

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en : Electromécanique

Filière : Mécanique
Spécialité : Electromécanique

THEME

**Contribution au diagnostic des déséquilibres au niveau des éoliennes
par l'utilisation des techniques d'apprentissage automatique**

Présenté par : Touzout Mohamed

Promoteur : Mr. Chamseddine Rahmoune

Soutenue publiquement le 13/07/2021, Devant le jury composé de :

- | | | |
|-------------------------|-----|-----------|
| 1. IKHLEF BOUALEM | MAA | président |
| 2. GOUGAM FAWZI | MAB | examineur |
| 3. RAHMOUNE CHAMSEDDINE | MCA | promoteur |

Promotion 2020- 2021

Dédicace

A ma famille

A Mes Amis

Remercîment

Je tiens tout d'abord à remercier notre dieu qui me permettait à accomplir ce travail.

Puis ont remercié mon encadreur Dr Chamseddine Rahmoune qui m'a honoré de son encadrement.

Je remercié toutes les personnes qui m'a conseillé, guidé, encouragé.

Résumé

L'énergie éolienne participe fortement à la production d'énergie électrique dans le monde industriel. Comme tous les systèmes industriels, l'éolienne peut être menacée par des anomalies qui sont susceptibles de causer des dommages de ses performances ou même de provoquer un arrêt total de l'installation.

L'objectif principal de ce mémoire est de développer des méthodes pour la surveillance des centrales éoliennes, Les méthodes développées se veulent donc des solutions applicables dans un contexte industriel. Leur but est de détecter des sous performances des éoliennes, pour ce faire l'historique des données de la turbine sont utilisé. Soit pour limiter les conséquences, nous avons utilisé des techniques de diagnostic des défauts basée sur l'intelligence artificielle, les modèles utilisés sont : LSSVM, SVM, Decision Tree, Random Forest, KNN, et Extreme Machine Learning.

ملخص

تساهم طاقة الرياح بشكل كبير في مجال انتاج الطاقة الكهربائية. لكن ككل نظام صناعي تواجه توربينات الرياح اعطاب ومشاكل تؤثر على وظيفتها الاساسية وقد يؤول الامر الى توقف الانتاج. الهدف من هذا العمل هو ايجاد طريقة فعالة لتجنب الاعطاب المفاجئة والتنبؤ بها قبل حدوثها. والحفاظ على الوظيفة الاساسية للمولدات الا وهي انتاج الطاقة الكهربائية. وللقيام بهذا قمنا بتجربة طريقة تعتمد على الذكاء الاصطناعي. وذلك باستعمال خوارزميات التعلم التلقائي للتنبؤ بالأعطاب التي تحدث على مستوى المولد.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Energie renouvelable.....	3
Introduction.....	3
1 Généralité sur Les Energies Renouvelable	3
1.1 L’Energie Solaire	3
1.2 L’Energie hydraulique.....	4
1.3 L’Energie géothermique	4
1.4 L’Energie éolienne	4
2 La Turbine éolienne	5
Principe de base	5
2.1 Types des éoliennes	5
2.1.1 Eoliennes à axe vertical	5
2.1.2 Eoliennes à axe horizontale.....	6
2.2 Description structurelle d’une turbine éolienne.....	7
3 Diagnostic et surveillance	9
3.1 Concepts et Terminologie de Diagnostic.....	9
3.2 La maintenance industrielle	11
3.2.1 Les types de maintenances	11
Conclusion	13
Chapitre 2 : intelligence artificielle	14
Introduction.....	14
1 L’intelligence artificielle :.....	14
Définition :.....	14
2 Composition d’intelligence artificielle :	15
2.1 Machine Learning (apprentissage machine)	15
2.1.1 Apprentissage supervisé.....	16
2.1.2 Apprentissage non supervisé	16
2.1.3 Apprentissage par renforcement	16
2.2 Deep Learning (apprentissage profond).....	16
3 Les modèles d’apprentissage supervisé	17
3.1 K-plus proche voisins (KNN)	17

3.2	Decision tree (l'arbre de decision)	18
3.3	Random Forest (la Foret Aléatoire).....	20
3.4	Extrême machine Learning (ELM)	21
3.5	Support vecteur machine (svm)	21
3.6	Least Square Support Vecteur Machine (LSSVM)	23
	Conclusion	24
	Chapitre 3 : Application de l'intelligence artificielle pour la surveillance des éoliennes....	25
	Introduction	25
1	etude des signaux experiment de la turbine éolienne.....	26
2	Méthodologie de travail	27
2.1	Traitement de signal et extraction des indicateurs.....	27
2.2	Apprentissage supervisé.....	27
	Conclusion	32
	Conclusion Générale	33

Liste des figures

Figure I	: éolienne a axe verticale.....	6
Figure II	: éolienne a axe horizontale	6
Figure III	: composition d'une éolienne.....	8
Figure IV	: les types de maintenance.....	11
Figure V	: les types d'IA	15
Figure VI	: exemple de classification KNN	18
Figure VII	: structure d'un arbre de décision.....	19
Figure VIII	: principe de foret aléatoire	20
Figure IX	: extreme machine learning neuron.....	21
Figure X	: principe de svm	22
Figure XI	: exemple de fonction noyau	22
Figure XII	: Least Square méthode.....	23
Figure XIII	: les signaux de courant.....	26
Figure XIV	: les matrice de confusions	29
Figure XV	: les performances des modèles	31

Liste des Tableaux

Tableau I	: Resultats des Tests	28
-----------	-----------------------------	----

Introduction Générale

Introduction générale

La production d'énergie électrique est un défi important pour les années à venir, avec l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques. Cette évolution, laisse présager une augmentation considérable de la consommation en énergie.

La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, car une consommation excessive des ressources naturelles réduit les réserves de façon dangereuse pour les générations futures.

Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) qui sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement.

Au cours de la dernière décennie, la capacité de production mondiale d'énergie éolienne a connu une croissance fulgurante estimée à 28 % annuellement. Plusieurs facteurs expliquent cette expansion spectaculaire. D'une part, cette source d'énergie renouvelable aide les États à augmenter leur production d'électricité sans augmenter leur production de gaz à effet de serre. D'autre part, plusieurs de ces pays voient dans le développement de la filière éolienne une étape importante vers une diminution de leur dépendance aux combustibles fossiles, dont les prix ne cessent d'augmenter. Cette croissance a aussi été stimulée par des avancées technologiques qui permettent de construire des éoliennes plus puissantes permettant d'occuper moins de territoire, tout en produisant la même quantité d'électricité.

L'augmentation du nombre de centrales éoliennes a fait émerger un nouveau secteur d'activité dans l'industrie éolienne, soit l'opération et l'entretien (Operation and Maintenance) (O&M). Auparavant, les problématiques de l'industrie se situaient principalement au niveau de l'évaluation de la ressource, de la conception des éoliennes et la construction des centrales éoliennes. Comme les principaux coûts associés à l'opérations des centrales (parcs) éoliennes se situent au niveau de l'entretien, l'optimisation des activités d'O&M est devenue par conséquence importante et même essentielle à la continuité de cette industrie.

En effet, cette optimisation poursuit deux objectifs. Le premier vise à maximiser la disponibilité des éoliennes. Le deuxième est de pouvoir prévoir plus efficacement l'entretien à effectuer. En d'autres mots, il s'agit de pouvoir détecter d'une manière avancée les dégradations sur l'ensemble des éléments constituant une éolienne et de réaliser un diagnostic et un pronostic précis. En effet, au cours de la durée de vie d'une éolienne, en plus de l'entretien routinier (préventif et systématique), des réparations majeures risquent d'être nécessaires telles que le remplacement du multiplicateur ou la génératrice. Plusieurs méthodes pour la surveillance (monitoring) d'éoliennes et de leurs composants ont donc été proposées dans les dernières années.

Le but de cette thèse est de développer une méthode pour la surveillance des centrales éoliennes qui permettent de détecter d'une manière précise les sous-performances de la turbine de vent. C'est pour ça on a proposé une méthode qui utilise les modèles de machine learning pour détecter les défauts de courant de la turbine au niveau de rotor.

Dans le premier chapitre on va rappeler les différents types des énergies renouvelable, la description de la turbine de vent, et le domaine de la maintenance industrielle et les définitions qui simplifie la compréhension de diagnostic et la maintenance.

Après, dans le deuxième chapitre on va citer et expliquer les différents modèles de classification qu'on a utilisé pour atteindre notre objectif.

Finalement, dans le dernier chapitre on va appliquer les l'algorithmes proposé sur une base de données expérimentale d'une éolienne en présentant les méthodologies de l'approche et les résultats obtenus par les méthodes d'apprentissage automatique

Chapitre 1

Energie renouvelable

Introduction

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'énergie électrique à partir des énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

Si un intérêt s'est manifesté pour les énergies renouvelables après le premier choc pétrolier de 1973, le recours à celles-ci constitue, depuis les années 1990, une alternative aux combustibles fossiles afin de préserver l'environnement et de lutter contre le réchauffement climatique, lié en grande partie à l'émission de gaz à effet de serre provenant des diverses utilisations des énergies fossiles. C'est aussi un type de politique énergétique qui repose sur l'indépendance et la sécurité de l'approvisionnement. Le développement des énergies renouvelables dans un tel contexte de transition inévitable nécessite l'émergence de technologies radicalement différentes de celles utilisées pour exploiter les énergies fossiles, d'où un coût initialement important qui a longtemps freiné leur essor.

1 Généralité sur Les Energies Renouvelable

1.1 L'Energie Solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau.

1.2 L'Energie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près de 15 % de toute l'électricité installée en Europe est d'origine hydraulique. La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité

1.3 L'Energie géothermique

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie.
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...).

1.4 L'Energie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû

aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

2 La Turbine éolienne

Principe de base

Une éolienne est un générateur d'électricité fonctionnant grâce à la vitesse du vent. Elle se compose d'un rotor (hélice) qui se met en mouvement grâce à la force du vent ; c'est la première conversion qu'effectue l'éolienne : transformer l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation. Cette rotation est ensuite convertie en électricité par une génératrice. L'efficacité maximum de l'éolienne est obtenue lorsque l'hélice est face au vent, donc perpendiculaire.

2.1 Types des éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

2.1.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus possèdent généralement un rendement plus faible que les éoliennes classiques à axe horizontal (voir figure 1). Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220km/h et quel que soit leur direction.



Figure I : éolienne a axe verticale

2.1.2 Eoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.



Figure II : éolienne a axe horizontale

2.2 Description structurelle d'une turbine éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois parties : les pales, la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

- **La tour** : est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
- **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque (différent du frein aérodynamique) qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur (généralement une machine asynchrone) et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales. A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.
 - **Le multiplicateur (boîte de vitesse)** : les pales des éoliennes tournent généralement à un très faible régime à cause de la résistance mécanique, compte tenu de cette faible vitesse de rotation, il est impossible de produire une fréquence suffisante pour le générateur, ainsi avant leur raccordement au générateur la vitesse est accélérée dans une boîte de vitesse, elle utilise un démultiplicateur de force pour obtenir un grand rapport de vitesse.
 - **Le frein** : la fonction du frein est d'arrêter la rotation des pales en cas de vent excessif.
 - **Le générateur** : le générateur transforme l'énergie mécanique transmise par le rotor à partir de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique

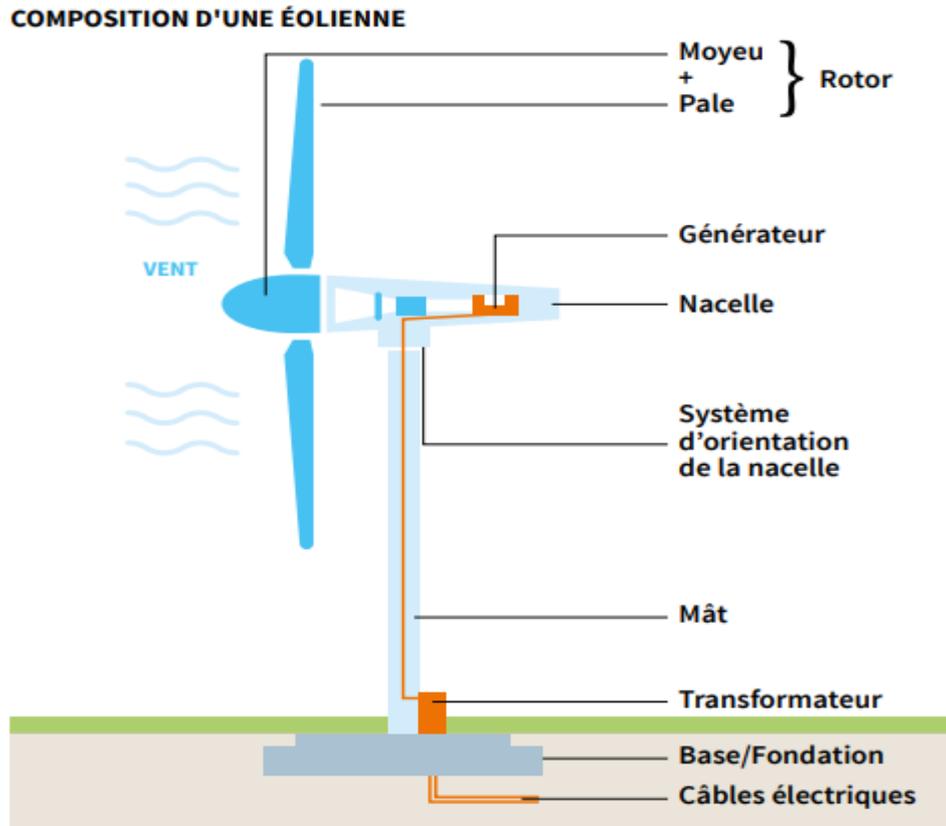


Figure III : composition d'une éolienne

Les pales doivent normalement faire face au vent pour une extraction d'énergie maximale mais la direction du vent peut changer à tout moment, un capteur de vitesse installé sur le dessus de la nacelle mesure la vitesse et la direction du vent, l'écart dans la direction de vent est envoyé à un contrôleur électronique qui à son tour envoie un signal approprié aux mécanisme embarqué pour corriger cette erreur, ainsi l'éolienne sera toujours alignée avec la direction du vent.

La constitution compliquée et bien équilibrer des aérogénérateurs garde leurs bonnes démarches. Ce sont des sources de production de l'énergie électrique, l'implémentation de ces derniers augmente jours après jours sous la forme de deux grandes catégories On shore (placées sur les champs terrestres) et Offshore (placées sur des plateformes) ; les offshores sont plus coûteuses est plus difficile pour les installées, si pour ça le système besoin d'un ensemble des méthodes et interventions qui assurent le bon fonctionnement des éoliennes.

3 Diagnostic et surveillance

Généralité :

Dans le monde industriel les gains de productivité représentent un souci quotidien pour les dirigeants des entreprises. La compétitivité passe par la maîtrise indispensable de la disponibilité de l'outil de production et par la qualité des biens produits ou des services rendus. Il existe plusieurs moyens permettant une sûreté des systèmes industriels. Le diagnostic des défaillances, s'il est réalisé avec efficacité et s'il permet de détecter de façon précoce une dégradation, représente un des moyens pour contribuer à l'amélioration de productivité. Les étapes du processus de diagnostic sont définies à partir de la notion du mode de fonctionnement. Le mode de fonctionnement peut être défini comme l'ensemble des états du système qui le placent dans une situation de production et de sécurité donnée. Le suivi du mode de fonctionnement d'un système est généralement décrit comme un processus en trois étapes, chacune méritant une attention particulière :

- La détection du mode sous lequel le système fonctionne.
- L'identification et la localisation de la cause d'un mauvais fonctionnement éventuel.
- L'action sur le système qui résulte des deux étapes précédentes. Il peut s'agir du maintien dans le même mode de fonctionnement, de la correction du fonctionnement, ou même de son arrêt si nécessaire.

3.1 Concepts et Terminologie de Diagnostic

Le diagnostic est l'un des dynamismes qui construisent une maintenance correcte et fiable. Voici ci-dessous quelques définitions des termes utilisées prise d'un ensemble de références pour clarifier le travail.

- **Défaillance** : Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Après défaillance d'une entité, celle-ci est en état de panne.

La défaillance est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.

- **Supervision** : La surveillance d'un système physique tout en prenant des actions appropriées pour maintenir le fonctionnement dans le cas de défauts. C'est le plus haut niveau dans la structure industrielle, elle sert au pilotage et au suivi informatique des processus

- **Surveillance** : La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières. Donc la surveillance regroupe les deux étapes de déclaration (détection) de présence des anomalies et le diagnostic pour identifier la nature des défauts et les localisés.
- **Conduite** : Une des principales raisons qui conduisent à surveiller un système. Qu'il s'agit d'optimiser et qui est une tâche en ligne (production maximale, sécurité, non dégradation des équipements). Ceci passe par la surveillance du procédé afin de détecter toute anomalie de fonctionnement et de l'identifier aussi bien que possible. Ce type d'action est aussi appelé supervision : surveillance + conduite.
- **Détection** : Détermination de défauts présents dans un système et l'instant de détection.
- **Isolation** : Détermination du type, de l'emplacement et du temps de détection d'un défaut. Cette étape suit l'étape de détection de défauts. Donc elle détermine les composants ou bien les organes d'effectués d'une manière plus approfondie.
- **Identification** : Détermination de la taille et variation dans le temps du comportement d'un défaut. Cette étape suit l'étape de l'isolation de défaut. Donc c'est la dernière étape du diagnostic qui consiste à trouver les éléments responsables du dysfonctionnement (panne ou dégradation).
- **Dégradation** : Tout état qui se caractérise par une évolution irréversible des caractéristiques d'un système est une dégradation. La dégradation peut être liée à des facteurs directs, tels que l'usage, le temps..., ou à des facteurs indirects, tels que l'humidité, la température. La dégradation peut aboutir à une défaillance, quand les performances du système sont en dessous d'un seuil d'arrêt défini par les spécifications fonctionnelles.
- **Dysfonctionnement** : Est un changement dans le fonctionnement nominal (normal) d'un système vers un fonctionnement anormal. Donc elle a comme but de définir la présence des défaillances.

3.2 La maintenance industrielle

Définition

La maintenance est une étape nécessaire faite dans le but d'entretenir un système défaillant. Selon la norme AFNOR NFX 13-306 ([AFN01]), la maintenance est définie comme « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un composant, destiné à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

3.2.1 Les types de maintenance

La figure 4 décrit les différents types de maintenance

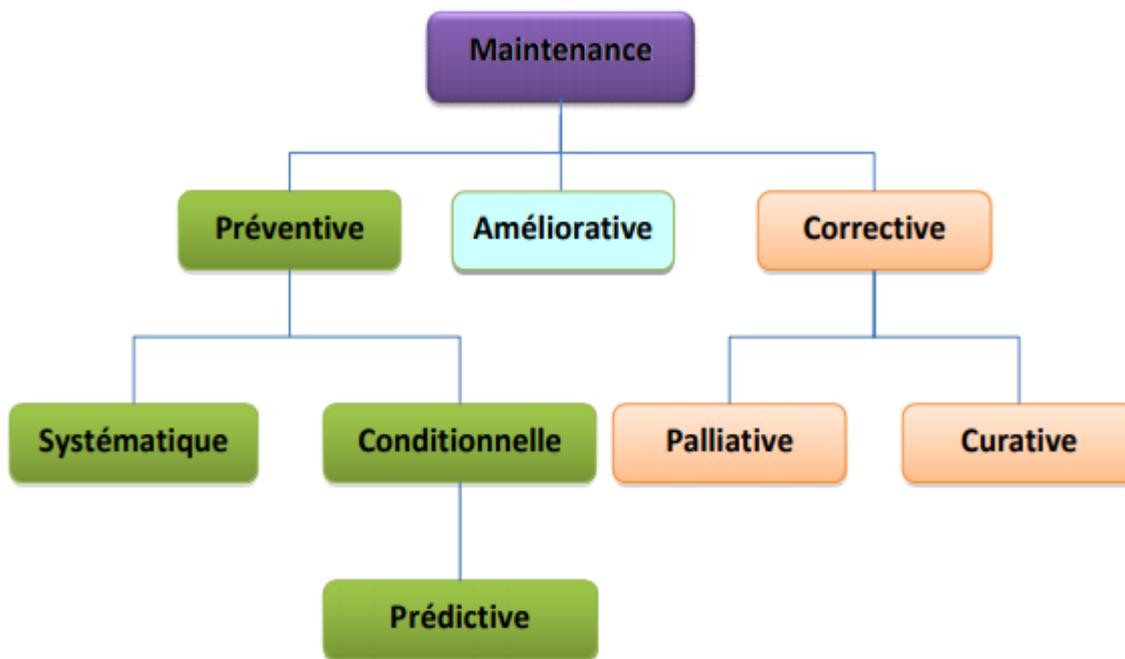


Figure IV : les types de maintenance

Maintenance corrective :

Au gré de la définition du AFNOR (norme X 60-010) : « Opération de maintenance effectuée après défaillance », donc c'est une stratégie qui est choisie après l'apparence d'une défaillance ou une dégradation du fonctionnement.

Elle peut être divisée en deux groupes :

- **Palliative** : elle consiste à trouver des solutions provisoires pour dépanner le système. Elle est enchaînée obligatoirement par une maintenance curative.

- **Curative** : elle a pour but de régler le problème de dysfonctionnement dans un système, donc elle ramène le process à son fonctionnement nominal (fonctionnement normal sans défaillance), les réparations appliquées dans cette maintenance sont permanentes.

Maintenance préventive

C'est une méthode qui s'applique avant l'apparence d'une défaillance pour minimiser les couts de la maintenance corrective en résultat.

Selon la définition de AFNOR (norme FDX60000) « Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu ». Donc La maintenance préventive est utilisée parce que les conséquences d'une défaillance sont inacceptables et que la sécurité doit être toujours élevée.

La maintenance préventive se devise en trois catégories :

- **Maintenance systématique** : conformément à AFNOR (norme FDX60-000) elle est définie comme une « maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi, suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage ». Donc c'est une maintenance programmée selon des dates prédéfinies.
- **Maintenance conditionnelle** : AFNOR (norme FDX60-000) la Définit comme la « maintenance préventive subordonnée à un type d'événement révélateur de l'état du bien ». Donc c'est la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.
- **Maintenance prévisionnelle (prédictive)** : C'est la maintenance préventive conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

Maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipement est un « ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise » (norme NF EN 13306).

Conclusion

Ce chapitre contient trois parties, dans la première partie on a présenté les différents types d'Energie renouvelable, dans la deuxième partie on a présenté la description structurelle et les types de la turbine éolienne, finalement on a présenté les bases indispensables à la compréhension de diagnostic et détection de défaut des systèmes. Dans le chapitre suivant on va tester le domaine de l'intelligence artificielle et ses outils.

Chapitre 2

Intelligence Artificielle

Introduction :

L'intelligence artificielle (IA) est une discipline en évolution rapide qui se base sur des concepts relatifs à l'être humain, des techniques scientifiques déjà établies et des technologies de l'informatique, de l'électronique, de l'automatique, ... etc., pour concevoir des systèmes dits intelligents, capables de traiter des problèmes difficilement résolubles d'une manière similaire à celle qu'adopterait l'être humain. La mise en application de l'intelligence artificielle exige des connaissances de la perception, du raisonnement, du traitement des informations et de l'apprentissage. Elle offre son lot de découvertes chaque jour dans différents domaines techniques et non techniques qu'ils soient civils ou militaires, tels que l'économie, la sociologie, la médecine, l'agriculture, l'industrie en général et toutes les infrastructures militaires.

Le diagnostic est un problème important sur lequel se sont penchés depuis longtemps de nombreux chercheurs se réclamant de l'intelligence artificielle. Diverses approches ont été imaginées : les unes se basent sur une formalisation logique du raisonnement. Les autres privilégient l'exploitation de l'expérience de terrain des ingénieurs en maintenance. Avec l'apparition d'une puissance de calcul et de stockage des nouveaux ordinateurs, l'intelligence artificielle connaît actuellement un regain d'intérêt, notamment dans le domaine des techniques d'apprentissage automatique. Ces techniques peuvent également être exploitées pour réaliser des outils performants de diagnostic.

1 L'intelligence artificielle :

Définition :

Marvin Lee Minsky, l'un des précurseurs de la discipline définit l'intelligence artificielle comme « la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique ». En d'autres termes, une intelligence artificielle est avant tout un programme informatique visant à effectuer, au moins aussi bien que des humains, des tâches nécessitant un certain niveau d'intelligence. L'horizon à atteindre concerne donc potentiellement l'ensemble des champs de l'activité humaine : déplacement, apprentissage, raisonnement, socialisation, créativité, etc.

2 Composition d'intelligence artificielle :

La figure 5 décrit les types d'intelligence artificielle :

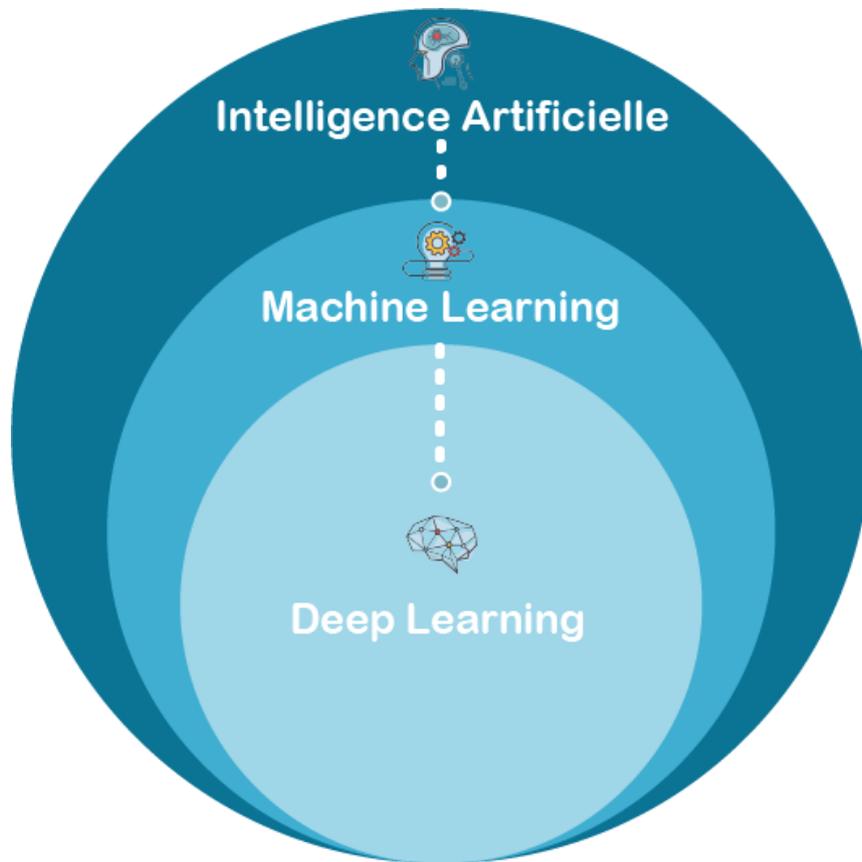


Figure V : les types d'IA

2.1 Machine Learning (apprentissage machine)

Les techniques d'apprentissage se sont développées en tentant de modéliser les processus cognitifs non à partir d'un ensemble de règles formelles logiques, mais à partir de l'analyse d'expériences passées. Toutes les approches d'apprentissage automatique comportent deux phases : la première est celle de l'apprentissage à proprement parler et consiste à choisir un modèle, puis ajuster ses paramètres à partir de données en entrée par exemple des photos de chat et de chien, pour un modèle de reconnaissance visuelle. La deuxième phase est celle de l'inférence. À partir des paramètres qui ont été appris, l'algorithme effectue la tâche qui lui a été fixée par exemple distinguer les photos de chat et des photos de chien. Parmi les approches de l'apprentissage automatique, on peut distinguer différentes techniques qui peuvent correspondre à différents problèmes.

2.1.1 Apprentissage supervisé

Dans l'apprentissage supervisé, le problème est de distinguer des catégories d'objets dont on dispose des données étiquetées suivant ces catégories. Par exemple des millions de photos où les chats et les chiens sont identifiés comme tels. La phase d'apprentissage ajuste progressivement les paramètres du modèle pour que l'erreur soit la plus faible possible sur les exemples connus. Dans la phase d'inférence, la machine catégorise des données inconnues elle reconnaît par exemple des chiens sur des nouvelles photos.

2.1.2 Apprentissage non supervisé

Dans l'apprentissage non supervisé, au contraire, on dispose de données non étiquetées. Lors de la phase d'apprentissage, le but est d'établir des catégories. La phase d'inférence est identique à celle de l'apprentissage supervisé. Par exemple, cette technique est particulièrement utile pour déterminer des profils de comportement sur lesquels on n'a aucun a priori sur les catégories, à partir de multiples traces qu'on laisse quotidiennement sur Internet. Ces approches sont aujourd'hui au centre des travaux de recherche puisqu'elles permettraient de limiter la nécessité de jeux de données annotées.

2.1.3 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement se distingue des autres modes d'apprentissage dans la mesure où il ne fait pas appel à une base d'exemples constituée en entrée. Son apprentissage s'effectue via des interactions avec l'environnement : la machine effectue une action, l'état de l'environnement change en fonction de celle-ci et la machine se voit attribuer une récompense en fonction du résultat obtenu. La récompense permet à la machine de découvrir progressivement les meilleures actions à effectuer vis-à-vis du résultat qu'elle cherche à obtenir. Un exemple récent de ce type d'apprentissage a été particulièrement médiatisé avec AlphaGo: l'action est un coup, l'environnement est le plateau de jeu avec les pions disposés dessus, et la récompense est le fait de gagner ou non à la fin de la partie. L'apprentissage par renforcement trouve également des applications en matière de robotique.

2.2 Deep Learning (apprentissage profond)

L'apprentissage profond (deep learning en anglais) est un sous-domaine de l'apprentissage automatique qui a connu un véritable renouveau depuis 2006. Ces modèles sont construits à partir d'éléments de calcul de base appelés neurones, disposés en général en couches successives. Ces neurones sont reliés entre eux par des connexions dont l'importance est ajustée durant la phase d'apprentissage. Chaque neurone transforme ses entrées en une sortie

en appliquant une fonction de transfert à l'ensemble des informations qui lui parviennent par ces connexions. Les réseaux de neurones sont des systèmes schématiquement inspirés du fonctionnement du cerveau. Toutefois, il ne s'agit que d'une analogie grossière. Après apprentissage, on constate que le réseau de neurones a décomposé les données d'entrée en différentes couches. Par exemple, pour identifier des visages sur une photo, la première couche identifie uniquement les formes élémentaires constituant les visages (lignes, cercles, etc.), la couche suivante les assemble en gros traits du visage (nez, lèvres, front etc..) et la description est progressivement affinée (taille du nez, largeur des narines etc..) jusqu'à recomposer complètement les visages.

3 Les modèles d'apprentissage supervisé

Pour le but d'entraîner un système à détecter le default de courant dans le rotor de la turbine éolienne on a étudié plusieurs modèles. Ces modèles sont :

3.1 K-plus proche voisins (KNN)

Principe

L'algorithme KNN est un algorithme d'apprentissage supervisée où le résultat est le classement d'une nouvelle instance selon les k instances voisines les plus proche. Le principe de base de l'algorithme KNN : trouver les K instances les plus proche : en calculant la similarité entre l'instance à classer et les instance déjà classée (les instances de la base d'apprentissage) et on tri les instances par leurs distances et on prend les k premiers. Ensuite on cherche la classe majoritaire parmi les k instances les plus proches et affecter à instance non classée.

Cette méthode dépend donc des deux éléments suivants :

1. Le nombre de voisins retenus.
2. La mesure de similarité (la distance) entre deux instances. Le résultat dépend du réglage de ces paramètres.

Pour le premier paramètre, on prend k comme un nombre de voisins tel que la valeur k est généralement impair. Pour le deuxième paramètre, la méthode nécessite distance pour mesurer la proximité entre l'instance à classer x et chacune des instances de l'ensemble d'apprentissage. Lorsque les attributs sont numériques, la distance euclidienne est généralement utilisée.

Exemple

Un exemple de classification KNN est illustré par la figure (6) tel que : Le point inconnu (étoile) appartient soit à la première classe (A) ou à la deuxième classe (B).

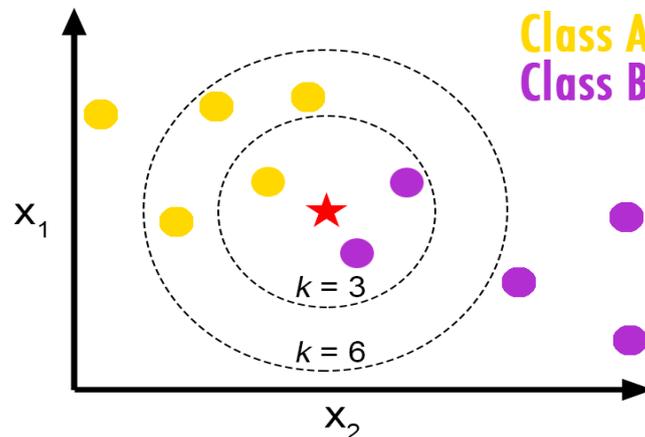


Figure VI : exemple de classification KNN

Si $K = 3$, le point inconnu est classé en deuxième classe (B) parce qu'il y a deux points violets et un seul point jaune parmi les trois plus proches exemples à l'intérieur du cercle. Si $K = 6$, il est classé dans la première classe (A).

3.2 Decision tree (l'arbre de décision)

Principe

Un arbre de décision (decision tree) est une structure très utilisée en apprentissage machine. Son fonctionnement repose sur des heuristiques construites selon des techniques d'apprentissage supervisées. Les arbres de décision ont une structure hiérarchique et sont composés de nœuds et de feuilles (aussi appelées nœuds terminaux) reliés par des branches. Dans leur représentation graphique, la racine est placée en haut et les feuilles en bas. Les nœuds internes sont appelés des nœuds de décision. Ils peuvent contenir une ou plusieurs règles (aussi appelées tests ou conditions). Les valeurs que peut prendre une variable dans un arbre de décision sont appelées instances ou attributs. Les nœuds terminaux contiennent la classe aussi appelée classe à prédire ou variable cible. Après sa construction, un arbre de décision peut être traduit sous la forme d'un ensemble de règles de décision.

Exemple

Cet exemple simple permet d'expliquer comment un arbre de décision peut être traduit sous la forme d'un ensemble de règles de décision.

Soit l'arbre de décision de la figure (7) qui permet de décider si une institution bancaire peut accorder ou non un prêt à un demandeur de prêt. La décision de la variable cible Prêt se base sur les variables moyenne du salaire (MoySal), âge (âge) et possession d'autres comptes (Autres comptes). Les attributs des feuilles de l'arbre, c'est-à-dire Prêt, sont des valeurs booléennes qui correspondent à une classification dans l'ensemble {Oui, Non}.

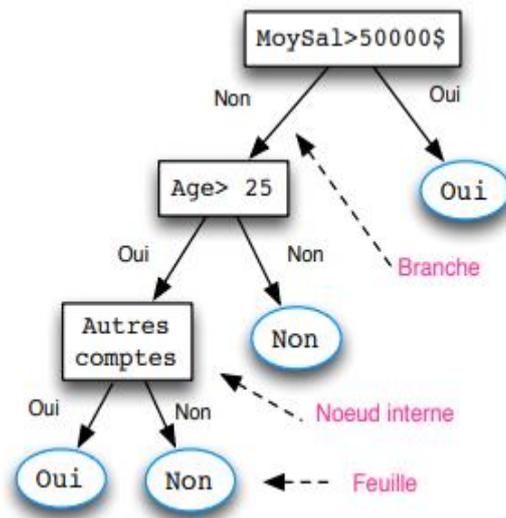


Figure VII : structure d'un arbre de décision

Cet arbre de décision engendre les règles de décisions suivantes :

1. Si $\text{MoySal} > 50000 \$$ alors Prêt = Oui.
2. Si $\text{MoySal} < 50000 \$$ et $\text{Age} < 25$ alors Prêt = Non.
3. Si $\text{MoySal} < 50000 \$$ et $\text{Age} > 25$ et $\text{Autres Comptes} = \text{Oui}$ alors Prêt = Oui.
4. Si $\text{MoySal} < 50000 \$$ et $\text{Age} > 25$ et $\text{Autres Comptes} = \text{Non}$ alors Prêt = Non.

3.3 Random Forest (la Forêt Aléatoire)

Principe

Les arbres de décision ont l'avantage d'être simples à interpréter, simples à implanter, et nécessitent (en général) peu de temps de calcul (Ziegler and König (2014)). En revanche, leur instabilité constitue un de leur défaut majeur puisqu'une petite variation au niveau des variables explicatives peut avoir un impact important sur la prédiction. Leo Breiman (2001) propose une solution à ce problème à travers l'algorithme des forêts aléatoires. Pour résumer cela de manière courte, une forêt aléatoire consiste à agréger la prédiction de plusieurs arbres. Puis sur la base de la majorité des résultats, le classificateur Random Forest prédit la décision finale.

Exemple

La figure (8) décrit le principe du vote de la forêt aléatoire basé sur plusieurs décisions des arbres.

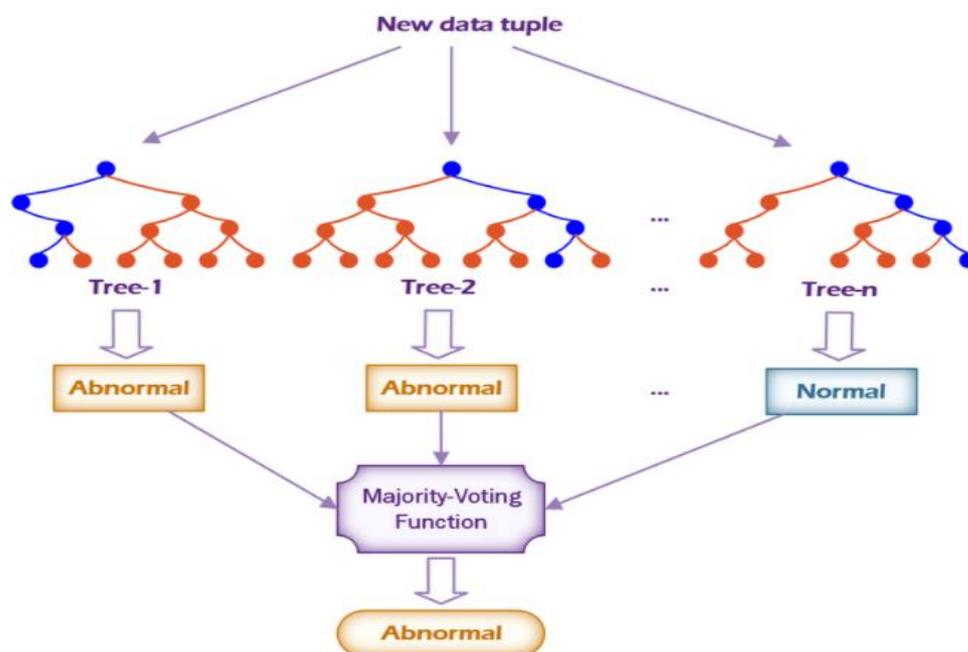


Figure VIII : principe de forêt aléatoire

3.4 Extrême machine Learning (ELM)

Principe

Le principe du réseau neuronal n'est pas modifié, mais le rôle de l'adaptation est reconsidéré, ainsi que le nombre de couches cachées qui se restreint à une seule couche. Ainsi, plutôt que d'ajuster tous les poids d'un réseau pour émuler une fonction, le réseau est constitué d'un grand nombre de neurones dans la couche interne. Les poids d'entrée sont initialisés aléatoirement une seule fois et restent avec cette valeur. L'adaptation, qui se fait en une seule fois aussi, porte donc uniquement sur les poids de la couche de sortie.

Exemple

Voire la figure (9) qui représente comment ELM peut savoir les chiffres de 0 à 9 écrits par la main.

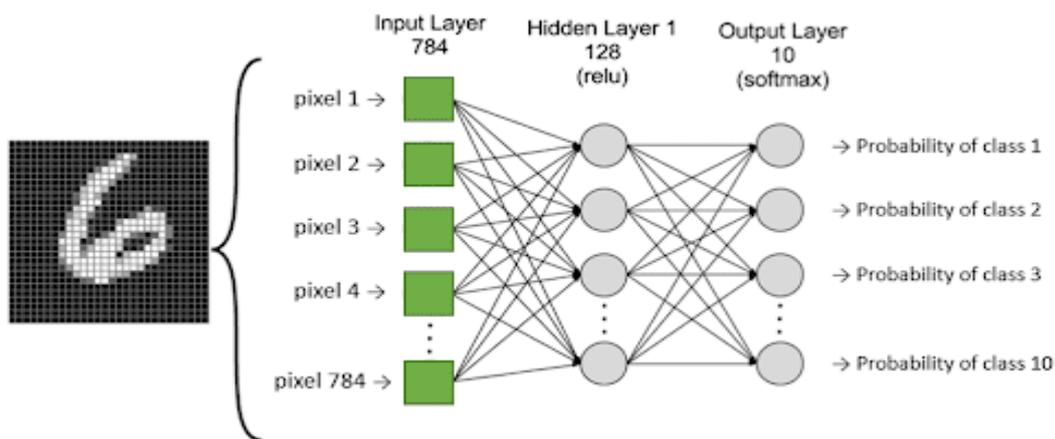


Figure IX: extreme machine learning neuron

3.5 Support vecteur machine (svm)

Principe

Les Séparateurs à Vaste Marge ou Support Vector Machines (SVMs) ont été introduits dès 1992. Les SVMs sont des classifieurs qui reposent sur deux idées clés la notion de marge maximale et la notion de fonction noyau. La première idée clé est la notion de marge maximale. On cherche l'hyperplan qui sépare les exemples positifs des exemples négatifs, en garantissant que la distance entre la frontière de séparation et les échantillons les plus proches (marge) soit maximale. Ces derniers sont appelés vecteurs supports.

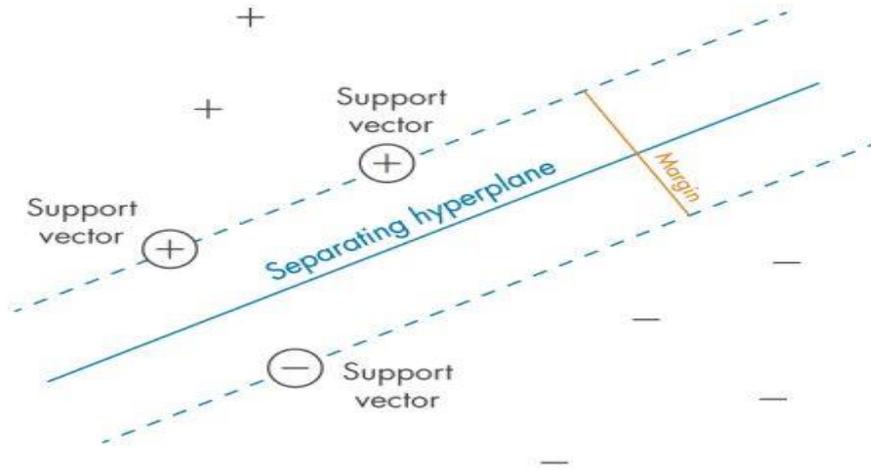


Figure X : principe de svm

Afin de pouvoir traiter des cas où les données ne sont pas linéairement séparables, la deuxième idée clé des SVM est de transformer l'espace de représentation des données d'entrées en un espace de plus grande dimension appelée espace de caractéristiques (possiblement de dimension infinie), dans lequel il est probable qu'il existe une séparatrice linéaire. Ceci est réalisé grâce à une fonction noyau, qui doit respecter certaines conditions, et qui a l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance explicite de la transformation à appliquer pour le changement d'espace. Les fonctions noyau permettent de transformer un produit scalaire dans un espace de grande dimension, ce qui est coûteux, en une simple évaluation ponctuelle d'une fonction.

Principle of Support Vector Machines (SVM)

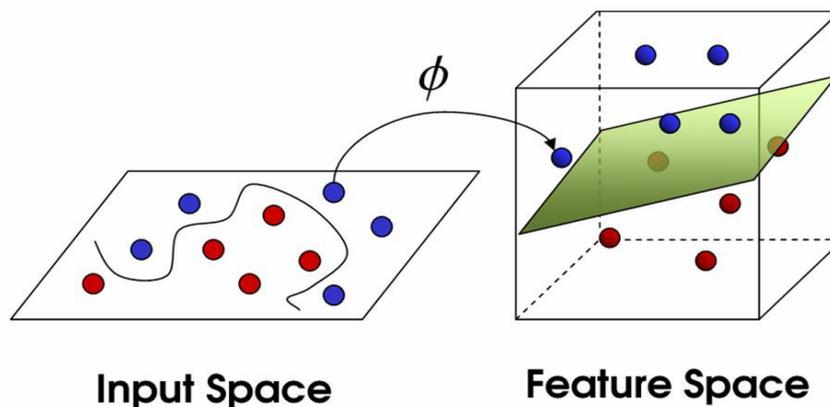


Figure XI : exemple de fonction noyau

3.6 Least Square Support Vector Machine (LSSVM)

Principe

La méthode least square support vecteur machine dérive de la méthode SVM, Comme la méthode SVM, elle se place dans un espace différent de l'espace initial afin de séparer 2 groupes de points par un hyperplan. Mais contrairement à la méthode SVM, l'hyperplan est défini, non pas à partir des points du groupe A les plus proches des points du groupe B, mais à partir du barycentre des points de chaque groupe. Voir la figure (12).

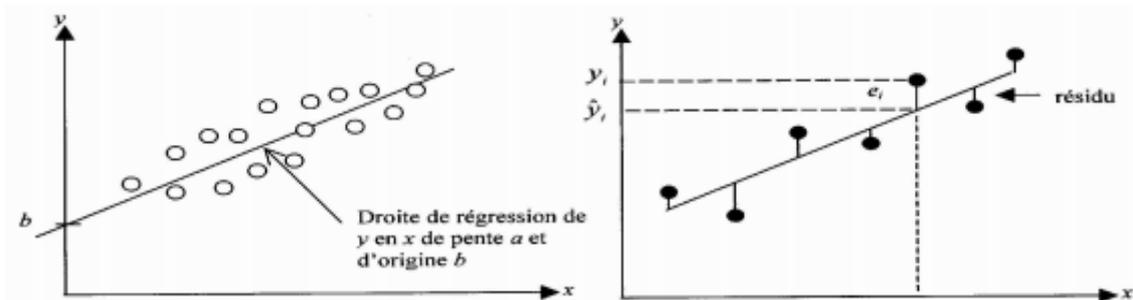


Figure XII : Least Square méthode

Les données $\{(X_i, Y_i), i = 1, \dots, n\}$ peuvent être représentées par un nuage de n points dans le plan (x, y) , le diagramme de dispersion. Le centre de gravité de ce nuage peut se calculer facilement : il s'agit du point de coordonnées $(X, Y) = [1/n \sum_{i=1}^n X_i, 1/n \sum_{i=1}^n Y_i]$. Rechercher une relation affine entre les variables X et Y revient à rechercher une droite qui s'ajuste le mieux possible à ce nuage de points. Parmi toutes les droites possibles, on retient celle qui jouit d'une propriété remarquable : c'est celle qui rend minimale la somme des carrés des écarts des valeurs observées Y_i à la droite $Y_i = aX_i + b$. Si e_i représente cet écart, appelé aussi résidu, le principe des moindres carrés ordinaire (MCO) consiste à choisir les valeurs de a et de b qui minimisent

$$E = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n (Y_i - (aX_i + b))^2$$

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les notions de base pour vous introduire au machine learning, on a défini les types d'intelligence artificielle et les méthodes d'apprentissage qu'on a utilisé pour la détection des défauts du courant dans la turbine éolienne, dans le chapitre suivant on va vous présenter notre méthodologie de travail et les tests qui sont fait pour le choix d'un modèle optimale.

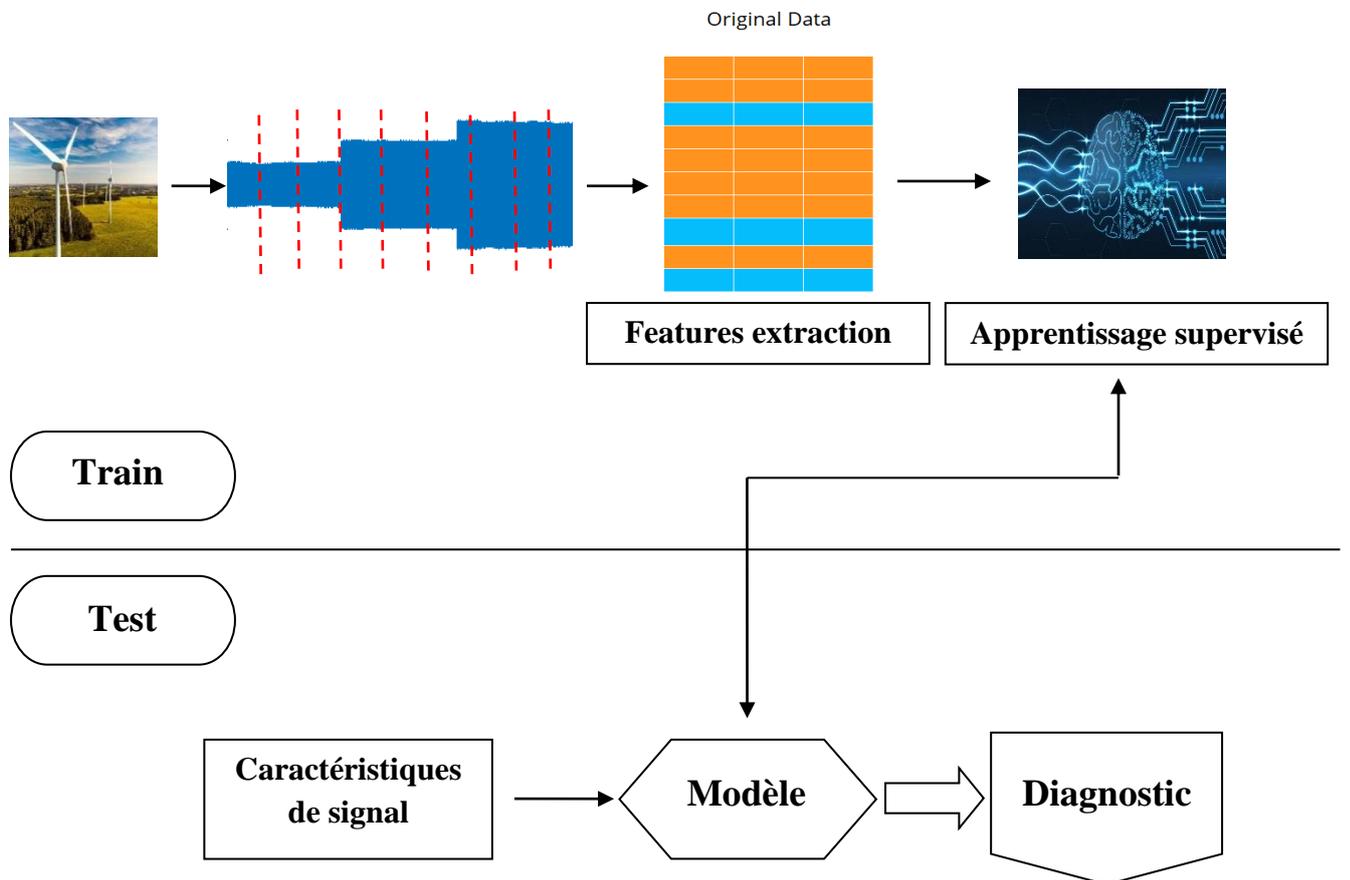
Chapitre 3

**Application de
l'intelligence artificielle
pour la surveillance des
éoliennes**

Introduction

L'apparition d'un défaut au niveau du système modifie le fonctionnement de ce dernier, ce qui affecte ses performances. Etant donné la diversité de ces défauts et la complexité des relations de cause à effet, de nombreuses méthodes permettent de réaliser un diagnostic et de prévenir au mieux la dégradation du système surveillé, ont été développées.

Dans ce chapitre on va vous présenter et expliquer notre méthode proposée pour le diagnostic et la détection des défauts du courant dans la turbine éolienne, et les étapes qu'on a suivi pour atteindre notre objectif. La méthode proposée est basée sur l'intelligence artificielle et les différents modèles de classification. L'organigramme suivant résume la méthodologie de travail dans ce chapitre.



1 Etude des signaux expriment de la turbine éolienne

Les signaux utilisés dans notre étude ont été obtenus expérimentalement et quantifiés dans une série d'expériences sur un banc d'essai en laboratoire par un groupe de chercheurs composé de : D. Zappala, N. Sarma, S. Djurovic, C.J. Crabtree, A. Mohammad, P.J. Tavner, La base de données étudié contient les signaux de courant du stator d'une génératrice asynchrone triphasé, 240v, 50HZ. Les résultats des tests sont représentés dans les figures suivantes :

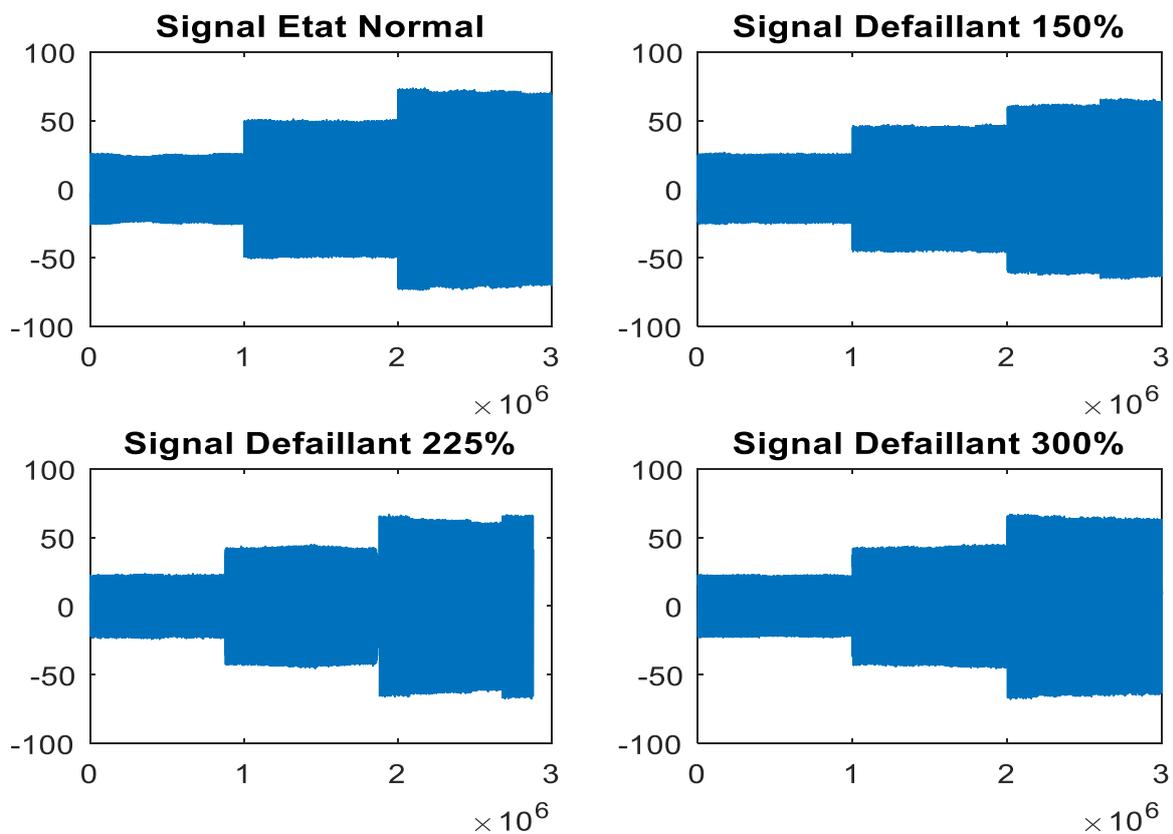


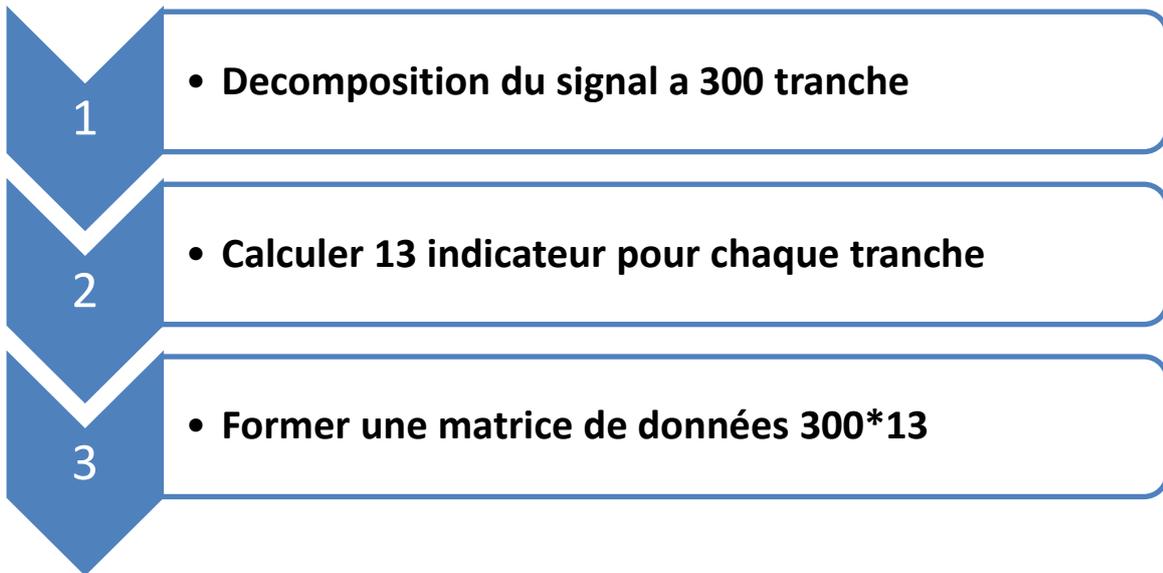
Figure XIII : les signaux de courant

On remarque dans la figure des signaux qu'il ya une petite différence entre le signal normal et défaillant 150% dans la troisième vitesse, et entre le signal normal et défaillant 225% dans la deuxième et la troisième vitesse, mais entre le signal normal et défaillant 300% il ya aucune différence remarquable, ce qui nécessite une méthode efficace pour détecter le défaut à partir du signal du courant.

2 Méthodologie de travail

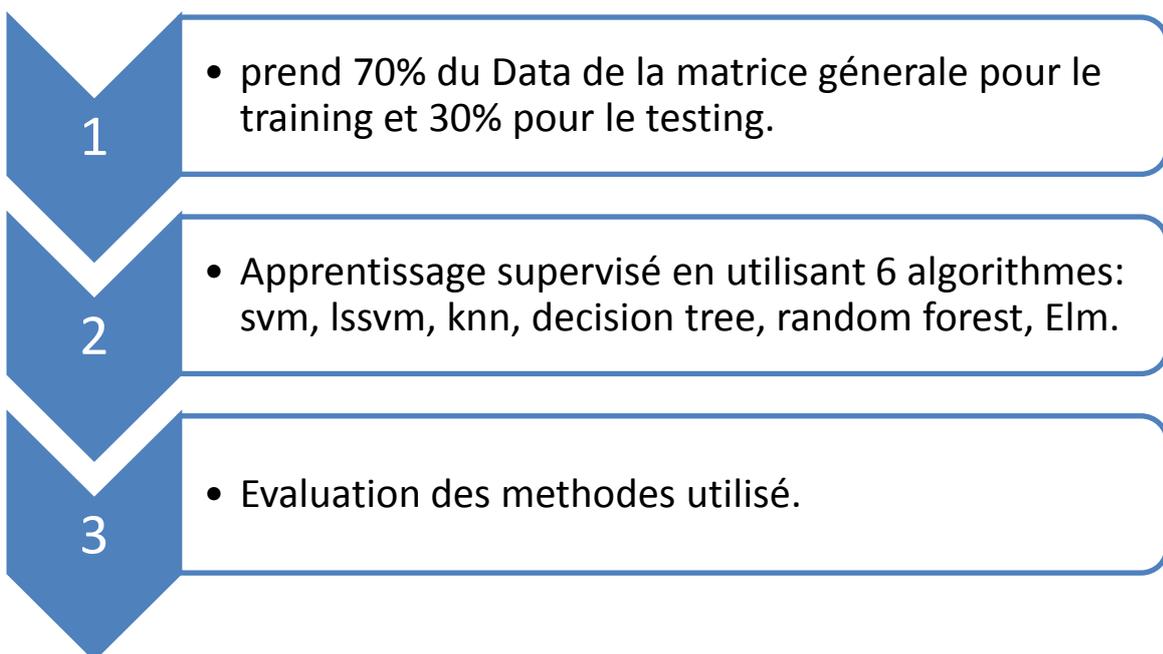
2.1 Traitement de signal et extraction des indicateurs

On a 4 états de fonctionnement du système : normal, défaillant 150%, 225%, 300% représentés dans la figure 13. Chaque signal de courant contient environ 3 millions échantillonnant pour 3 vitesses : 1530, 1560 et 1590 tr/min.



2.2 Apprentissage supervisé

Pour les 4 catégories la matrice des indicateurs sera 1200*13. Chaque catégorie correspond à une valeur de label (output). Pour le Training et Testing on a suivi les étapes suivantes :



Sur 10 tests, on a enregistré la précision de chaque modèle. On a calculé le MIN, Max, Standard Déviation, et la Moyenne, afin de déterminer le modèle le plus précis et le plus stable parmi les 6 modèle. Les Résultats Finales sont représentés dans le tableau suivant :

Test /méthode	Svm	Ls-Svm	Decision tree	Random forest	Knn	Elm
Test 1	99,4444	100	99,7222	99,4444	91,39	30
Test 2	99,7222	100	99,1667	100	89,44	18,33
Test 3	99,4444	100	99,7222	100	87,78	36,9444
Test 4	99,1667	99,7222	99,7222	99,4444	89,17	18,0556
Test 5	98,6111	100	98,8889	100	91,11	22,7778
Test 6	99,4444	100	99,1667	99,7222	89,72	32,5
Test 7	100	100	99,4444	100	88,33	26,1111
Test 8	99,4444	100	99,1667	99,7222	90,83	15,8333
Test 9	98,8889	100	99,4444	99,4444	89,72	26,6667
Test 10	99,4444	100	99,7222	100	89,44	34,1667
MIN	98,6111	99,7222	98,8889	99,4444	87,78	15,8333
MAX	100	100	99,7222	100	91,39	36,9444
STD	0,3939	0,0878	0,3056	0,2552	1,1595	7,3081
MOY	99,3610	99,9722	99,4166	99,7777	89,693	26,13856

Tableau I : Résultats des Tests

A partir de la comparaison des résultats obtenus on peut conclure que le meilleur modèle de classification dans notre cas est LSSVM, ceci est démontré par la plus faible valeur de standard déviation (0.0878) et la plus grande moyenne (99.9772 %).

Pour une meilleure représentation des performances il est préférable de représenter la matrice de confusion qui va nous donner l'accuracy de classification de chaque classe.

La matrice de confusion, dans la terminologie de l'apprentissage supervisé, est un outil servant à mesurer la qualité d'un système de classification. Chaque colonne de la matrice représente le nombre d'occurrences d'une classe estimée, tandis que chaque ligne représente le nombre d'occurrences d'une classe réelle (ou de référence).

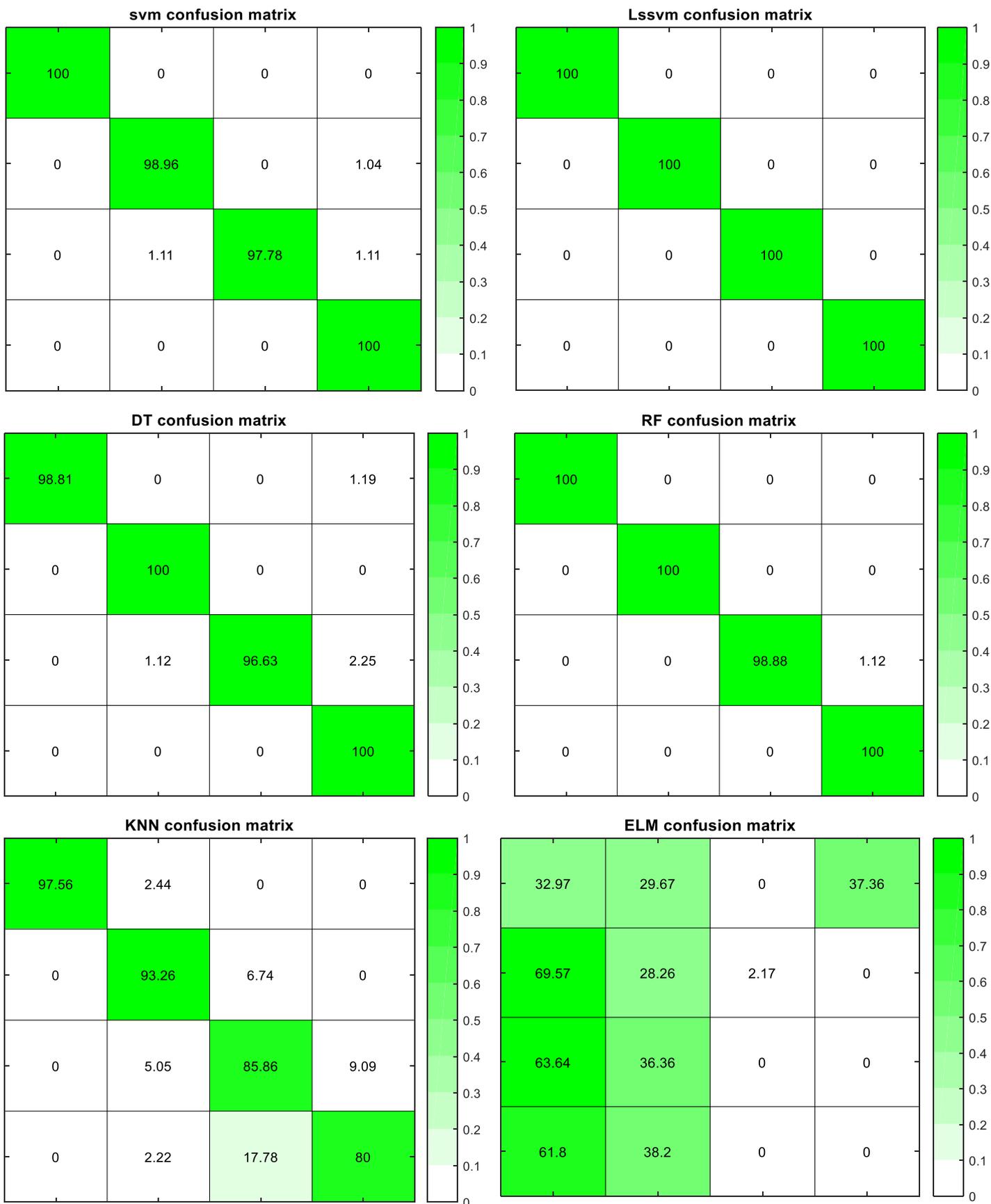


Figure 14 : les matrice de confusions

Les matrices de confusion représentées dans la figure (14) montrent la performance et (l'accuracy) de chaque classe pour tous les modèles étudiés dans ce travail. Le modèle de least square vecteur machine a réussi à classer tous les points avec une accuracy de 100% pour chaque classe.

Les chute de performance entre le modèle LSSVM et les autres modèles est illustré comme suit :

Entre le LSSVM et les modèles : support vecteur machine, decision tree, et random forest la différence était 4% ou moins pour tous les classes.

Entre le modèle KNN et LSSVM la différence était et plus de 15% pour la classe 3 et 4.

Entre le modèle ELM et LSSVM la différence était plus de 65% dans les classes 1 et 2, et 100% dans les classes 3 et 4.

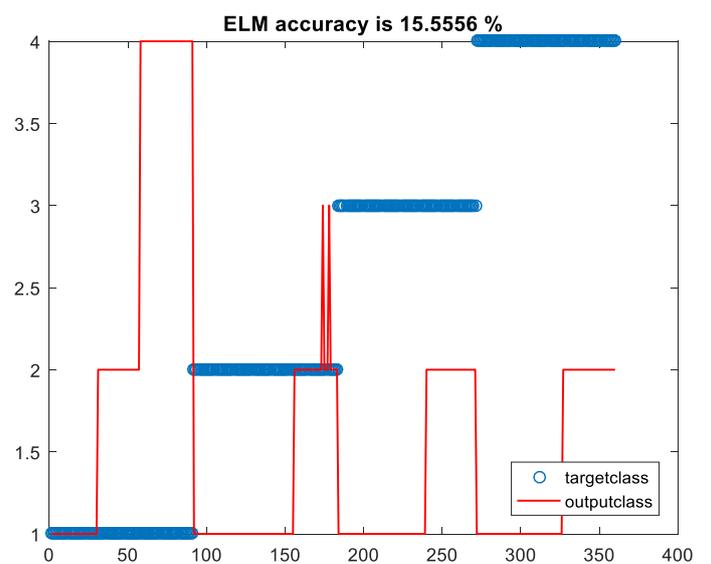
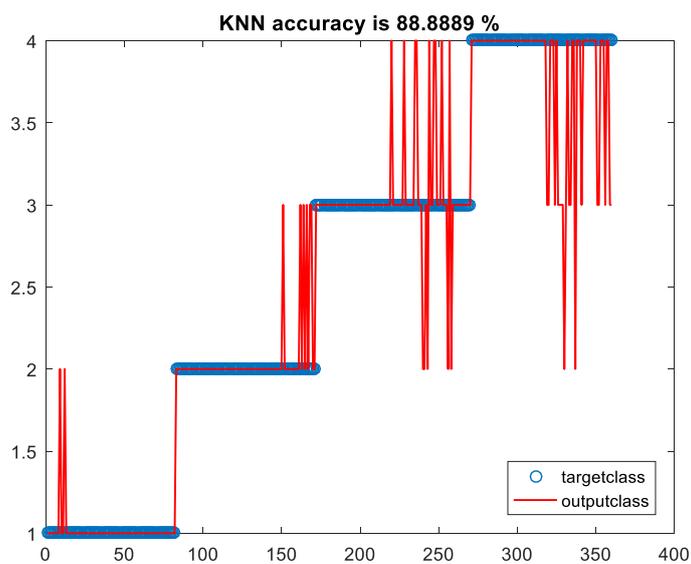
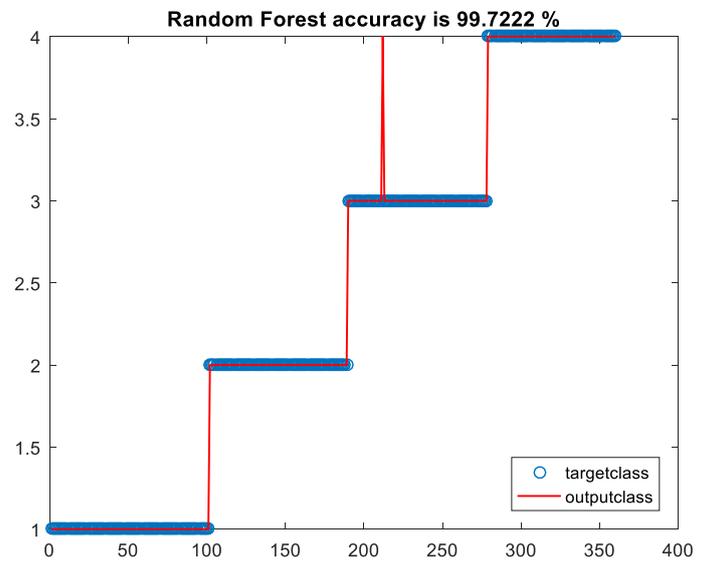
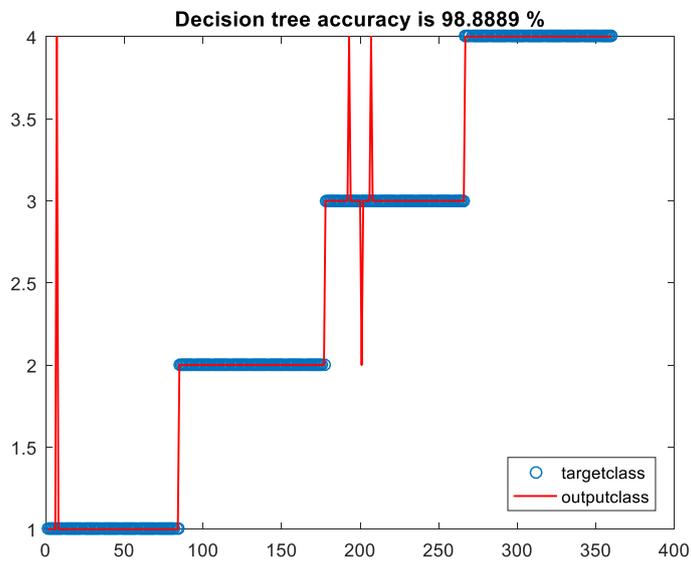
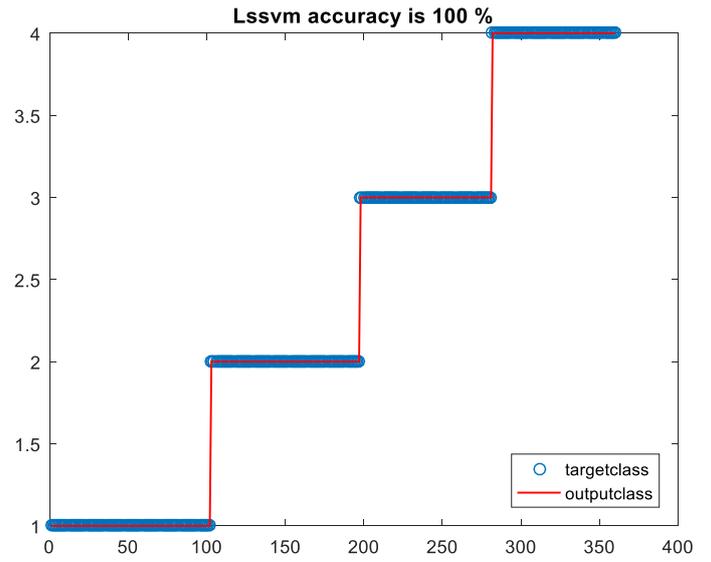
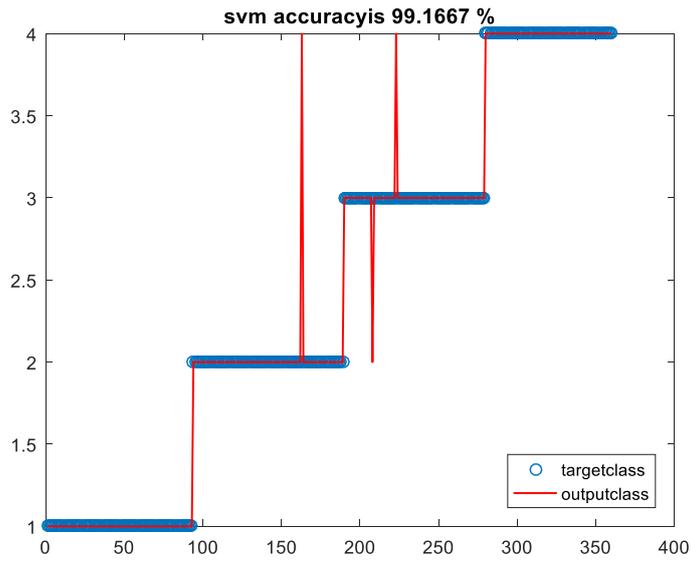


Figure 15 : les performances des modèles

Les graphes représentés dans la figure (15) montrent la performance de chaque modèle.

Le modèle LSSVM est le plus stable possible. Avec une accuracy totale de 100% et un écart type (std) de 0.08

Dans Les modèles Svm, Decision tree, Random forest, Knn et ELM on peut remarquer une différence par rapport au modèle LSSVM. Les remarquable distorsions représentent les chutes de performance du modèle dans chaque classe.

Conclusion

Dans ce chapitre on a proposé une méthode de diagnostic des turbines de vent à vitesse variable. La méthode proposée est basée sur l'extraction et la classification des features en utilisant des indicateurs statistiques et des techniques de classification avec apprentissage automatique supervisé. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode en termes de stabilité et de précision.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne, ont connu depuis le début des années 90 une croissance soutenue à travers le monde. Cette croissance a été appuyée par les contraintes environnementales et économiques grandissantes liées à l'utilisation des ressources fossiles, l'importance et la sensibilité de ce domaine nous a encouragé à développer une technique de diagnostic pour détecter les defaults de courant au niveau de rotor de la turbine éolienne.

Dans ce travail on a testé 6 modèles d'apprentissage supervisé : support vecteur machine, least square support vecteur machine, décision Tree, Radom Forest, Knn, et l'extreme machine Learning, d'après les résultats obtenus pour chaque modèle on a constaté que le meilleur modèle de classification dans notre cas est le least square support vecteur machine.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]. Azizi Amina, Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride, université bordj Badji Mokhtar annaba,2019, page 3.
- [2]. Pierre Boscq, Baptiste Dumortier, Aurore Dutin et Kevin Friry, projet de fin d'études IUT GTE 2005/2006, page 13
- [3]. Maghsel Saliha, contribution a la modelisation et la commande d'une turbine eolienne, universite du 20 août 1955 – skikda,2012, page13, page 1
- [4]. Bakkar Zakaria, Détection de défauts d'une éolienne, université bordj Badji Mokhtar annaba,2018, page 16,17
- [5]. Assia handjar, Diagnostic Prédicatif des Défauts Dans un Système Eolien en Utilisant les Techniques de l'intelligence Artificielle, Faculté des nouvelles Technologies de Information et de la Communication, Ouargla,2019, page 20,6,7,3,4
- [6]. Fatime Ly Zineb Simeu-Abazi Jean-Baptiste Leger, Groupe de Recherche S.P.S.F. : Groupe de travail Maintenance, Terminologie Maintenance : bilan.
- [7]. ISET Nabeul, stratégie de maintenance,2013-2014, page 19.
- [8]. Mission Villani, l'intelligence artificielle, Livret de vulgarisation, Mars 2018
- [9]. Haliche Amel, Classification supervisée à base de KNN avec pondération d'attributs par L'Algorithme Génétique, USTHB,2015, page 16,21
- [10]. Neila Mezghani, module 7 : arbre de décision, TELUQ, 2019, page 2, 3.
- [11]. Antoine Main, Mesure de l'importance de variables à partir de forêt aléatoire Applications à la génétique, HEC MONTRÉAL, Septembre 2018, page 10
- [12]. Hadj Kaddour Aissa Djedid Amar, Évaluation des performances des techniques RNA et ELM utilisées dans le développement des capteurs logiciels pour la surveillance de la qualité de l'eau. universite mohamed boudiaf - m'sila,2017, page 40
- [13]. Quentin Affagard, Mémoire d'Actuariat Confidentiel, Indép'AM 51, rue de Chateaudun PARIS, 22 mai 2013, page 39.

[14]. PDF Cours méthode des moindres carrés, chapitre 5, Département de Mathématiques Université Côte d'Azur. Page 33.

[15]. Benzahoul Samia, Surveillance et Diagnostic de Défauts Dans les Systèmes Electriques, université 20 aout 1955 skikda, Année 2018, page 111.