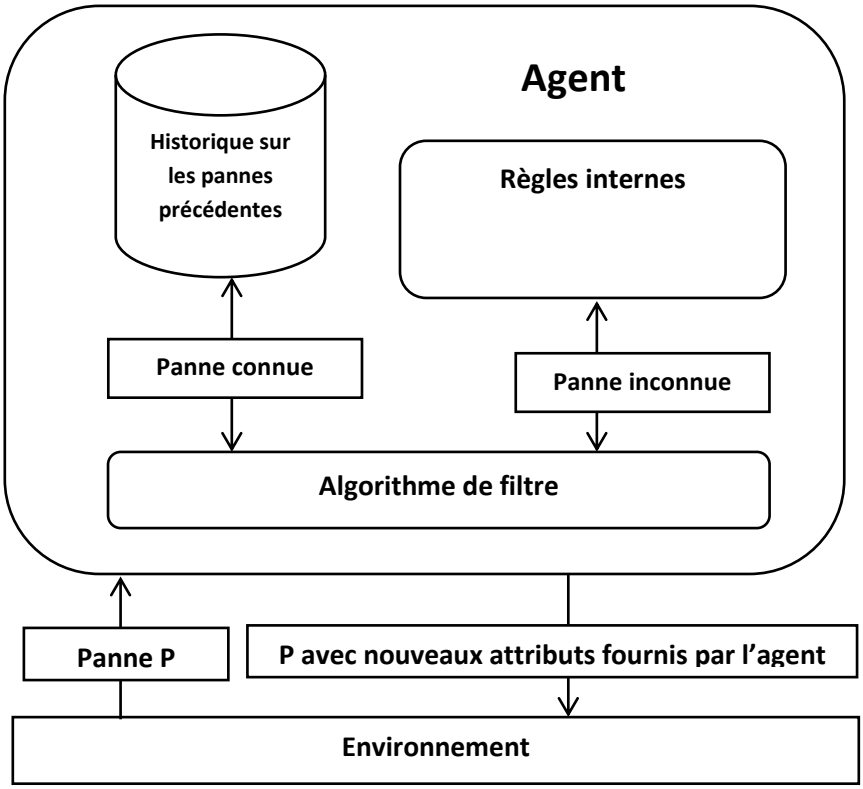


Figure 41 Description générale d'un agent

- Historique de la panne : les pannes lorsqu'elles sont décrites présentent un historique qui peut être exploité.
- Règles internes à l'agent : il s'agit principalement des règles qui permettent de calculer et de présenter une information
- Panne P connue ou inconnue
- Environnement ➔ l'environnement

2.6.4. *L'agent Recherche Panne*

L'agent « Recherche Panne » dispose d'un objectif qui détecte les potentielles pannes à partir des signaux faibles ; on désigne par signaux faibles les alarmes dites « mineures » qui annoncent un potentiel problème sur un composant de l'éolienne. En utilisant l'historique, l'agent peut mémoriser, pour un équipement de l'éolienne, les alarmes mineures qui entraînent les alarmes critiques.

- **But** : détecter les pannes éventuelles à partir des alertes et signalisations en se basant sur l'historique.
- **Etat de l'agent avant la réception de l'objet Panne**
- **La stratégie l'agent**
- **Actions** :
  - Envoyer les objets pannes potentielles à l'agent Panne.
- **Proactivité** : L'agent panne peut-être proactif lorsqu'il détecte un défaut de performance de l'éolienne. Il évalue les alertes et en fonction du risque envoie les pannes.
- **Communication** :

- Avec le SCADA : il récupère les objets alertes et signalisations qui viennent d'une entité extérieure (SCADA)
- Il fournit à l'agent panne les objets pannes (➔ pannes)
- Avec l'agent diagnostic : il récupère les causes des pannes qui n'avaient pas été identifiées (🡐diagnostic)

2.6.5. *L'agent Panne*

- **But** : clôturer toutes les pannes et demander l'exécution des opérations de maintenance associées.
- **Actions** : il perçoit les pannes en cours et les pannes potentielles et demande les opérations de maintenance.
- **Proactivité** : L'agent est proactif pour l'envoi des pannes en cours et potentielles.
- **Communication** :
  - Avec le SCADA : il récupère les alarmes en cours qui décrivent l'arrêt de l'éolienne en cas de panne.
  - Il fournit à l'agent « Opération de maintenance » les pannes et demande l'exécution d'opérations de maintenance (➔il envoie les pannes)
  - Avec l'agent Recherche Panne (🡐 il reçoit pannes potentielles).

2.6.6. *L'agent Diagnostic*

- **But**: identifier les causes de pannes
- **Actions** : il perçoit les pannes, envoie les causes et la liste des pièces à utiliser pour les interventions. Il envoie à l'agent Recherche panne les causes des pannes jusque-là inconnues.
- **Proactivité** : pas de proactivité.
- **Communication** :
  - Il fournit à l'agent « Opération de maintenance » le diagnostic sur les pannes (➔Causes et listes pièces)
  - Avec l'agent Recherche Panne (🡐 pannes potentielles).

2.6.7. *L'agent O&M*

En termes de métier de la maintenance, cet agent est l'équivalent du chargé de maintenance à LCV.

- **But** : son principal objectif est de réaliser les opérations de maintenance au plus tôt tout en respectant la stratégie fixée par la FC. Il fournit les coûts O&M de chaque panne à l'agent Fonction Coût.
- **Actions** : Il exécute une ou plusieurs interventions pour résorber les pannes reçues.
- **Proactivité** : l'agent est proactif à partir du moment où il reçoit l'objet panne.
- **Communication** :
  - Agent Panne (🡐Objet panne)
  - Agent Prestation (🡐Coût Prestation et durée d'intervention
  - Agent diagnostic (🡐Résultat du diagnostic : liste des pièces à utiliser pour les interventions)
  - Agent Gestion des pièces (🡐Pièces disponibles pour les interventions)

- L'agent « Opération de Maintenance » fournit le coût O&M à l'agent fonction Coût qui valide l'intervention (➔ Coût O&M).

2.6.8. *L'agent Prestation*

Cet agent s'identifie au prestataire de maintenance. Il est chargé de réaliser l'intervention sur le parc (Agent réactif).

- **But** : suivant le diagnostic de l'Agent « Opération de maintenance », il doit être capable de fournir un délai d'intervention et le coût de la prestation.
- **Actions** : Pour chaque panne, il fournit un prestataire, le coût de prestation et la durée d'intervention associée.
- **Proactivité** : Pas de proactivité ; il ne fait que répondre aux sollicitations de l'agent « Opération de maintenance »
- **Communication** : communique avec l'Agent « Opération de maintenance » (➔Prestataire, et Coûts Presta).

2.6.9. *L'agent Météo*

- **But** : il fournit la liste des dates avec une météo favorable aux interventions
- **Actions** : fournit la liste des dates
- **Proactivité** : Pas de proactivité ; il ne fait que répondre aux sollicitations de l'agent « Opération de maintenance ». L'agent peut être proactif lorsqu'il détecte une modification (dégradation ou amélioration) de la météo suivant les dates d'intervention envoyées.
- **Communication** : communique avec l'Agent « Opération de maintenance » (➔ Dates météo).

2.6.10. *L'agent Fonction Coût*

C'est l'agent qui valide l'exécution de l'opération de maintenance. En fonction d'une stratégie de LCV basée sur des critères comme la durée d'intervention ou sur l'importance du coût de l'opération (**Coût O&M**), il valide l'intervention.

- **But** : suivant le coût de l'intervention, il donne son accord pour l'exécution de l'intervention.
- **Actions** : Il valide l'opération de maintenance si elle est conforme à la stratégie retenue (raisonnement interne)
- **Proactivité** : Pas de proactivité ; il ne fait que répondre aux sollicitations de l'agent « Opération de maintenance »
- **Communication** : il communique avec l'Agent « Opération de maintenance » (➔ Coût O&M (OK/NOK)).

2.6.11. *L'agent Pièces*

Il a pour objectif de gérer les demandes de pièces de rechange.

- **But** : Répondre aux demandes de pièces pour l'exécution de l'intervention. Fournir la valeur : **$\sum CR_{pièce}$ (€) (Coût de revient de pièces)**
- **Actions :** Envoie la liste des pièces et coûts de maintenance

- **Proactivité** : l'Agent « Gestion de Pièces » alerte sur les stocks de pièces. Il peut aussi anticiper les demandes de pièces pour les pannes potentielles
- **Communication** : Cet agent interagit avec l'agent « Opération de maintenance » et l'informe sur le coût et les délais et la disponibilité des pièces (➔Coût des pièces et délais).

Chapitre 3. Implémentation de l'outil PROMEEO (Plateforme de Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et Exploitation des parcs Éoliens Onshores)

Le 1er besoin exprimé par la direction d'exploitation consiste à faire un suivi financier des opérations de maintenance à titre individuel ou sur une période. Le 2ème besoin est relatif à la problématique d'optimisation de la maintenance par l'analyse de l'indicateur Fonction Coût (FC). Cet indicateur FC est un EBITDA adapté au contexte de la maintenance. Cette optimisation consiste à simuler le résultat de FC et les indicateurs associés suivant les différentes données d'entrées. On note principalement : liste d'arrêts, budget de prestation et production théorique sur la période. L'objectif de cette optimisation est de maximiser le résultat des parcs en maîtrisant les coûts de maintenance par une meilleure anticipation. Les données d'entrées sont fournies par différentes sources applicatives présentes dans le système d'information de l'exploitant éolien.

3.1 Situation actuelle : description de l'existant chez l'exploitant en termes d'optimisation d'O&M et solution proposée

Aujourd'hui, l'exploitant dispose d'outils d'analyse des parcs et des disponibilités. Ces outils sont axés sur l'état de l'équipement et n'offrent pas la possibilité d'une lecture financière du fonctionnement des parcs ; en outre, l'analyse de la performance financière des parcs est impossible car la performance des parcs prend en compte les équipements techniques mais aussi les coûts qu'ils engendrent. L'exploitant dispose aussi d'un outil de planification des interventions pour accompagner au mieux l'exploitant dans le choix des dates d'intervention pour limiter les pertes de productions.

L'optimisation de la rentabilité des parcs éoliens n'est prise en compte dans aucun outil interne à l'entreprise ni par un outil sur le marché. PROMEEO doit fournir aussi la possibilité de faire une simulation de la prise en charge d'une panne de type hors contrat.

3.2 Solution proposée pour répondre au besoin

La solution proposée est la plateforme PROMEEO (Plateforme de Rationalisation et d'optimisation de la maintenance éolienne Onshores). Elle est destinée au suivi financier des parcs d'exploitations. Elle permet aussi d'optimiser la FC par la simulation du fonctionnement des parcs à travers différents scénarios de maintenance des parcs. Ces scénarios diffèrent en fonction des données d'entrées fournies ; les flux de sorties du système permettent à l'utilisateur de mesurer l'efficacité de la stratégie de maintenance qui a été choisie pour le parc en question. L'application développée sera une application web mise en place selon le paradigme MVC.

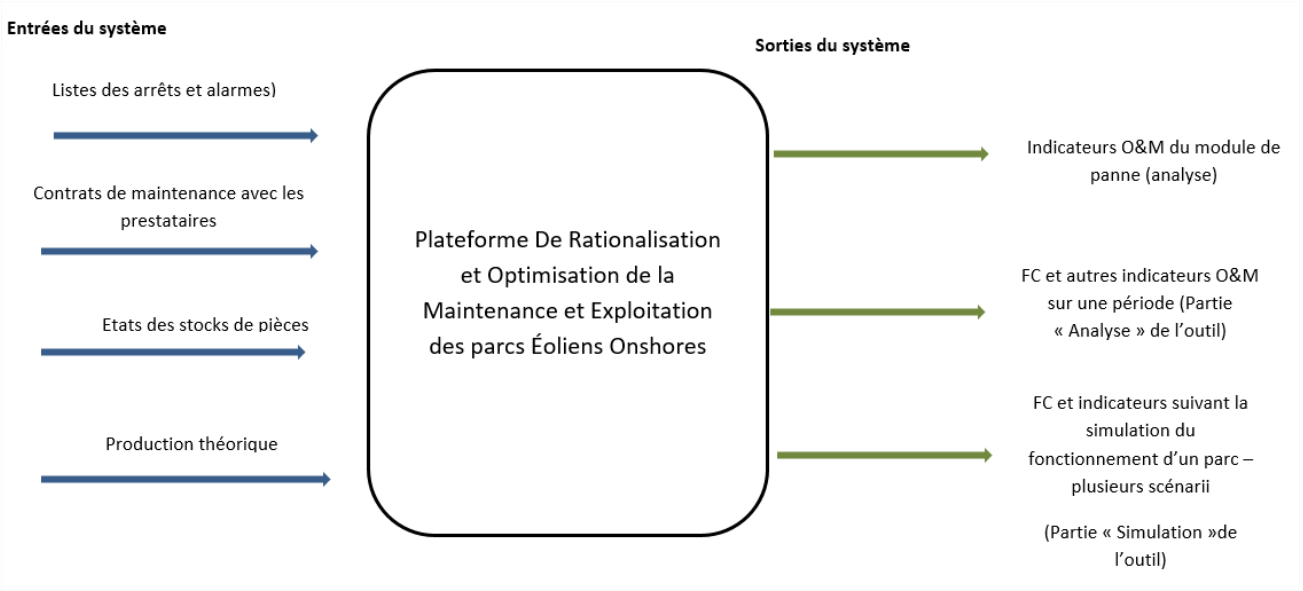


Figure 42 Entrées et sorties du système

3.3 Périmètres des utilisateurs et gestion des droits

L'application est séparée en deux parties : partie analytique et partie simulation. Trois groupes d'utilisateurs ont été identifiés :

1. **Les chargés d'exploitation CEX** qui suivent les pannes et leurs parcs CEX
2. **Les chargés de maintenance CM** : qui suivent les pannes de type hors contrats
3. **Les responsables RSP** : responsables des services chargés de suivre la performance des parcs et qui simulent leurs fonctionnements pour optimiser la FC

Les CEX ont accès à la partie analytique de l'application. Les CM disposent des droits d'accès précédents, et les RSP réalisent la simulation de prise en charge d'une panne de type hors contrat.

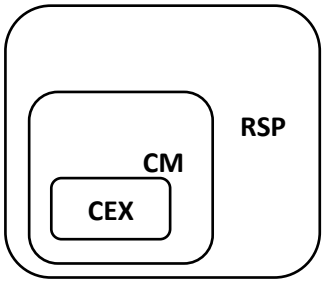


Figure 43 Périmètre des utilisateurs

3.4 Description des fonctionnalités principales de la plateforme

Les fonctions habituelles de logiciel : authentification, sauvegarde de sessions, déconnexion de l'application. On a identifié cinq grandes fonctionnalités du logiciel.

Fonction 1 : suivre l'état d'une éolienne/parc éolien/ zone d'exploitation	
Description	Suivre à l'instant T l'état financier d'un équipement choisi. Sur chacun d'eux, la FC et la disponibilité financière.
Contraintes/règles de gestion	-Récupérer les sources de données mises à jour (Procédure stockée) -Les indicateurs sont mis à jour pour donner suite à la demande de l'utilisateur : -La date de début équivaut à la date de début de l'année civile -La date de fin équivaut à la date du jour où à une date choisie par l'utilisateur.
Niveau de priorité	Haute.

Fonction 2 : suivre l'état d'une intervention (de type contractuel ou hors contrat)	
Description	Suivre à l'instant T l'état financier d'une intervention
Contraintes/règles de gestion	-Récupérer les sources de données mises à jour (Procédure stockée). -Les interventions sont classées en 2 grandes catégories : en cours, closes. Elles sont classées par date : pour les interventions closes, de la plus récente à la plus ancienne et par ordre croissant pour les interventions en cours. L'utilisateur peut choisir parmi l'une des deux catégories l'intervention qui concerne son équipement. -L'utilisateur peut y accéder aussi en choisissant l'éolienne puis un filtre sur les interventions.
Niveau de priorité	Haute.

Fonction 3 : créer et enregistrer une nouvelle panne de type hors contrat	
Description	Les pannes de types hors contrats sont créées par les CM.
Contraintes/règles de gestion	Il faut connaître l'identifiant de l'éolienne défectueuse. Il faut aussi pouvoir enregistrer le descriptif de la panne et lui faire changer de statut suivant les différentes étapes qui décrivent l'évolution d'une panne.
Niveau de priorité	Haute. Cette fonctionnalité est le point de départ de la simulation d'intervention.

Fonction 4 : simuler la prise en charge d'une panne de type Hors contrat ; l'objectif est de connaitre sur la période de maintenance le coût O&M et la PP en fonction	
Description	Lorsqu'une panne de type hors contrat n'est pas encore prise en charge par un prestataire de maintenance, un CM peut simuler les résultats de différentes options de maintenance.
Contraintes/règles de gestion	L'utilisateur fournit : -le nombre de propositions de maintenance pour cette panne -Le coût de pièces à acheter et la durée d'approvisionnement et une date de commande. - Pour chaque option, le coût de prestation, la durée de prestation et une date du début.
Niveau de priorité	Haute.

Fonction 5 : simuler un scénario de fonctionnement sur une année	
Description	Lorsqu'une panne de type hors contrat n'est pas encore prise en charge par un prestataire de maintenance, un CEX peut simuler les résultats de différentes options de maintenance.
Contraintes/règles de gestion	L'utilisateur fournit une liste d'arrêts.
Niveau de priorité	Haute.

Fonction 6 : en temps réel, alerter sur les pannes qui pourraient survenir	
Description	A partir d'un apprentissage sur les alarmes mineures qui ont entraîné des pannes, le système peut alerter sur le risque de réapparition de ces pannes pour donner suite à la réapparition de ces alarmes.
Contraintes/règles de gestion	Le système enregistre les liens récurrents
Niveau de priorité	Faible.

3.5 Base de données

Il faut une base autonome à l'application. Une base de données directement liée aux différentes applications sur laquelle vont se baser les agents pour réaliser leurs calculs. Ces données sont fusionnées pour donner un modèle de données que les agents utiliseront pour interagir et produire les informations dont ils auront besoin. Elle est modélisée sous le paradigme des entités/objets utilisés dans les applications.

Un modèle de classes de données UML. Cf. figure ci-dessous.

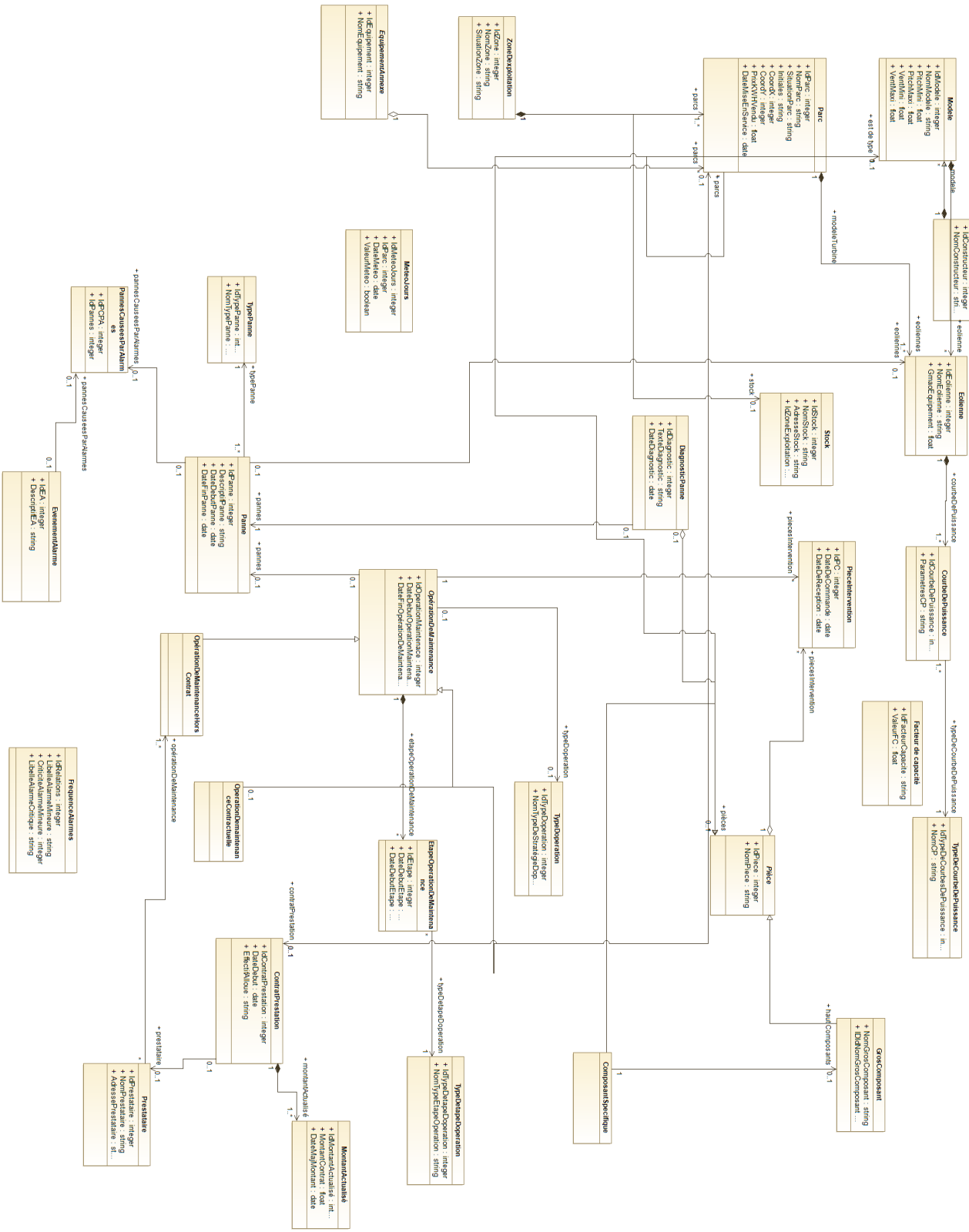


Figure 44 Modèle Objet de PROMEEO

3.5.1. *Sources et import de données*

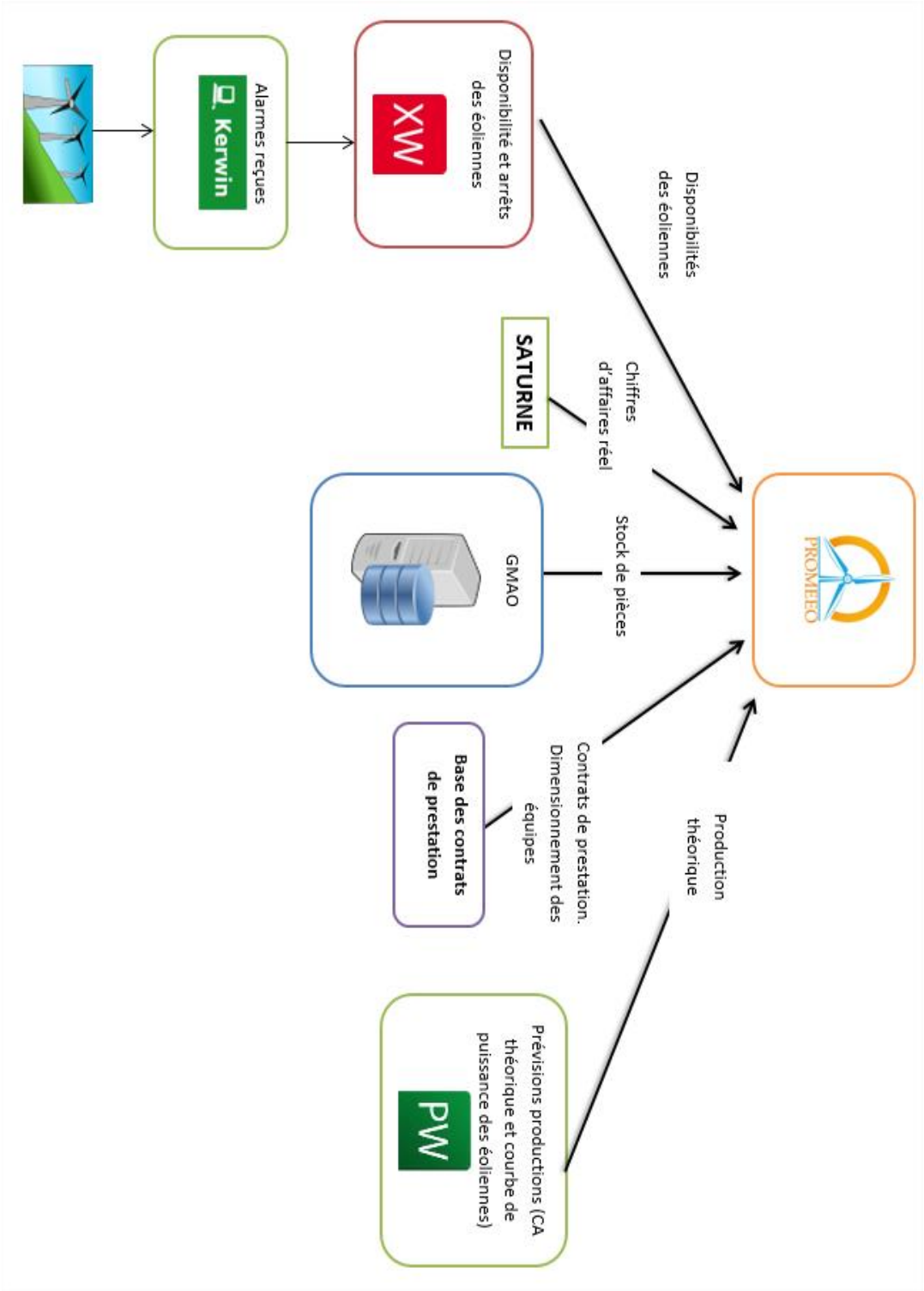


Figure 45 source de données de l'outil PROMEEO

3.5.2. *Interactions avec PrediWind*

PrediWind fournit toutes les données d'entrées nécessaires à la production des éoliennes. Il permet de récupérer les mesures de vent. Tous les calculs de production sont effectués via cette outil.

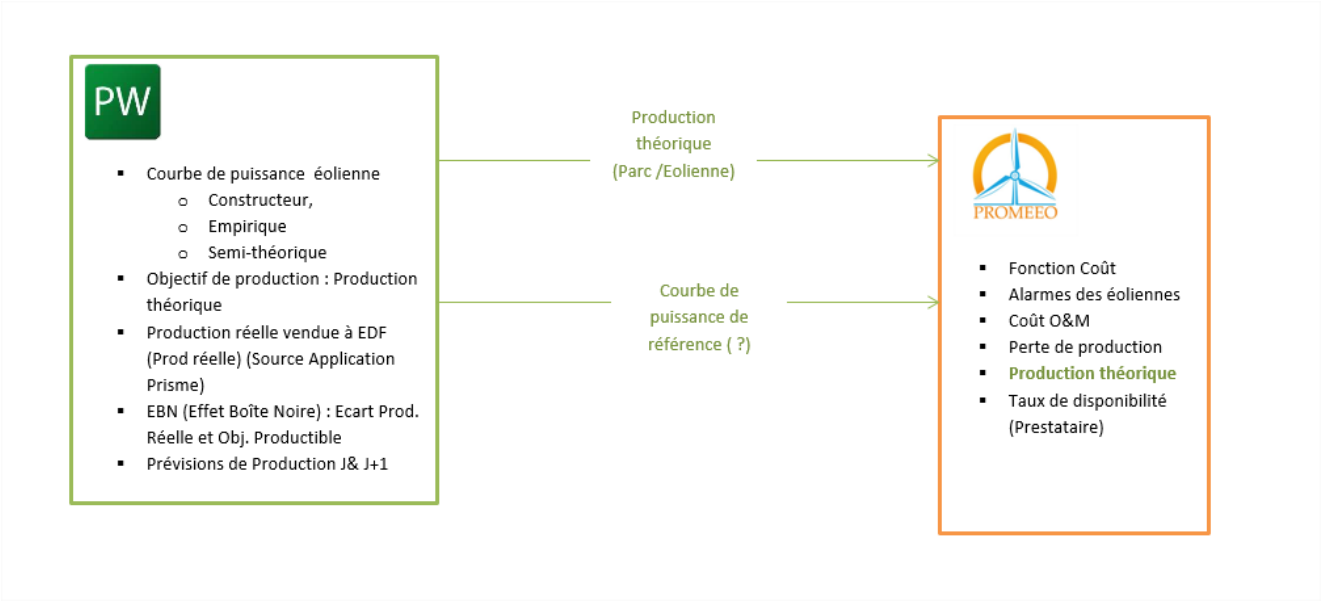


Figure 46 Sources de données de production

3.5.3. *Interactions avec XWind*

XWind est un outil analytique qui fournit plusieurs informations sur les arrêts et les différentes disponibilités des équipements selon le niveau de granularité d'analyse (zones, parc ou éolienne).

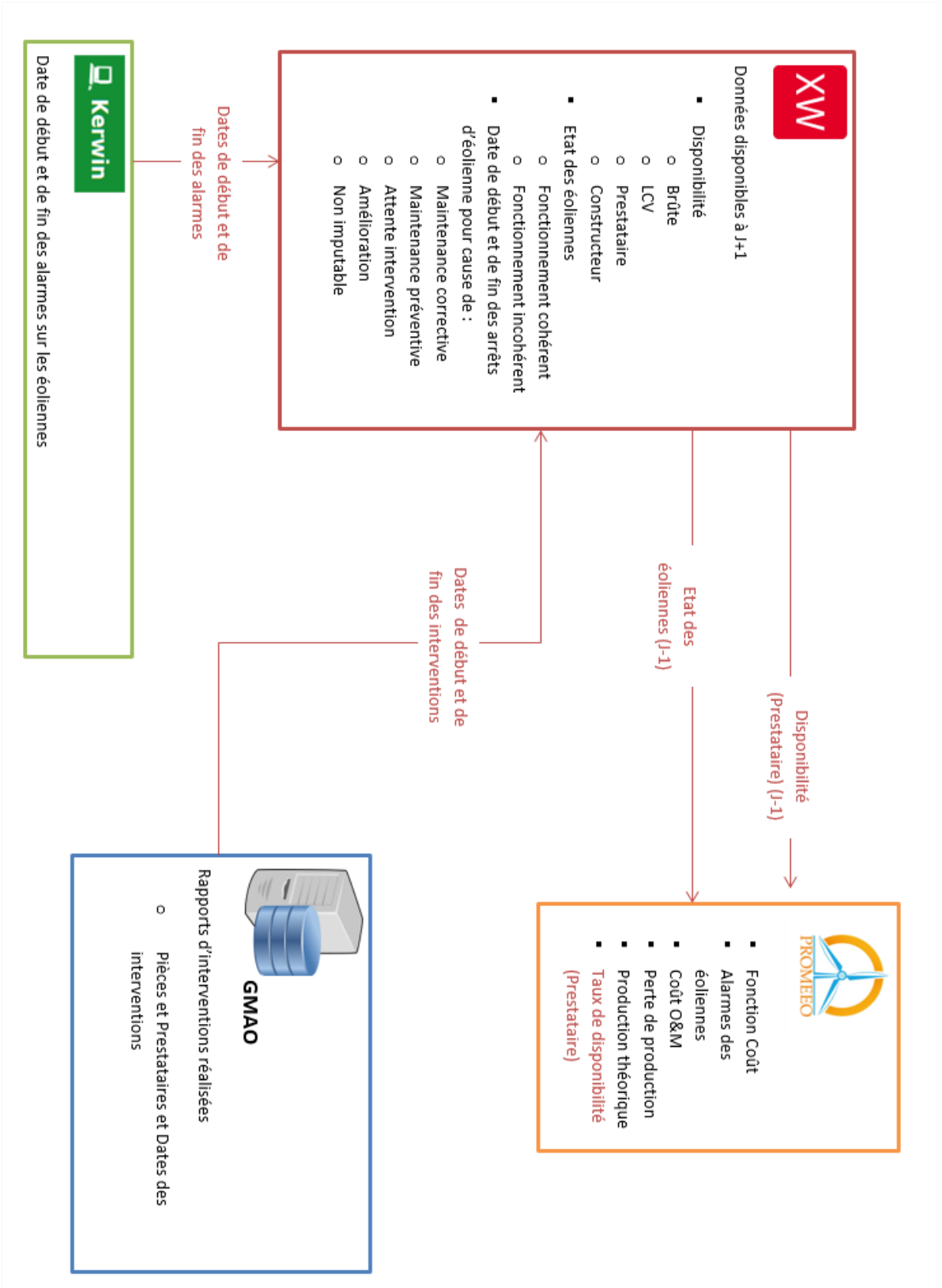


Figure 47 Interaction avec l'outil d'analyse Xwind

3.5.4. *Les données d'entrées de Kerwin vers XWind*

Le SCADA transmet des informations sur les alarmes à l'outil analytique Xwind. Ces informations permettent de calculer les différentes disponibilités temporelles qui seront utilisées dans PROMEEO.

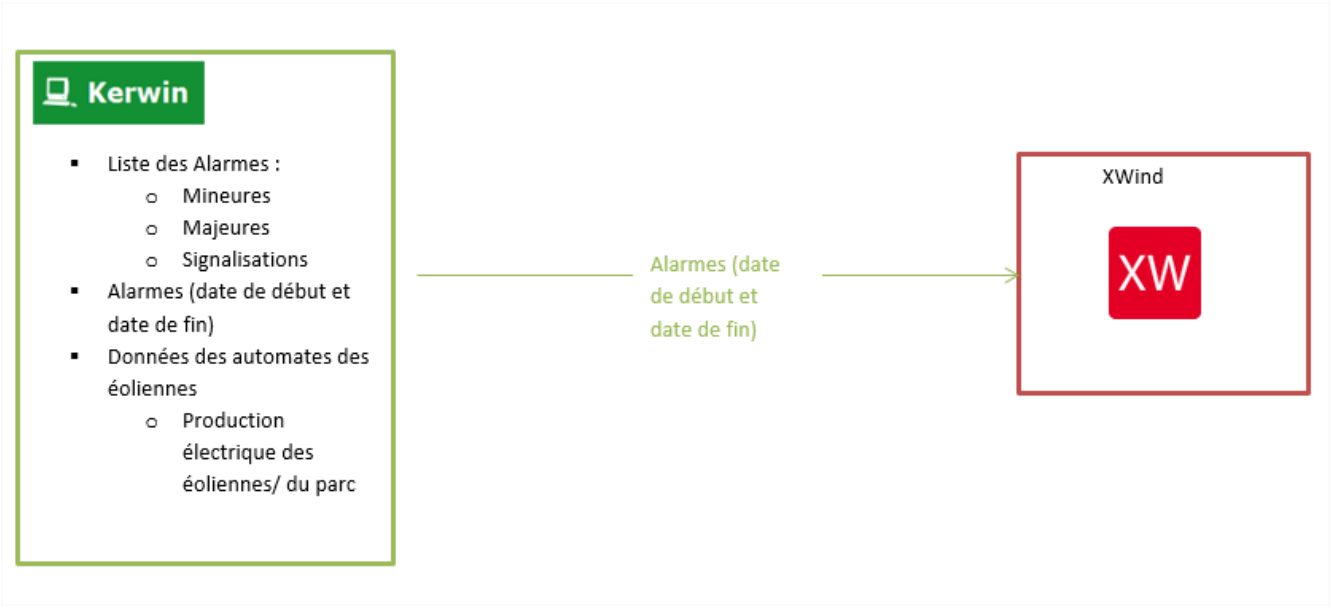


Figure 48 Interaction entre le SCADA Kerwin et l'outil Xwind

3.5.5. *Données d'entrées de la GMAO*

Les données d'entrées de la GMAO concernent les pièces et leurs coûts de sorties de stock. C'est la source des informations concernant les pièces qui seront utilisées dans l'application.

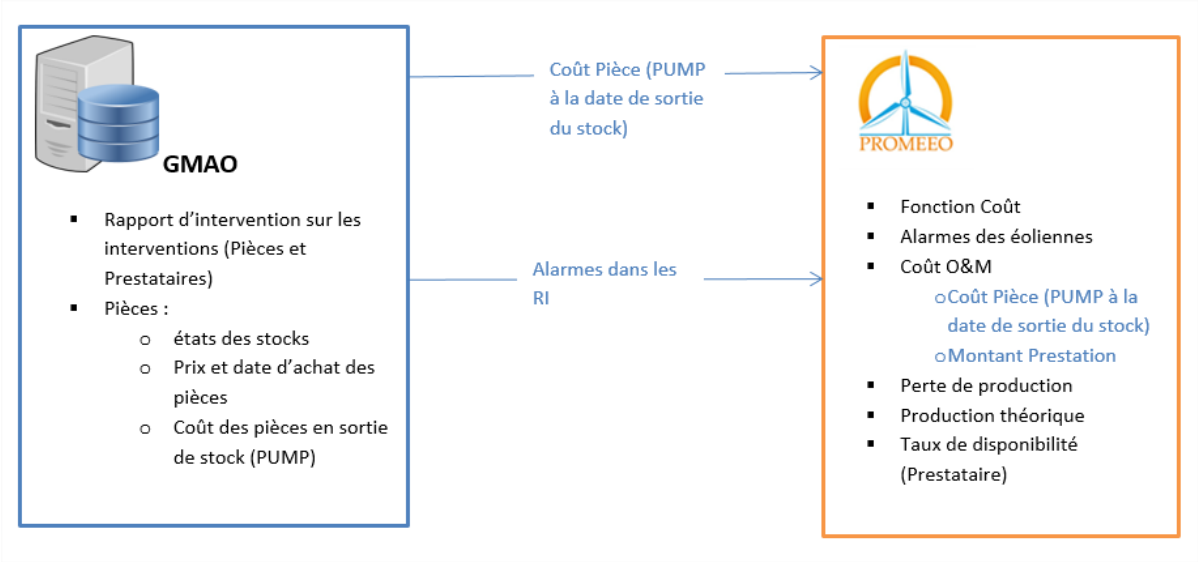


Figure 49 Interaction avec la gestion des pièces

3.5.6. *Données base Prestation*

Les informations relatives au contrat de prestation sont répertoriées dans une base de données qui alimentera celle de Promeeo. Les informations transmises concerneront l'ensemble des contrats, les montants, les disponibilités contractuelles, et les prestataires chargés d'exécutés ces contrats.

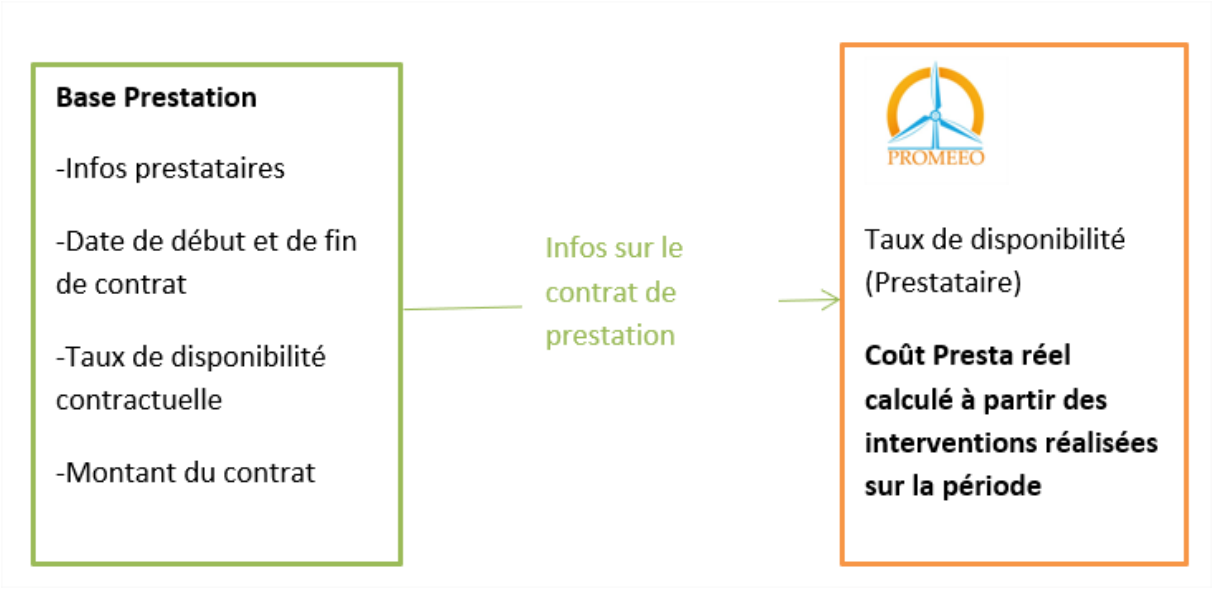


Figure 50 Données sur les contrats de prestation

3.5.7. *Données d'entrées sur la production réelle : SATURNE*

Les informations concernant la production réellement vendue proviennent d'une application externe au SI propre à l'entreprise. Cette source fournit un ensemble d'information sur la production qui a été validée au niveau comptable. Elle n'est pas calculée mais relevée.

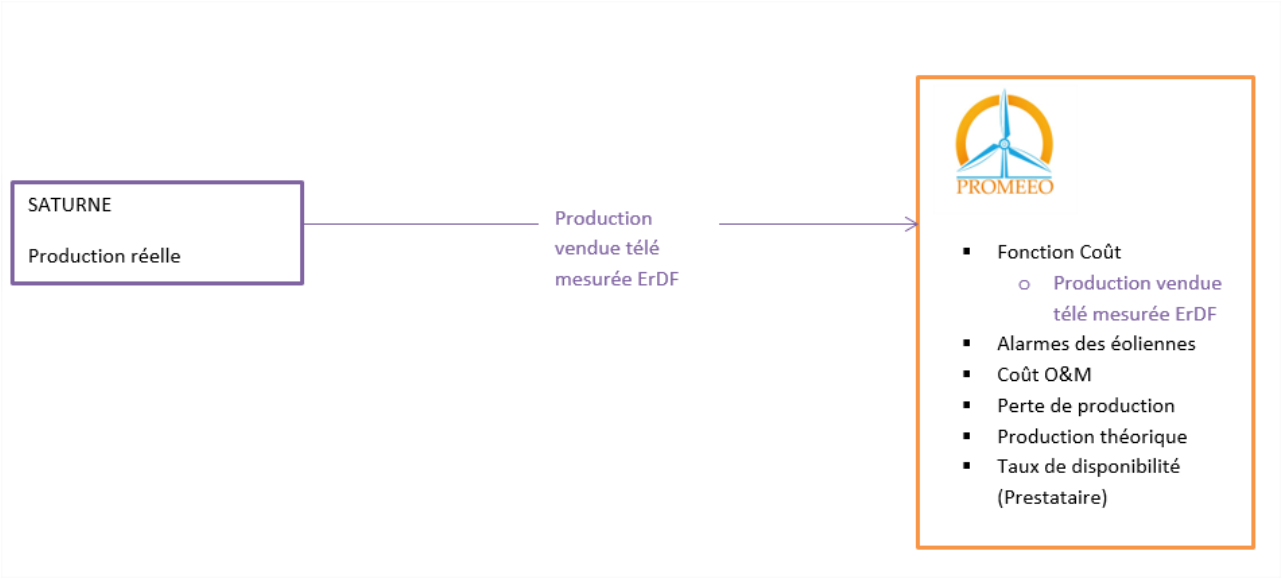


Figure 51 Interaction entre l'outil Saturne et Promeeo

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce travail de recherche était de répondre à la question de l'optimisation de la maintenance de parcs éoliens. L'exploitant éolien évolue dans le contexte concurrentiel dense de la production d'électricité issue de parcs éoliens. Dans ce secteur, il est primordial que les entreprises maîtrisent leurs coûts de production.

L'objectif de l'exploitant LCV (La Compagnie du Vent) est de réduire son coût de maintenance et de maximiser sa production. L'entreprise construit donc une politique d'optimisation associée à des outils pouvant lui permettre d'anticiper les pannes (à travers la connaissance fine de leurs causes) et d'estimer en amont leurs coûts [31].

La question initiale était d'identifier un système qui, en tenant compte des différentes contraintes fonctionnelles, permettrait de baisser le montant global des charges de maintenance pour une maximisation du chiffre d'affaires. Ces contraintes s'articulent autour de deux axes principaux : les pannes et leurs conséquences financières sur l'appareil de production (la fonction Coût).

Du point de vue du secteur, l'objectif est de faire un état des lieux des critères qui permettent d'améliorer la maintenance et la productivité des parcs. Du point de vue du système d'information, l'objectif est de disposer d'un système global qui produit un ensemble d'informations : ces informations proviendraient d'un SMA dans lequel les agents auraient des comportements individuels avec des objectifs précis qui leur sont assignés. Toutes ces informations devraient être ensuite réifiés sous forme de concepts d'ontologie. L'avantage d'une ontologie est qu'elle permet d'identifier les concepts ainsi que leurs relations.

C'est principalement la typologie des agents dans le système et la capacité de celui-ci à concevoir ces possibilités d'actions et à choisir la ou les bonnes actions à exécuter qui rendront pertinentes ces décisions. Le niveau de granularité adopté permet d'affiner les échanges entre les entités proactives. Enfin, l'adaptabilité du système au sens où il se conforme à l'évolution de l'environnement et de ses contraintes entre en compte dans la validité des décisions émergentes.

3.6 Bilan de la thèse

Durant la préparation de cette thèse, nous avons travaillé sur deux points : le premier concerne la fonction économique relative à la maintenance chez la Compagnie du Vent et son indicateur principal, la « fonction coût ». Le second concerne le système de décision qui s'appuie sur une plateforme logicielle dont le modèle SMA (système multiagent) sert à calculer les différents indicateurs financiers que nous avons définis pour l'analyse et la simulation de l'activité de maintenance. Ce modèle agent est en relation avec l'ontologie du domaine. La plateforme de simulation est développée selon un cycle « en spirale » sur la base de prototypes évolutifs.

Le développement de la première version du prototype est en cours avec une recette à venir en Novembre 2016. La contrainte principale concerne la formalisation des données d'entrées. La qualité des données de sortie du système dépend de celle des données d'entrées provenant de différentes bases de données. Avant leur intégration au prototype visé, ces données doivent être vérifiées et

retraitées dans le cas où elles seraient incohérentes ou incomplètes. Cela représente un travail qui peut devenir fastidieux.

Le logiciel modélisé dans le cadre de la thèse repose sur l'architecture MVC (Modèle - Vue - Contrôleurs) avec un système multiagent intégré. La partie « Modèle » porte sur la base de données qui alimente le système multiagent qui réalisera la simulation. Cette base de données est alimentée par différentes données provenant de sources différentes. Elles concernent principalement l'historique des pannes, des alarmes indiquant ces pannes, des pièces utilisées pour les résoudre et les rapports d'intervention fournis par le prestataire. Il s'agit aussi des données de production théorique par éolienne. Ces données sont fusionnées, concaténées et intégrées dans la base de données de l'outil. C'est l'une des tâches importantes et fastidieuse, nécessaires au développement du prototype. Dans le développement de notre prototype, nous avons pu effectuer ce travail de fusion des données pour huit parcs éoliens. Nous avons pu développer toute la partie « Objet » du modèle et nous nous sommes arrêtés à l'implémentation des agents et leurs comportements.

3.7 Contributions et perspectives

Les champs théoriques associés aux contributions scientifiques sont : la modélisation des systèmes multiagents, la maintenance industrielle et l'O&M en maintenance. En guise de perspectives d'amélioration, il faudrait :

- Améliorer la méthode de passage des connaissances définies en objets UML et d'ontologie qui sera intéressante à développer : il faudra qu'elle soit applicable à une plus grande échelle sur un large périmètre du domaine de l'éolien.
- Définir des règles d'organisation des interactions entre les agents dans le cadre de simulation applicable dans un domaine industriel présentant les mêmes contraintes.
- Mieux prédire les pannes critiques en interprétant mieux les signaux faibles provenant des capteurs. En prolongeant la réflexion sur la simulation et la prédiction des coûts de pannes, nous avons fait un aperçu sur la prédiction de ces pannes via les signaux faibles. Ce travail a été effectué sur une éolienne en analysant, à travers l'historique, les liens statistiques entre les alarmes dites « mineures » qui n'entraînent pas d'arrêt de l'éolienne et les alarmes dites critiques qui sont équivalentes à une panne des éoliennes. Ce travail pourrait être amélioré dans le cadre d'une meilleure anticipation des pannes.
- Catégoriser le type d'agents à avoir dans le contexte de la maintenance industrielle d'abord au niveau éolien puis à d'autres domaines industriels présentant les mêmes contraintes d'optimisation et de rationalisation de coûts.

Le bilan à tirer de notre travail se résume à l'intérêt de rendre des SMA à la fois compréhensibles et utiles pour les acteurs d'une entreprise. D'un point de vue scientifique, toute la démarche que nous avons adoptée pour concevoir le modèle reste fortement liée à l'intérêt que peuvent lui porter les experts fonctionnels (qui détiennent la connaissance). Au-delà de la qualité des technologies utilisées, la démarche de création et d'enrichissement du modèle est subordonnée au niveau d'implication des « fonctionnels ». Le contexte de l'entreprise étant extrêmement mouvant, il impacte à la fois l'ontologie et le modèle agent ; maîtriser cette chaîne et la standardiser (car le contexte de l'entreprise évolue) revient à garantir la véracité des résultats attendus.

Du point de vue de l'approche scientifique, nous pensons que le développement de la sémantique permettra de mieux interpréter la signification des pannes. Nos modèles économique et informatique pourraient être enrichis tant du point de vue de la fonction de coût que du point de vue du simulateur. Par ailleurs, l'approche système autonome tel que décrite dans [40] pourrait également s'appliquer. C'est une vision globale pour le développement d'un système intégrateur concerné par l'optimisation de la maintenance et pouvant progressivement prendre en compte l'ensemble des parcs éolien concernés.

Bibliographie

[1] «Norme AFNOR X60-010,» AFNOR, 2015.

[2] F. P. d. Jong, «Development of a model to estimate O&M costs for onshore wind farms / Frans P. de Jong ; supervised by A.J.D. Lambert and J.B.M. Goossenaerts,» Technische Universiteit Eindhoven (TUE)., Eindhoven, 2007.

[3] J. Gosset et T. Tranchin, Bilan et prospective de la filière éolienne française, 2006.

[4] Rademakers, H. Braam, T. Obdam et R. v. Pieterman, «Operation and Maintenance Cost Estimator,» chez *European Offshore Wind*, Stockholm, 2009.

[5] F. Monchy et J.-P. Vernier, Maintenance Méthodes et organisations, Paris: DUNOD.

[6] C. WALFORD, «Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine,» *SANDIA REPORT SAND2006-1100,* 2006.

[7] M. R. a. A. Holyland, System reliability theory, Hoboken, 2004.

[8] I. El-Thajli, I. Alsyouf et G. Ronsten, «A model for assessing operation and maintenance cost adapted to wind farms in cold climate environment: based on Onshore and offshore case studies.,» chez *European Offshore Wind Conference proceedings*, Stockholm, 2009.

[9] V. ZILLE, Thèse : Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants, 2009.

[10] S. Actes Industrie, «Actes Industries,» 2016.

[11] CCI-Normandie, «Ccirezo Normandie,» [En ligne]. Available: https://www.ccirezo-normandie.fr/actualite/81558-l-innovation-dans-le-vent. [Accès le Juin 2015].

[12] R. V. d. Pieterman, «Maintenance Strategies for Offshore Wind farms,» 2011.

[13] D. B. A. B. Mohamed Sahnoun, «Modélisation d'un plan de maintenance basée sur les systèmes multi-agents pour les éoliennes offshore,» chez *10ème Conférence Internationale de MOdélisation, Optimisation et SIMulation - MOSIM'14 - 5 au 7 Novembre 2014*, Nancy, 2014.

[14] M. Galvez et L. Rakoto, «Présentation : détection et isolation de défauts capteurs dans la régulation de puissance des éoliennes,» 2011.

[15] G. M. Yassa, Cours sur la Maintenance des équipements, 2009.

[16] J. Ferber et O. Simonin , «Un modèle multi-agent de résolution collective de problèmes situés multi-échelles,» *JFSMA,* 2003.

[17] J. FERBER, «Les systèmes multi-agents: un aperçu général,» chez *Technique et Science Informatiques*, 1997.

[18] M. Wooldridge, Agent-based software engineering, 1997.

[19] M.-O. LaBarre, «Apprentissage Multi-agent,» 2005.

[20] G. Hutzler et T. Melliti, Intelligence Artificielle Distribuée Systèmes Multi-agents.

[21] FIPA, FIPA Agent Management Specification, Genève, 2004.

[22] L. VERCOUTER, «Conception et Mise en oeuvre de Systèmes Multi-agents Ouverts et Distribués,» chez *JFADSMA*, 2001.

[23] K. SEHABA, «Gestion de l'ouverture des SMA,» 2002.

[24] A. m.-m. f. t. a. a. d. o. o. i. m.-a. systems, «Olivier Gutknecht, Jacques Ferber,» *Proceeding of the 3rd international conference on multi-agent systems,* pp. 128-135, 1998.

[25] A. BOJAR, «http://www.alibojar.com/boris-net,» [En ligne]. [Accès le Août 2015].

[26] N. Becu, P. Bommel , C. Le Page et P. Boursquet, «Cormas, une plate-forme multi-agent pour concevoir collectivement des modèles et interagir avec les simulations,» chez *Cépaduès, actes des 24èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, Rouen, 2016.

[27] R. F. T. F. T. G. T. S. e. W. S. R. NECHES, «Enabling technology for knowledge sharing,» *AI Magazine,* vol. 12, pp. 36-56, 1991.

[28] T. R. Gruber, «Toward principles for the design of ontologies used for knowledge,» *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation,* 1993.

[29] V. B. e. D. F. R. Studer, «Knowledge engineering: Principes and Methods,» *Data & Knowledge Engineering,* 1998.

[30] J. Sowa, Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations, Broché, 2000.

[31] ALEXANDRE Phillipe, Le projet de thèse, 2014.

[32] F. ZINI et L. Sterling, «Designing ontologies for agents,» *APPIA-GULP-PRODE,* 1999.

[33] A. Ayimdji, S. Koussoube et L. P. Fotso, Développement de systèmes multi-agents à partir d'ontologies, 2010.

[34] N. Abaidi, «Rapport de stage O&M,» LITIS, ROUEN, 2012.

[35] «Expert comptable.com,» 2014. [En ligne]. Available: http://www.l-expert-comptable.com/comptabilite/l-analyse-comptable-et-financiere/l-ebitda.html. [Accès le 14 03 2014].

[36] «Wiki Eolienne,» [En ligne]. Available: http://eolienne.f4jr.org/. [Accès le 22 Septembre 2015].

[37] AFNOR, «NORME AFNOR X-60 500».

[38] F. TOMALA, Cours sur la maintenance.

[39] M. BELLEC, «Fonction Objectif Stratégies O&M,» 2012.

[40] M. ITMI et A. CARDON, New autonomous systems.Wiley, 2016.

[41] J. Ferber, Les systèmes multi-agents, 1995.

[42] «https://www.ccirezo-normandie.fr/actualite/81558-l-innovation-dans-le-vent,» [En ligne]. [Accès le Juin 2015].

[43] P.-É. Crépy, Systèmes intelligents d'aide à la décision collective : SMA et simulation des marchés financiers, Paris: Université Paris-Dauphine, 2014.

[44] LCV Marion BELLEC, «Etude O&M : Fonctions objectifs et stratégies,» Montpellier, 2012.

[45] M. KPAKPO, C. PENIN et P. ALEXANDRE, «Module de panne,» Montpellier, 2016.

[46] M. KPAKPO, C. PENIN et P. ALEXANDRE, Note sur la fonction coût, Montpellier, 2015.

[47] J. RIBRANT, «Reliability performance and maintenance - A survey of failures in wind,» 2006.

[48] M. KPAKPO et M. ITMI, «A MAS model for O&M Cost simulation and optimization: case of a wind power operator,» chez *4th International Colloquium on Information Science and Technology (IEEE-CIST'16). Oct. 24-26*, Tangier Morroco, 2016.

[49] M. KPAKPO, M. ITMI, P. ALEXANDRE et C. PENIN, «Building wind farm maintenance strategy on an agents approach model,» chez *IEEE IRSEC'17*, Tanger (Maroc), 2017.

[50] M. KPAKPO, M. ITMI et A. CARDON, «A MAS Model Approach to a Wind Farm Maintenance Strategy,» chez *10th Intrnational Conference on Agents and Artificial Intelligence. ICAART'18*, Madeire (Portugal), 2018.

[51] A. CARDON et M. ITMI, Systèmes, Modélisation constructiviste pour l'autonomie des agents, Mai 2012.

[52] A. Industrie, «http://www.acteindustrie.fr/,» [En ligne]. [Accès le Juin 2015].

[53] I. Lahoud, Thèse : un système multi-agents pour la gestion des connaissances hétérogènes et distribuées, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, , 2013.

[54] D. Monticolo, Thèse: Approches organisationnelles pour la conception de systèmes multi-agents dédiés à la gestion des connaissances; Application aux projets d'ingénierie et d'innovation, Université de Lorraine, <tel-01312308>, 2015.

Glossaire

AWE	American Wind Energy
DEX	Direction exploitation et maintenance
DOWEC	Dutch Offshore Wind Energy Converter
DTU	Deflt Technic University
ECN	Energy research Centre of the Netherlands
ENR	Energies renouvelables
LCV	La Compagnie du Vent
LITIS	Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes
MWCOST	Modeling Windfarm Capex & Opex with Sloop
NREL	National Renewable Energy Laboratory
O2M	Optimization of Operation and Maintenance
O&M	Operation and Maintenance
OMCE	Operation and Maintenance Cost Estimator
ROMEEO	Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et de l'Exploitation des parcs Eoliens Offshore.
PROMEEO	Plateforme de Rationalisation et Optimisation de la Maintenance et de l'Exploitation des parcs Eoliens Offshore.

Annexes

Présentation de la Compagnie du vent (LCV)

La Compagnie du Vent a été créée en 1989 par Jean-Michel Germa. Elle est considérée comme une des entreprises pionnières en matière d'énergie éolienne en France, et fait partie des leaders dans le domaine des énergies renouvelables via son récent rachat (Avril 2017) par le groupe Engie. Dans sa stratégie de diversification des énergies renouvelables qu'elle produit, elle a développé aussi ses activités dans l'énergie solaire via sa filiale : la Compagnie du Soleil qui développe, construit et exploite des centrales photovoltaïques aussi bien au sol qu'intégrées au bâtiment. Une des caractéristiques essentielles de l'entreprise est qu'elle maîtrise l'ensemble des métiers issus de la vente d'électricité éolienne, hormis la fabrication des machines. Elle recherche des sites d'implémentations des parcs, assure la concertation avec les publics concernés, développe des projets, les finance, construit les installations et prend en charge leur exploitation. L'entreprise est composée des directions suivantes :

- La direction du développement (DIDEV) : cette direction est le premier acteur dans la conception des projets. Elle gère toutes les étapes de préparation du projet : de la création du projet jusqu'à l'obtention du permis de construire. Sa mission s'articule autour de plusieurs aspects tels que la prospection des sites, la concertation avec les acteurs locaux, les campagnes de vérification des potentiels éoliens et l'estimation de production en collaboration avec le pôle Etudes de la DEMSI (direction Etudes, Mesures et Systèmes Innovants).

- La direction chargée du foncier et des acquisitions (DIFA) : cette direction contrôle tous les aspects fonciers et le financement des parcs. Elle est chargée de l'acquisition des terrains pour l'implantation du parc. Elle gère les négociations entre propriétaires et exploitants ainsi que l'achat ou la location du terrain.

- La direction chargée de la construction (DCO) : cette direction supervise l'installation des parcs éoliens et photovoltaïques. Elle gère la construction du parc, le choix des entreprises pour les raccordements au réseau et l'installation de la télégestion. Elle effectue le suivi de chantier et joue le rôle de maîtrise d'ouvrage.

- La direction chargée de l'exploitation et la maintenance (DEX) : cette direction gère l'ensemble des parcs après leur construction (suivi de production, planification des visites de contrôle, maintenance, approvisionnement des pièces de rechange). Elle est responsable de la planification des opérations de maintenance sur les parcs

- La direction Etudes, Mesures et Systèmes Innovants (DEMSI) : elle a pour rôle de fournir des outils et des informations sur la productivité et le potentiel des parcs éoliens. Elle a aussi pour mission de participer à l'innovation à LCV par des outils susceptibles d'améliorer l'analyse de la production et de la performance des installations (analyse de la production des parcs avant et après construction, mesures de vents, analyse de perte de performance des éoliennes). Cette direction est composée de trois pôles : le pôle innovation au sein duquel la thèse été effectuée et les pôles Etudes et Mesures.

3.7.1. *La DEMSI (direction Etudes, Mesures et Systèmes Innovants)*

Le pôle Mesures

Sur les sites potentiels, le pôle Mesures se charge de suivre, via tous les outils de mesure à sa disposition, des campagnes de recueil de données annuelles (minimum) ou pluriannuelles. Parmi ces outils, on distingue par exemple le mât de mesures : c'est un mât permettant les prélèvements de données relatives au vent sur une année complète et à différents niveaux d'altitudes, sur un site bien précis. La girouette sur le mât s'oriente suivant le vent et mesure son orientation du vent en degrés (entre 0 et 360°). Le vent est mesuré par des anémomètres, situés à différents niveaux d'altitudes, de manière à connaître l'évolution du vent en fonction de la hauteur. Ces anémomètres sont systématiquement doublés à chaque étage de manière à éviter les erreurs de mesures. Grâce à l'alimentation électrique par un panneau solaire, les données de vent sont collectées et envoyées vers un ordinateur qui les enregistre tout au long de la campagne de mesure. D'autres instruments de mesure sont utilisés comme les LIDAR, et les SODAR qui peuvent au choix remplacer le mât ou le compléter.

Deux phases sont à distinguer concernant les installations des mâts de mesure.

1. La première concerne la phase d'étude (avant construction) pendant laquelle on installe un mât « projet » qui servira pendant la phase de recueil de données. Les données sont récupérées et stockées sur place dans des centrales de mesures appelées « Enregistreur » (ou Datalogger) ; ces données sont ensuite validées et envoyées au pôle « Etudes » pour la réalisation des études de potentiel de production du site à long terme.

2. La deuxième concerne la phase post construction : un nouveau mât de mesure est installé avec les éoliennes. Ce pylône d'exploitation sert à recueillir des données pendant toute la période d'exploitation du parc.

Le pôle Etudes

Le pôle **Etudes** est responsable de l'étude du potentiel éolien (EPE) mais il réalise également des études d'évaluation des objectifs de production. Une comparaison est effectuée entre la production « théorique » calculée à l'aide des données du pylône d'exploitation et la production réelle. A partir de données corrélées et d'extrapolations il fournit toutes les prévisions de production qui montrent l'état futur de la production du parc en prenant en compte les pertes éventuelles.

Le pôle Innovation

Il est chargé des projets d'innovation à destination des différentes directions. Ce pôle gère une série de projets, d'outils et de méthodes destinés à être utilisés pour améliorer la performance des métiers de LCV.

3.7.2. *La DEX (direction d'exploitation et maintenance)*

La charge de la maintenance des parcs éoliens incombe à plusieurs métiers à LCV et implique deux directions principalement. En première ligne, la Direction Exploitation (DEX) qui gère la production et traite les différentes pannes qui surviennent. La Direction d'Etude et Mesures et Systèmes

d'Informations (DEMSI), quant à elle, fournit des solutions d'innovation et des outils logiciels à différentes directions de l'entreprise dans le cadre de leurs missions.

La direction d'exploitation des parcs et leurs outils

L'objectif fixé par LCV est de garantir un niveau de disponibilité des parcs de 97%. C'est au niveau de la direction d'exploitation (DEX) que sont gérées les différentes étapes de la production d'électricité jusqu'à la facturation. Cette tâche revient au service chargé de la maintenance des parcs. Par maintenance, on entend toutes les techniques, mesures et actions dont le but est de conserver l'état d'une pièce, de la restaurer ou de la remplacer pour obtenir un fonctionnement optimal. Cela peut inclure le nettoyage, l'inspection, l'ajustement ou le remplacement. La connaissance relative à l'exploitation et la maintenance des parcs relève d'abord de l'ingénierie technique. Celle-ci est ensuite complétée par l'expérience de LCV en matière de maintenance des parcs. Une partie de cette expérience a été matérialisée par des arbres de maintenances qui décrivent des processus de prise en charge de pannes ou d'anomalies constatées sur les éoliennes. Ils correspondent à quelques alarmes bien déterminées et sont utilisés par les chargés d'exploitation lorsque le prestataire chargé de la maintenance est bloqué et ne dispose pas de l'expertise nécessaire pour gérer la panne. L'outil KERWIN fournit une multitude d'alarmes dont une grande partie n'est pas utilisée ; elles sont catégorisées en trois types (par gravité croissante) : signalisations, mineures et critiques. Les deux premières catégories d'alarmes : alertes et alarmes mineures n'entraînent pas d'arrêts de l'éolienne ; seules les alarmes de type critiques entraînent un arrêt automatique de l'éolienne.

Les principaux outils utilisés par la DEX

- **Le système KERWIN** : édité par Schneider Electric, c'est le SCADA[6] utilisé par LCV pour récupérer les données issues des capteurs de l'éolienne. Il se définit comme un CMS[7] qui indiquent l'état des équipements du parc afin de prévenir les pannes ou de les signaler lorsqu'elles surviennent. Il y a un écart de 3h entre le moment où les données sont récupérées dans l'éolienne et leur transfert dans KERWIN. La version Web de l'application est Kerweb.

- **L'application Xwind** : c'est un logiciel de supervision des parcs destiné aux chargés d'exploitation ; il fournit des informations sur la disponibilité de chaque éolienne et de chaque parc. Les données sont récupérées de Kerwin et de l'outil GMAO et analysées à J+1. Les données sont agrégées pour fournir une série d'indicateurs actualisés sur les parcs, la disponibilité de chacune des éoliennes et la logistique.

- **L'application GMAO** : c'est le principal outil du pôle achat. Il est accessoirement utilisé par les chargés d'exploitation et de maintenance. Ce logiciel permet d'organiser l'intervention planifiée par le chargé d'exploitation. Grâce à lui, le chargé d'exploitation édite l'ordre de travail (OT) correspondant à la préparation de l'intervention (couts main d'ouvre, pièce etc…). Cet OT donne naissance à un rapport d'intervention (RI) qui conclut le processus d'intervention. C'est ce rapport d'intervention qui rend compte du temps effectif d'intervention et des pièces utilisées ; ces pièces sont ensuite déduites du stock par le pôle Achats.

[6] Supervisory Control and Data Acquisition
[7] Conditions Monitoring System

Gestion d'une panne à la DEX

Sauf pour les types de panne nécessitant des travaux complexes, on peut résumer en cinq étapes la prise en charge d'une panne ayant entraîné un arrêt de l'éolienne :

1. La panne est signalée via une ou une série d'alarmes via l'outil Kerwin.

2. L'information est transmise au même moment au chargé d'exploitation et au prestataire chargé de maintenance qui effectue un diagnostic rapide. L'ordre de travail est ensuite établi. Le prestataire se déplace sur le parc et doit avoir théoriquement l'autorisation du chargé d'exploitation avant d'entrer dans l'éolienne ; il s'avère, en pratique, que le prestataire par souci de rapidité y accède régulièrement sans demander l'autorisation. Si le prestataire réalise un changement de pièce avec une pièce issue du stock de LCV, il le consigne dans son rapport d'intervention

3. Le prestataire règle la panne et le rapport d'intervention est envoyé au chargé d'exploitation qui, après l'avoir validé, le transmet au pôle achats pour qu'il mette à jour le niveau de stock suivant les pièces utilisées.

Parmi les parcs en exploitation, on distingue ceux qui sont encore sous garantie constructeur et d'autres qui sont gérés par des sociétés de maintenance. Dans tous les cas, la société chargée de la maintenance du parc a pour interlocuteur un membre de l'équipe de la DEX. En fonction de la gravité de la panne, et du temps de réparation, le type d'interlocuteur variera. Ils sont catégorisés en deux pôles à savoir : exploitation et maintenance. Le pôle exploitation gère les pannes courantes et les pôles Maintenance est sollicité pour les pannes exceptionnelles et complexes nécessitant une expertise technique poussée (c'est le cas des pannes hors du champ contractuel de la maintenance du parc).

Le tarif d'obligation d'achat dans le secteur éolien

Lorsque l'on construit un parc, il est créé au début un contrat avec ERDF pour le rachat de l'électricité. Pendant 5 ans (et depuis quelques années 10 ans), le rachat est effectué à un prix fixe. Il s'agit d'une sorte de subvention. Lorsque l'on sort de cette période, il est calculé le « DAFR » (durée annuelle de fonctionnement relatif) qui donne en fait en quelque sorte la puissance réelle sur l'année en faisant une moyenne des années moyennes (tirés la plus haute et plus basse valeur). (En effet, on ne produit pas la production théorique maximale de l'éolienne, celle-ci est issue de l'hypothèse que l'éolienne fonctionnerait à sa puissance nominale (maximale) pendant l'ensemble de 8766 heures que comptent une année). Plus on a produit, plus le prix de rachat pendant les années qui vont suivre va être bas, le calcul est effectué qu'une fois, le prix de rachat ne change ensuite qu'en fonction de l'inflation. Certaines entreprises limitent ainsi le fonctionnement de leurs éoliennes pendant ces premières années afin d'obtenir un prix de rachat plus important pendant les années suivantes. Ce n'est pas le cas de LCV dont le but est d'aller vers un maximum de production. Au bout de 20 ans, on sort de l'obligation de passer par ERDF, et on peut en théorie, changer d'acheteur.

3.7.3. *Comment intervient la météo dans les différentes opérations ?*

Les conditions de pluie n'interviennent quasiment jamais (excepté lors par exemple d'un changement de multiplicateur ou il faut ouvrir la nacelle), de la même manière les conditions de jour sont rarement nécessaires (maintenance peinture sur le mât, changement de pâles…). En effet, l'intérieur des nacelles

est généralement éclairé avec des sortes de néons. Cependant d'autres conditions rentrent vraiment en compte comme : l'orage**, la neige (et notamment la période de dégel donné par la préfecture durant laquelle tout ne peut pas rouler sur les différentes voies**), la glace et le givre. Pour éviter ces différentes conditions et parce que le vent est plus important notamment dans les parcs du Sud l'hiver, LCV tente de mettre davantage de maintenance l'hiver. Cependant, ce n'est pas toujours facile à mettre en place, en effet, il y a souvent également moins de personnels l'été.

Description d'un parc éolien



A l'entrée du parc va se trouver le poste de livraison, dans lequel se trouvera le transformateur d'ERDF mais aussi le transformateur de LCV. En général collé à ce local se trouve le local de télégestion dans lequel sont récoltés les différentes informations données par les capteurs sur l'éolienne. C'est à partir de ce poste de télégestion que sont communiqués les différentes informations qui sont traités à travers le SCADA.

-A quoi sert le pylône de mesure

A un endroit stratégique du parc, est placé un pylône de mesure. Ce pylône sert lors de la phase d'étude mais est conservé lors de la phase d'exploitation, il permet d'obtenir des données sur le vent. Ce **pylône est également soumis à différentes activités de maintenance** afin d'avoir des données fiables

3.7.4. *Fonctionnement de l'éolienne*

La génératrice va transformer l'énergie cinétique en énergie électrique puis celle-ci va être traitée pour éviter les différents parasites. Le transformateur va faire passer la tension qui est présente dans la nacelle d'environ 690V à une tension de 20 000 V qui va ensuite être relié au poste de livraison et adaptée au réseau dans le poste de livraison par le transformateur.

Le système électrique est présent un peu partout (contrôle, capteur, convertisseur…). Il en est de même pour le système hydraulique (freins du rotor, frein entre la nacelle et la tour, orientation des pâles…)

Les différentes alarmes n'amènent pas forcément à l'arrêt de la machine. Il y a les alarmes mineures (n'arrête pas mais prévient l'exploitant), les alarmes intermédiaires (arrête temporairement environ pour 10 min et réarme l'éolienne, au bout de trois réarmements, on va vers l'alarme critique), l'alarme critique qui arrête la machine et ne rend possible le redémarrage qu'en cas d'intervention

-Place du constructeur dans les activités O&M

Hors garantie, le constructeur n'est plus directement vraiment lié à l'exploitant. Il se doit de garantir l'efficacité décennal de certains composants (exemple en matière de rouille) et fournit parfois les différentes pièces (soit parce qu'il a signé quelque chose qui lui garantit l'exclusivité soit parce que c'est le meilleur).

Pendant la garantie, on parle de full stock. Le constructeur se gère totalement, c'est à lui de gérer les différents approvisionnements. Il doit cependant rentre également des rapports d'intervention à l'exploitant. Il est cependant jusqu'à présent libre dans ces différentes activités de maintenance préventive (on essaie d'aller vers des contrats incluant ces conditions), la seule obligation du constructeur est l'état de lieux de sortie au bout des deux ans de garantie ou l'exploitant peut imposer certaines maintenances avant la réception.

-Planification des interventions

Le pôle Planification ne communique pas directement avec les techniciens. En effet, le pôle Maintenance et le pôle Exploitation transfère à la planification les interventions qui sont prévues mais c'est eux qui continuent de gérer ce qui se passent sur leur parc. Ainsi, la planification transmet les possibilités d'intervention dans les deux jours aux deux autres pôles qui en discutent avec leurs intervenants.

-Automaticité des machines

Chaque éolienne contient un système automatique qui en fonction du vent, des alarmes (et de leur criticité) et des commandes reçues par le poste de télégestion s'adapte. Ainsi la machine gère les arrêts et redémarrages automatiques ou encore l'orientation de la machine (angle exacte face au vent). Le poste de télégestion sert davantage à transférer les différentes informations entre le logiciel et l'éolienne (coupure, alarmes). Il peut dans de rares cas, servir à programmer des horaires de fonctionnement pour des campagnes de mesures. En cas de demande de l'exploitant, il peut le rentrer dans le logiciel de télégestion pour transférer sa commande à l'éolienne.

-Précision sur les stocks

Un stock peut être ou non commun à plusieurs parcs. Il est également possible d'effectuer des transferts d'un stock à l'autre. (Il faut pour cela prendre en considération les transporteurs : qui servent à transporter les pièces du fournisseur ou stock jusqu'au parc, ou vice versa en cas de réparation de pièces). Il est en effet, possible d'entreposer dans le stock différentes pièces pour les faire ensuite réparer.

Les capteurs :

Il existe près de 300 capteurs dans une éolienne. Elles ne sont pas directement affiliées à une pièce. Il faut davantage les voir comme des observateurs de symptômes. En général, leur anormalité est une conséquence directe ou non du comportement d'une pièce. Cela nécessite soit l'automatisme de l'éolienne, soit la présence sur place des techniciens pour effectuer un diagnostic.

Précision sur le poste de télégestion :

Il sert surtout à communiquer entre les agents humains et le parc à distance. Les informations sont récupérées 4 fois par jours en jour ouvrés, il y a un envoi automatique en cas d'alarme et un bouton de connexion pour établir la communication en cas de besoin.