



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance et Instrumentation Industriel

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

**Intégration de l'intelligence artificielle dans la gestion
d'un système d'énergie renouvelable**

Présenté et soutenu publiquement par :

BENREDOUANE Mohamed Islam et BOUZID Nabil

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
S.MOUFFOK	MCB	IMSI Univ-Oran 2	Président
M.CHENNOUFI	MCA	IMSI Univ-Oran 2	Encadreur
M.ROUAN SERIK	MCB	IMSI Univ-Oran 2	Examineur

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu -ALLAH-, le Tout-Puissant, de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude et nos sincères remerciements à Monsieur Dr : Chennoufi Mohamed, Directeur à L'institut de maintenance et sécurité industrielle d'Oran, ainsi qu'à Monsieur Chakhrif pour avoir dirigé ce travail et pour leur disponibilité et leurs précieux conseils

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, nous remercions tout particulièrement nos parents pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

DÉDICACE

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que Je dédie ce travail d'étude à :

Mes chers parents :

A ma mère qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Je vous dédie ce travail, car c'est grâce à votre soutien durant tout mon parcours que cela a été réalisable. Je ne vous remercierai jamais assez pour vos efforts de jour comme de nuit pour mon éducation et ma formation.

J'espère qu'un jour, je pourrais vous rendre un peu de ce que vous avez fait pour moi, que dieu vous prête bonheur et longue vie.

A mes frères et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

BENREDOUANE.Mohamed

DÉDICACE

Je dédie ce travail d'étude à :

À ma chère mère Houria, mon modèle de persévérance et de détermination.

À mon cher père Noureddine, mon guide d'intégrité et de dévouement.

À mon frère Ahmed et mes sœurs Nadia et Hayet, ma famille et mes meilleurs amis.

À mes chers amis, en particulier Kheir Eddine, Yacine, Abdou, Walid et Youcef, pour votre amitié sincère et votre soutien constant.

Et enfin, à mon binôme Mohamed, mon partenaire précieux tout au long de ce projet.

BOUZID.Nabil

الملخص:

يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة إلى دراسة كيفية تحسين إدارة بطارية الخلايا الشمسية باستخدام المنطق الضبابي. تتطرق الأطروحة إلى مفهوم العملية الضبابية وكيف يتم تمثيلها في النظم الذكية. ثم يتم استعراض أهم التحديات التي تواجه إدارة بطارية الخلايا الشمسية وكيف يمكن استخدام المنطق الضبابي للتعامل مع هذه التحديات.

تشتمل الأطروحة على دراسة حالة عملية تطبيقية لتطبيق المنطق الضبابي في إدارة بطارية الخلايا الشمسية. يتم تحليل البيانات المستخدمة في إدارة البطارية باستخدام العملية الضبابية وتقييم أدائها. يتم التركيز على تحسين كفاءة استخدام البطارية وتحسين عمرها الافتراضي.

في الأخير، نتوصل إلى أن استخدام المنطق الضبابي في إدارة بطارية الخلايا الشمسية يمكن أن يحسن أداء النظام وكفاءة استخدام البطارية وتفاذي خطر الحرائق، وبالتالي يمكن أن يساهم في تعزيز استدامة الطاقة الشمسية وتحسين أداء أنظمة التخزين الطاقوي.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، الذكاء الاصطناعي، المنطق الضبابي

Résumé :

Le travail présenté dans cette mémoire vise à étudier comment améliorer la gestion de la batterie des cellules solaires en utilisant la logique floue. La mémoire aborde le concept du processus flou et comment il est représenté dans les systèmes intelligents. Ensuite, les principaux défis auxquels est confrontée la gestion de la batterie des cellules solaires sont examinés, ainsi que la manière dont la logique floue peut être utilisée pour relever ces défis.

Cette mémoire comprend une étude de cas d'application pratique de l'utilisation de la logique floue dans la gestion de la batterie des cellules solaires. Les données utilisées dans la gestion de la batterie sont analysées à l'aide du processus flou et leur performance est évaluée. L'accent est mis sur l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de la batterie et de sa durée de vie.

En conclusion, l'utilisation de la logique floue dans la gestion de la batterie des cellules solaires peut améliorer les performances du système, l'efficacité d'utilisation de la batterie et permettre d'éviter les risques d'incendie, contribuant ainsi à promouvoir la durabilité de l'énergie solaire et à améliorer les performances des systèmes de stockage d'énergie.

Mots clés : énergie renouvelable, intelligence artificielle, logique floue

Abstract :

The work presented in this thesis aims to study how to enhance the management of solar cell batteries using fuzzy logic. The thesis discusses the concept of fuzzy process and how it is represented in intelligent systems. It then reviews the key challenges faced in solar cell battery management and how fuzzy logic can be utilized to address these challenges.

The thesis includes a practical case study of applying fuzzy logic in solar cell battery management. The data used in battery management is analyzed using the fuzzy process, and its performance is evaluated. The focus is on improving battery utilization efficiency and extending its lifespan.

In conclusion, the utilization of fuzzy logic in solar cell battery management can improve system performance, battery utilization efficiency, and mitigate the risk of fires. Consequently, it can contribute to enhancing the sustainability of solar energy and improving the performance of energy storage systems.

Keywords: renewable energy, artificial intelligence, fuzzy logic

Table des matières

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	3
Liste des unités.....	4
Liste des abréviations.....	5
INTRODUCTION GENERALE.....	6
CHAPITRE 1 Généralités Sur Les Energies Renouvelables.....	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Les énergies renouvelables	7
2.2.1 Energie éoliennes.....	7
2.2.2 Energie solaire	12
2.2.3 Energie hydraulique.....	17
2.2.3.1 L'énergie Hydraulique dans le monde.....	17
2.2.4 L'énergie Biomasse	21
2.2.5 Énergie Géothermique	23
2.3 Etat de l'art.....	26
2.4 Conclusion	27
CHAPITRE 2 Généralités Et Concepts De Base De L'intelligence Artificielle.....	28
3.1 Introduction.....	28
3.2 La logique floue (Fuzzy logic) :.....	28
3.2.1 Définition.....	28
3.2.2 Notions de base de la logique floue.....	28
3.2.2.1 Sous-ensembles flous.....	28
3.2.3 Les avantages et les inconvénients de la commande par la logique floue.....	31
3.3 Le réseau de neurones	32
3.3.1 Définition.....	32
3.3.2 Structure du réseau neuronal	33
3.3.3 Modes d'apprentissage	34
3.3.4 Les fonctions d'activation	35
3.3.5 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones :	35
3.4 L'apprentissage automatique (Machine Learning)	36
3.4.1 Types d'apprentissage automatique :	36
3.5 L'apprentissage profond (Deep Learning).....	40

3.5.1	Les modèles d'apprentissage profond	41
3.6	Comparaison entre l'apprentissage machine et l'apprentissage profond.....	44
3.7	Les applications de l'intelligence artificielle :	46
3.8	Les avantages et les inconvénients	46
3.9	Etat de l'art.....	47
3.10	Conclusion.....	48
CHAPITRE 3 Architecture Proposé Et Démarche Expérimentale.....		49
4.1	Introduction.....	49
4.2	Problématique	49
4.3	Batterie lithium-ion photovoltaïque	49
4.3.1	Caractéristique des batteries au lithium-ion	49
4.4	Architecture Proposé.....	50
4.5	Implémentation du système (SIF) par l'interface graphique.....	52
4.6	Structure du système d'inférence flou (SIF)	53
4.7	Fuzzification	54
4.7.1	Fuzzification des variables d'entrée	54
4.7.2	Fuzzification des variables de sortie.....	58
4.8	Génération des règles d'inférence.....	63
4.9	Défuzzification de la variable de sortie.....	66
4.10	Conclusion.....	68
CHAPITRE 4 Discussions Expérimentales.....		69
5.1	Introduction.....	69
5.2	Discussion expérimental et interprétation.....	69
5.2.1	Méthode comparative entre les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf69	
5.2.2	Représentation graphique des résultats.....	82
5.3	Conclusion	85
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		86
BIBLIOGRAPHIE		

Liste des figures

Figure	Titre de la figure	Page
Chapitre 1		
Figure 1.1	Évolution de la capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2000 à 2015(en gigawatts)	08
Figure 1.2	première ferme éolienne de 10 mégawatts à Adrar	09
Figure 1.3	a) et b) deux éoliennes du type Darrieus, c) une éolienne type Savonius, d) une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius.	09
Figure 1.4	éolienne à axe horizontale	10
Figure 1.5	Principaux organes du système de conversion éolien	11
Figure 1.6	Centrale PV au sol (Narbonne –Aude)	12
Figure 1.7	Structure d'une cellule photovoltaïque	15
Figure 1.8	Turbine	17
Figure 1.9	le principe de fonctionnement d'un système hydraulique	18
Figure 1.10	La centrale Biomasse	21
Figure 1.11	Principe de fonctionnement d'une centrale de cogénération d'électricité et de vapeur à partir de la biomasse	22
Figure 1.12	la chaleur géothermique	23
Chapitre 2		
Figure 2.1	Classification des températures d'une pièce en deux ensembles	28
Figure 2.2.1	fonctions d'appartenance monotones croissantes	29
Figure 2.2.2	fonctions d'appartenance monotones décroissantes	29
Figure 2.2.3	fonctions d'appartenance triangulaires, trapézoïdales et de cloche	29
Figure 2.3	Structure de base d'un SIF	31
Figure 2.4	un schéma d'un neurone artificiel	33
Figure 2.5	Exemple du modèle RNA à trois couches	33
Figure 2.6	Apprentissage supervisé	34
Figure 2.7	Fonctions d'activation d'un neurone	35
Figure 2.8	Un ensemble de formation étiqueté pour l'apprentissage supervisé (La classification des spam)	37
Figure 2.9	La régression	37
Figure 2.10	Clustering K-Means	38
Figure 2.11	Schéma d'interaction entre l'agent et son environnement	40
Figure 2.12	Deep Neural Network	41
Figure 2.13	Réseau de neurones convolutifs	43
Figure 2.14	L'architecture de Réseaux de croyances profondes (DBN)	43
Figure 2.15	l'évolution des performances en fonction de la quantité de données	44
Chapitre 3		
Figure 3.1	batterie lithium-ion (marque BASEN)	49
Figure 3.2	Architecture proposé	51
Figure 3.3	Schéma bloc du (SIF)	53

Figure 3.4	Fuzzification de la variable d'entrée (Te) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	54
Figure 3.5	Fuzzification de la variable d'entrée (Te) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	54
Figure 3.6	Fuzzification de la variable d'entrée (Te) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	55
Figure 3.7	Fuzzification de la variable d'entrée (Es) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	55
Figure 3.8	Fuzzification de la variable d'entrée (Es) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	56
Figure 3.9	Fuzzification de la variable d'entrée (Es) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	56
Figure 3.10	Fuzzification de la variable d'entrée (Cb) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	57
Figure 3.11	Fuzzification de la variable d'entrée (Cb) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	57
Figure 3.12	Fuzzification de la variable d'entrée (Cb) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	58
Figure 3.13	Fuzzification de la variable de sortie (Qe) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	58
Figure 3.14	Fuzzification de la variable de sortie (Qe) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	59
Figure 3.15	Fuzzification de la variable de sortie (Qe) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	59
Figure 3.16	Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	60
Figure 3.17	Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	60
Figure 3.18	Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	61
Figure 3.19	Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)	61
Figure 3.20	Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)	62
Figure 3.21	Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)	62
Figure 3.22	Les règles d'inférence	64
Figure 3.23	Défuzzification des variables de sortie	66
Figure 3.24	Défuzzification de la variable de la sortie (Qe) (surface)	66
Chapitre 4		
Figure 4.1	Représentation graphique de la sortie Qe par apport à Es	82
Figure 4.2	Représentation graphique de la sortie Qe par apport à Te	83

Liste des tableaux

Tableau	Titre de tableau	Page
Chapitre 1		
Tableau 1.1	Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire photovoltaïque en 2018	13
Tableau 1.2	Production mondiale d'hydroélectricité (en TWh - térawattheure)	17
Tableau 1.3	les problèmes face à les énergies renouvelables qui avaient traitée dans les dernières années.	26
Chapitre 2		
Tableau 2.1	quelques exemples de réalisations grâce à l'intelligence artificielle.	47
Chapitre 3		
Tableau 3.1	Les règles d'inférence	65
Chapitre 4		
Tableau 4.1	résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf	69-70
Tableau 4.2	résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Gaussmf	71-72
Tableau 4.3	résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf	73-74
Tableau 4.4	résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf	76-77
Tableau 4.5	résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Gaussmf	77-78
Tableau 4.6	résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf	79-80

Liste des unités

Unité	Signification
MW	Mégawatt
GW	Gigawatt
KW	Kilowatt
Km	Kilomètre
KWh/m²/jour	Kilowattheure par mètre carré par jour
TWh	Térawattheure
KWh/an	Kilowattheure par ans
TWh/an	Térawattheure par ans
KWh/m²/an	Kilowattheure par mètre carré par ans
MWc	Mégawatt-Crête
MWc/an	Mégawatt-Crête par ans
eV	électron volt
m³	Mètre cube
tr/min	Tour par minute
η	Coefficient de rendement
m	Mètre
Mtep	Million de tonne équivalent pétrole
Mtep/an	Million de tonne équivalent pétrole par ans
C°	Degré Celsius
m³/s	Mètre cube par seconde
Wh	Watt heure
Ah	Ampère heure
W/m²	Watt par mètre carré

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
Chapitre 1	
GWEC	Global Wind Energy Council
MT	Moyenne tension
CO2	Dioxyde de carbone
SO2	Dioxyde de soufre
NOx	Oxyde d'azote
PV	Photovoltaïque
PN	Positive-négative
BENELUX	La Belgique, Pays-Bas, Luxembourg
GNV	Gaz Naturel véhicule
Chapitre 2	
PID	Proportionnel intégral dérivé
MIN	Minimum
MAX	Maximum
PROD	Product (produit)
PROBOR	Probabilistic (probabiliste)
SIF	Système d'inférence floue
SOM	Somme
IA	Intelligence artificielle
NLP	Naturel language processing
RNA	Réseaux de neurones artificiels
ANN	Artificial neural network
SVM	Machine à vecteurs de support
TSVM	Machine à vecteurs de support transductif
NP	Non-Deterministic polynomial time
RL	Reinforcement learning
Env	Environnement
DL	Deep learning
ML	Machine learning
DBN	Deep belief network
RBM	Machine de Boltzmann restreinte
GPU	Graphics processing unit
ResNet	Residual Network
Chapitre 3	
MATLAB	Matrix laboratory
Trimf	Triangular Membership Function
Gaussmf	Gaussian Membership function

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans la gestion des systèmes d'énergie renouvelable est aujourd'hui essentielle pour relever les défis majeurs de la transition énergétique. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, offrent des sources d'énergie propres et durables, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la préservation de l'environnement.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous concentrons sur l'intégration de l'IA dans la gestion d'un système d'énergie renouvelable, en particulier dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Ce système convertit l'énergie solaire en électricité, présentant ainsi une alternative prometteuse aux sources d'énergie traditionnelles. Cependant, une gestion efficace de ce système nécessite l'utilisation de stratégies sophistiquées visant à maximiser la production d'énergie, à minimiser les pertes et à assurer la sécurité du système.

Ce thème est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre de notre étude vise à approfondir notre compréhension des énergies renouvelables en général. Nous examinerons les principaux types d'énergies renouvelables, leurs avantages et leurs limites, ainsi que leur potentiel dans la production d'électricité. Il est crucial de bien comprendre ces concepts clés pour saisir l'importance de l'intégration de l'IA dans la gestion des systèmes d'énergie renouvelable.

Dans le deuxième chapitre, nous explorerons les différentes approches de l'intelligence artificielle, telles que la logique floue, les réseaux neuronaux, et autres. Nous expliquerons leur fonctionnement, y compris l'apprentissage et les classifications, ainsi que leurs avantages, leurs limites et leurs applications potentielles dans divers domaines, y compris celui des énergies renouvelables.

En raison des vastes superficies du désert algérien exposées à un ensoleillement intense, un potentiel d'exploitation future des énergies renouvelables est envisagé. Dans ce contexte, nous avons choisi d'intégrer la logique floue dans la gestion d'une batterie photovoltaïque au lithium-ion dans le troisième chapitre. Nous avons proposé une architecture pour le système d'étude et mené plusieurs expériences sur MATLAB en utilisant un ensemble de règles floues et différentes fonctions d'appartenance.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous analyserons et discuterons des résultats obtenus à partir des expériences réalisées dans le troisième chapitre

CHAPITRE 1
Généralités Sur Les Energies
Renouvelables

1.1 Introduction

L'énergie est l'un des piliers de la civilisation moderne, et sa disponibilité est essentielle pour répondre aux besoins de l'humanité en matière de développement économique, social et environnemental. Cependant, les sources d'énergie traditionnelles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel ont un impact négatif sur l'environnement et épuisent les ressources naturelles de la planète. C'est pourquoi les énergies renouvelables sont devenues une alternative de plus en plus importante pour répondre aux besoins énergétiques de notre société tout en protégeant l'environnement. Dans ce chapitre, nous explorerons les avantages et les défis liés à l'utilisation des énergies renouvelables.

1.2 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont produites à partir de sources naturelles qui se régénèrent rapidement et ne s'épuisent pas. Contrairement aux énergies fossiles, comme le pétrole et le charbon, qui sont limitées et non renouvelables, les énergies renouvelables sont considérées comme durables et respectueuses de l'environnement. Les sources d'énergie renouvelable les plus courantes sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse. On encourage de plus en plus l'utilisation des énergies renouvelables afin de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Les avantages de l'utilisation des énergies renouvelables sont nombreux, notamment la réduction de la pollution de l'air et de l'eau, la création d'emplois locaux, la diminution de la dépendance énergétique vis-à-vis des importations et la réduction des coûts à long terme [1] [2] [3]

1.2.1 Energie éoliennes

Les ressources éoliennes sont dérivées des mouvements programmés des masses d'air indirectement au soleil de la terre. En chauffant une zone spécifique Le refroidissement planétaire et autre crée des différences de pression et de masse L'air est toujours en mouvement. Après avoir oublié cette énergie pendant si longtemps Bien qu'il soit utilisé depuis longtemps, il est en plein essor depuis une trentaine d'années. Surtout le précédent du premier choc pétrolier. Avec l'énergie mondiale Les éoliennes décennales continuent de croître à un rythme annuel de 30 %. En Europe, Sous impulsions principalement allemandes, scandinaves et espagnoles, 2000 Capacité installée d'environ 15000 MW. Ce nombre a presque doublé en 2003 Environ 27 000 MW contre 40 000 MW d'énergie éolienne installée dans le monde. Pour 70000 MW éoliens installés en Europe en 2010.[4]

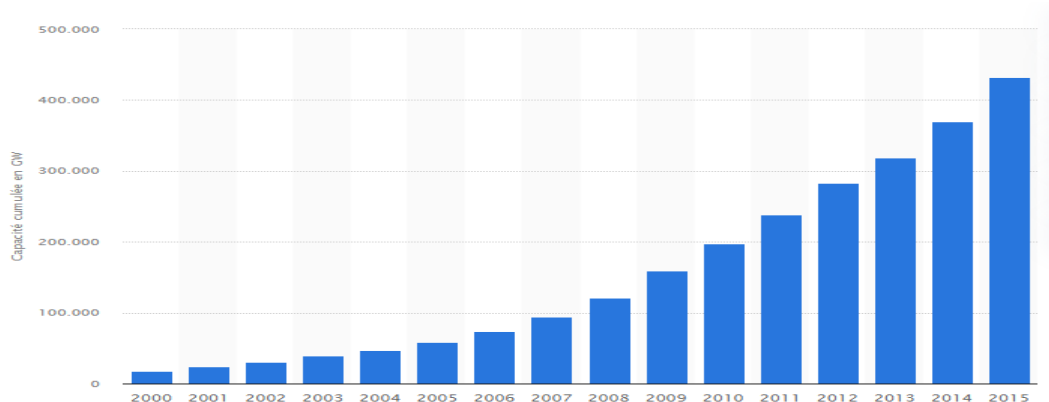


Figure 1.1 : Évolution de la capacité éolienne cumulée installée dans le monde de 2000 à 2015(en gigawatts)[5]

1.2.1.1 L'énergie éolienne dans le Monde

Ces vingt dernières années, la production d'énergie éolienne a considérablement augmenté dans le monde entier. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité installée est passée de 487 GW en 2016 à 534 GW en 2017. Les pays leaders en matière d'installation d'énergie éolienne étaient l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne, avec une capacité totale de 153,7 GW. Récemment, la Chine est devenue le principal acteur du marché éolien, avec plus d'un quart de la puissance mondiale installée à fin 2017, soit un total de 188,232 GW. Les États-Unis d'Amérique ont installé 89 GW et l'Inde 32,85 GW à fin 2017.

En Afrique, le développement de l'énergie éolienne est limité, avec une capacité de seulement 4,53 GW, principalement installée en Afrique du Sud, en Égypte, au Maroc, en Tunisie et en Éthiopie. L'Algérie, quant à elle, a pris du retard dans la course aux énergies renouvelables, malgré l'élaboration d'un programme gouvernemental visant à installer une capacité de 5,1 GW d'énergie éolienne d'ici 2030.[6]

1.2.1.2 L'énergie éolienne en Algérie

Le premier essai de raccordement d'éoliennes au réseau électrique algérien remonte à 1957, avec la mise en place d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent à Alger. Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été initialement installé à St-ALBAN en Angleterre. Il s'agissait d'une bipale à pas variable de type pneumatique, mesurant 30 mètres de hauteur et avec un diamètre de 25 mètres. Ce modèle a été acquis par Electricité et Gaz d'Algérie, démonté puis installé en Algérie[7]

La ferme éolienne de Kaberten se situe à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar. Ce parc éolien a été opérationnel depuis début juin 2014 et inauguré officiellement le 03 juillet 2014. Il se compose de 12 éoliennes de type Gamesa G52, chacune ayant une puissance de 850 kW et un diamètre de 52 mètres. La hauteur des mâts est de 55 mètres. Les éoliennes sont installées sur un site de 33 hectares. Le projet a été réalisé par deux filiales de SONELGAZ, avec la supervision de CEGELEC (ENERGA pour le génie civil et ETTERKIB pour le montage des équipements). L'électricité produite est injectée dans le réseau MT local. Les relevés de performances des éoliennes ont montré que la production d'électricité atteignait

parfois la puissance nominale de 10,2 MW du parc. La pénétration de l'énergie éolienne dans le réseau local est de 5 % [8]

En vue d'atteindre l'objectif de 5 GW d'énergie éolienne dans le mix énergétique d'ici 2030, il est crucial de lancer et de réaliser les projets dans des délais très courts. La mise en œuvre du programme des énergies renouvelables, notamment dans le domaine éolien, requiert la construction d'environ vingt fermes éoliennes, chacune étant constituée d'une centaine d'aérogénérateurs de grande taille. Il est impératif de respecter les échéances pour concrétiser ce plan ambitieux. [6]



Figure 1.2 : première ferme éolienne de 10 mégawatts à Adrar[9]

1.2.1.3 Types des turbines éoliennes

On distingue principalement deux types d'éoliennes qui se différencient par leur organe de captage d'énergie, à savoir l'aéroturbine. La position de la turbine par rapport au sol détermine si l'éolienne est de type horizontal ou vertical.

1. Eolienne à axe vertical:

Les éoliennes ont été les premières structures conçues pour produire de l'électricité. Plusieurs variantes technologiques ont été expérimentées, mais seuls deux types de structures ont atteint le stade de l'industrialisation : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.

Cependant, aujourd'hui, ce type d'éolienne est assez peu courant et son utilisation est beaucoup moins répandue. [10]

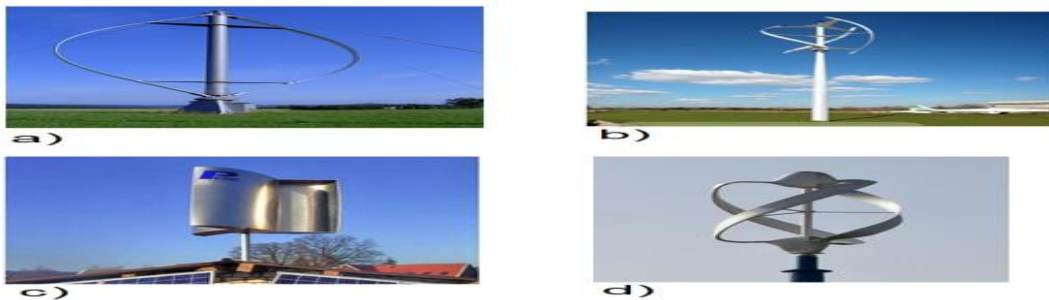


Figure 1.3 : a) et b) deux éoliennes du type Darrieus, c) une éolienne type Savonius, d) une éolienne combinant les technologies Darrieus et Savonius. [11]

2. Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes les plus couramment utilisées sont probablement celles qui présentent des avantages remarquables, avec des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.

De nos jours, cette structure est la plus répandue. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance et destinées à des utilisations permanentes, telles que la charge des batteries.[10]



Figure 1.4 : éolienne à axe horizontale.[12]

1.2.1.4 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes sont utilisées pour transformer l'énergie du vent en énergie électrique en deux étapes distinctes.

Tout d'abord, la turbine (rotor) extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique.

Ensuite, la génératrice convertit cette énergie mécanique en énergie électrique qui est ensuite transmise au réseau électrique.

Cependant, la non-maîtrise de l'énergie primaire et son caractère intermittent posent des difficultés pour obtenir une conversion et une transmission d'énergie régulières. Pour pallier ce problème, la seule option de stockage est inertielle, ce qui nécessite une accélération de la turbine.

En conséquence, la régularité de la transmission de l'énergie dépend d'un moyen de stockage en sus de l'inertie naturelle de la turbine. Le fonctionnement global de ce système est présenté dans la Figure (1.5), qui souligne la complexité des différents domaines impliqués tels que l'aérodynamique, la mécanique, l'électricité et l'automatique.[13]

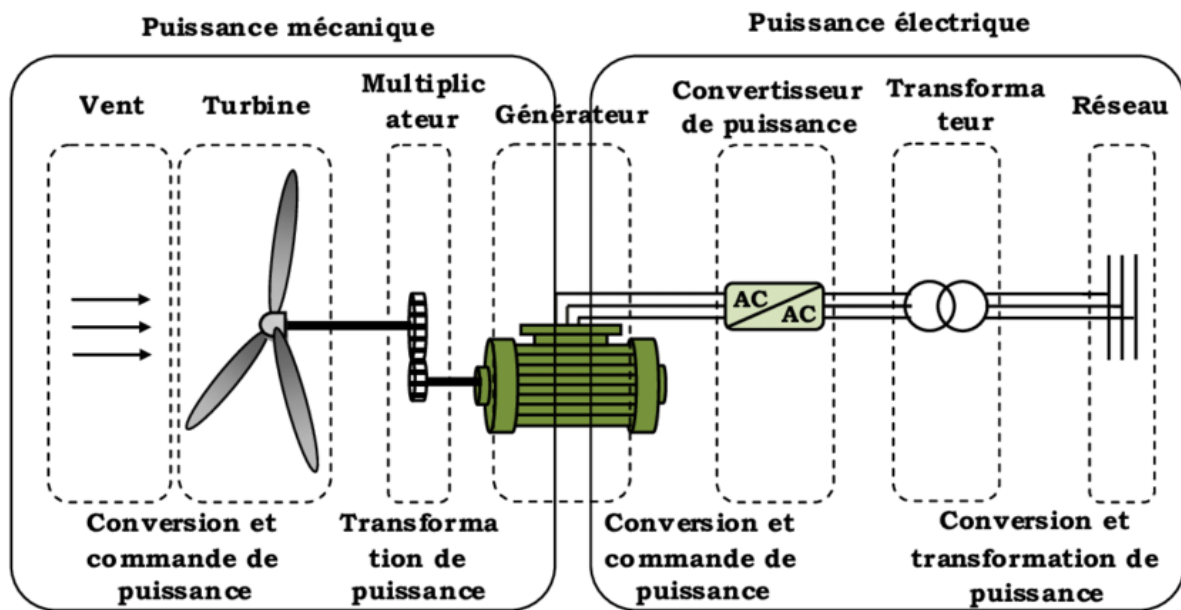


Figure 1.5 : Principaux organes du système de conversion éolien[14]

1.2.1.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

Les avantages :

L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie renouvelable, propre, abondante et économique. Parmi ses avantages, on peut citer :

- L'énergie éolienne est renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, ce qui permet aux générations futures de continuer à en bénéficier.
- Lorsqu'un aérogénérateur produit de l'électricité, cela remplace la production d'une unité d'électricité par une centrale fonctionnant avec des combustibles fossiles. Par conséquent, l'utilisation de l'énergie éolienne permet déjà aujourd'hui de réduire les émissions de CO₂, SO₂ et NO_x, qui sont les principaux contributeurs aux pluies acides. Une étude réalisée par Bou en 1999 a montré que grâce à l'énergie éolienne, l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO_x a été évitée.
- Contrairement à l'énergie nucléaire, l'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit aucun déchet radioactif dont la durée de vie est connue.
- Contrairement aux centrales thermiques et nucléaires qui fournissent de l'énergie de manière continue, l'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas continue car les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées. Cette flexibilité permet d'éviter les pertes d'énergie importantes qui se produisent lorsque les centrales fonctionnent même lorsque l'énergie n'est pas nécessaire, entraînant un mauvais rendement énergétique.
- L'énergie éolienne est une source d'énergie très attractive pour les pays en développement car elle répond à leur besoin pressant d'énergie pour leur développement. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple et le coût d'investissement requis est

beaucoup moins élevé que pour d'autres formes d'énergie plus traditionnelles. De plus, l'énergie éolienne peut être facilement intégrée dans un système électrique existant

- Le démontage des parcs éoliens est très facile et ne laisse aucun impact environnemental.[15]

Les inconvénients :

Cependant, malgré ces avantages, l'énergie éolienne présente également certains inconvénients :

- La production d'énergie électrique est influencée par les conditions météorologiques, en particulier la nature imprévisible et aléatoire du vent qui affecte la qualité de la puissance électrique générée. Cette situation représente une contrainte pour les responsables des réseaux électriques
- La principale source de bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, qui a commencé à être remplacé par des éoliennes à attaque directe pour réduire le niveau sonore.
- Dans le cas d'installations autonomes, il est indispensable d'opter pour des solutions de stockage d'énergie ou d'ajouter un groupe électrogène Diesel pour garantir un approvisionnement continu en électricité. Toutefois, cela entraîne une hausse des coûts.[16]

1.2.2 Energie solaire

1.2.2.1 Généralités sur les systèmes solaires

La source d'énergie la plus répandue sur Terre est l'énergie solaire, qui est également la principale source d'énergie renouvelable.

Cependant, cette énergie est fortement atténuée. On peut exploiter le rayonnement solaire pour produire de l'électricité en utilisant des semi-conducteurs photovoltaïques ou pour générer de la chaleur solaire thermique, qui peut être utilisée pour le chauffage ou la production d'électricité.[17]

La possibilité de l'énergie solaire en tant qu'alternative aux autres sources d'énergie est indéniable. Le pays bénéficie d'un potentiel solaire considérable, avec plus de 3000 heures de lumière solaire chaque année, accompagné d'un haut niveau d'éclairement. En optimisant les angles de réception, la moyenne quotidienne annuelle peut atteindre entre 5 et 7 kWh/m²/jour.[18]



Figure 1.6 : Centrale PV au sol (Narbonne –Aude) [19]

1.2.2.2 Le solaire photovoltaïque dans le monde

En 2018, la Chine s'est classée en tête des pays producteurs d'électricité d'origine solaire photovoltaïque, avec une production de 176,9 TWh, représentant 32% de la production mondiale. Les États-Unis se classent deuxièmes, avec une production de 81,2 TWh (15%), suivis du Japon, avec une production de 62,6 TWh (11%). mondiale. Les États-Unis se classent deuxièmes, avec une production de 81,2 TWh (15%), suivis du Japon, avec une production de 62,6 TWh (11%), la production d'électricité issue de l'énergie solaire photovoltaïque a représenté 2,1% de la production totale d'électricité dans le monde. En Europe, l'Italie et l'Allemagne se démarquent en produisant de l'électricité solaire photovoltaïque correspondant à plus de 7% de leur consommation nationale d'électricité.

En 2019, la capacité mondiale de production d'énergie solaire photovoltaïque a atteint 627 GW, avec l'installation de près de 115 GW de panneaux solaires au cours de l'année. Cette croissance représente une augmentation de 12% par rapport à l'année précédente.[20]

Tableau 1.1 : Principaux pays producteurs d'électricité d'origine solaire photovoltaïque en 2018 (Source : International Energy Agency (IEA))

Pays	Production	%National
Chine	176.9 TWh	2%
Etats-Unis	81.2 TWh	2%
Japon	62.6 TWh	6%
Allemagne	45.8 TWh	7%
Inde	39.7 TWh	2%
Italie	22.6 TWh	8%
Australie	14.8 TWh	6%
Corée du Sud	13.0 TWh	2%
Royaume-Uni	12.8 TWh	4%
France	10.5 TWh	2%

1.2.2.3 L'énergie Solaire en Algérie

Chaque année, l'Algérie bénéficie d'une quantité considérable d'énergie solaire, atteignant environ 5,2 millions de milliards de KWh/an. Cela équivaut à 430 fois les réserves algériennes en hydrocarbures prouvées et 4,8 fois les réserves mondiales prouvées en pétrole.

L'énergie solaire est la forme d'énergie renouvelable la plus importante en Algérie, représentant 169,44 TWh/an, soit 5000 fois la consommation annuelle d'électricité du pays. Avec plus de 2 000 heures d'insolation par an, le territoire algérien reçoit en moyenne plus de 2 200 KWh/m²/an, atteignant jusqu'à 3 900 heures dans certaines régions.

Sur la plupart du territoire algérien, l'énergie solaire reçue quotidiennement sur une surface horizontale d'un mètre carré est d'environ 5 KWh/m²/an. Au nord du pays, cette quantité atteint près de 1700 KWh/m²/an, tandis qu'au sud, elle atteint 2650 KWh/m²/an.

Le gouvernement algérien a prévu de lancer plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc/an devraient être réalisés entre 2021 et 2030.

Au cours de la période 2016-2020, environ 1200 MW de capacité totale de centrales solaires thermiques avec stockage devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis de 600 MW par an jusqu'en 2030.[21]

1.2.2.4 Principe physique de l'énergie solaire

-Les rayonnements émis par le soleil se concentrent principalement dans la plage de longueurs d'onde correspondant à la lumière visible, soit entre 400 et 700 nanomètres. Il est à noter que la quantité d'énergie transportée par les photons est proportionnelle à la courte longueur d'onde des rayonnements émis, ce qui signifie que plus la longueur d'onde est courte, plus la quantité d'énergie portée par les photons est élevée.

-L'énergie peut être transférée sous forme de chaleur, ce qui signifie que cette énergie excite les atomes qui constituent la matière, entraînant ainsi une agitation et une augmentation de la température

-Lorsqu'ils sont exposés aux rayons du soleil, les capteurs ont la capacité de convertir l'énergie des photons en deux formes d'énergie différentes : l'énergie thermique et l'énergie électrique[22]

1.2.2.5 Les types de l'énergie solaire

Il existe trois types d'énergie solaire qui peuvent être exploitées :

1. L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique est une technologie qui permet de produire de la chaleur en utilisant le rayonnement solaire infrarouge. Cette technologie est assez simple comparée à celle du photovoltaïque, et permet de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide à moindre coût. Elle consiste à capter les calories grâce à des surfaces absorbant de la chaleur, telles que des plaques métalliques peintes en noir. Cette méthode est très répandue dans les pays à fort ensoleillement, tels que l'Afrique et la Grèce, pour produire de l'eau sanitaire destinée aux habitations qui n'ont pas besoin de chauffage central[23]

2. L'énergie solaire thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique implique l'utilisation de grandes centrales équipées de réflecteurs pour chauffer un fluide à haute température. La vapeur est ensuite produite par échange thermique, et utilisée pour générer de l'électricité via une turbine à vapeur. Le four solaire de « FONT-ROMEUE » en France fonctionne selon ce principe.[23]

3. L'énergie solaire photovoltaïque :

La production d'énergie photovoltaïque découle directement de l'émission de rayons solaires. Cette énergie est obtenue grâce à des panneaux semi-conducteurs qui exploitent la photoélectricité pour générer de l'électricité, conformément au principe de l'effet photoélectrique.[24]

Générateur photovoltaïque (PV) :

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique est possible grâce au générateur photovoltaïque. Ce dernier transforme l'énergie solaire en une tension et un courant continu qui peuvent varier en fonction de l'éclairement reçu par les panneaux solaires. La cellule photovoltaïque est le composant clé de cette conversion[18].

La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un capteur semi-conducteur qui transforme la lumière en courant électrique en utilisant l'effet photovoltaïque. Les matériaux utilisés pour la fabrication de ces cellules sont choisis en fonction de leur capacité à libérer des électrons lorsqu'ils sont excités par des photons solaires. Les électrons libérés génèrent un courant continu et une force électromotrice à travers la cellule. La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium dopées positivement et négativement, créant une jonction PN avec une barrière de potentiel. La figure (1.7) montre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.[25]

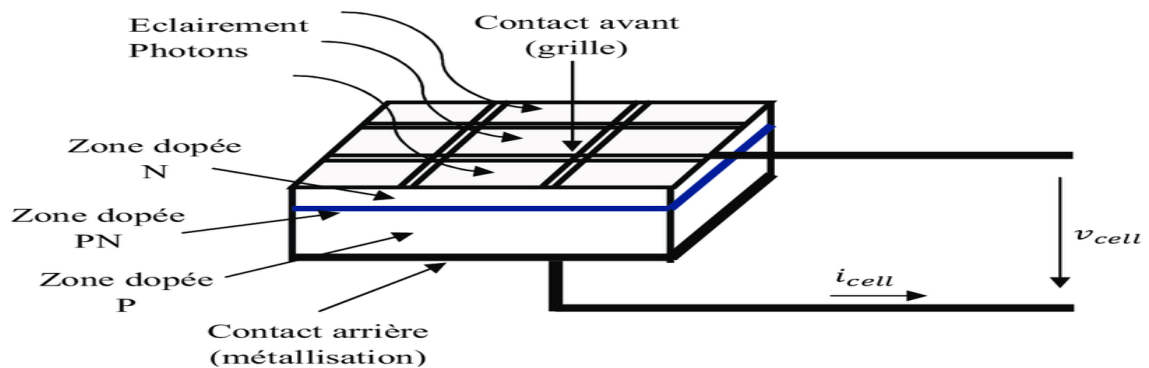


Figure 1.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque.[25]

Système de stockage :

Le stockage dans une installation photovoltaïque fait référence à la rétention de l'énergie générée par le générateur solaire pour une utilisation future. La gestion de l'énergie solaire nécessite une planification du stockage en fonction des conditions météorologiques afin de répondre à deux fonctions principales.

- Assurer la fourniture d'électricité à l'installation en cas de production insuffisante d'énergie par le générateur photovoltaïque, telle que durant la nuit ou par mauvais temps.
- Permettre à l'installation d'avoir accès à des niveaux de puissance plus élevés que ceux fournis par le générateur photovoltaïque.[26]

Rapports de chargement et déchargement :

Lorsque la batterie est chargée ou déchargée à un rythme différent de celui spécifié, sa capacité disponible peut varier. En général, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent que celui indiqué, sa capacité augmente légèrement. Toutefois, si le rythme est plus rapide, la capacité diminue.[26]

1.2.2.6 Les avantages et les inconvénients d'une installation PV**Les Avantages :**

- La grande fiabilité de cette installation est due à l'absence de pièces mobiles, ce qui la rend idéale pour les zones éloignées. C'est pourquoi elle est couramment utilisée sur les engins spatiaux.
- La modularité des panneaux photovoltaïques permet un montage facile et adaptable à une variété de besoins énergétiques. Les systèmes peuvent être ajustés pour répondre à des applications de puissance allant du milliwatt au mégawatt
- Le coût de fonctionnement est très économique étant donné les faibles besoins en maintenance, et ne nécessite ni combustible, ni transport de carburant, ni personnel hautement qualifié
- La technologie photovoltaïque est écologique car elle ne produit aucun polluant, fonctionne silencieusement et n'affecte pas l'environnement, à l'exception de l'espace occupé par les grandes installations.[26]

Les inconvénients :

- Le stockage de l'énergie électrique présente encore de nombreux défis.
- Le taux de conversion réel d'un module est faible, généralement compris entre 10% et 15% (ce qui correspond à une production annuelle de 10 à 15 mégawatts par kilomètre carré pour la région BENELUX) et la limite théorique pour une cellule est de 28%. En outre, les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel pour les faibles demandes d'énergie dans les régions isolées.
- Dépendant des conditions météorologiques.
- Si le stockage d'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est requis, cela entraîne une augmentation des coûts du générateur.
- Le rendement peu élevé des panneaux photovoltaïques est attribuable au fonctionnement des cellules photovoltaïques elles-mêmes. En effet, l'énergie du rayonnement doit être d'au moins 1 eV pour qu'un électron puisse être déplacé et générer de l'électricité. Tous les rayons incidents avec une énergie inférieure à cette valeur ne seront donc pas convertis en électricité. Par ailleurs, les rayons lumineux ayant une énergie supérieure à 1 eV perdront une partie de leur énergie qui sera dissipée sous forme de chaleur.[26]

1.2.3 Energie hydraulique

Les hydrauliques et les éoliennes au large, sont deux technologies d'énergie marine renouvelable en plein essor ces dernières années. Bien qu'elles partagent des similitudes, comme l'exploitation de l'énergie cinétique, l'hydrolienne récupère l'énergie des courants de marée alors que l'éolienne la récupère du vent. Les caractéristiques temporelles de ces deux ressources sont donc différentes. De plus, il existe des technologies spécifiques au secteur hydraulique qui peuvent être distinguées.[27]



Figure 1.8 : Turbine [28]

1.2.3.1 L'énergie Hydraulique dans le monde

La quantité d'électricité produite par les barrages hydroélectriques dépend fortement des précipitations, qui influent sur la quantité d'eau stockée dans les lacs de retenue et le débit des grands fleuves.

En 2021, la production d'électricité a diminué, en particulier au Brésil, où la sécheresse a persisté. Toutefois, l'hydroélectricité reste la source d'énergie renouvelable la plus importante au monde, représentant 15% de la production électrique totale. La Chine est de loin le premier producteur d'hydroélectricité, suivie par le Canada, le Brésil et les États-Unis.[29]

Tableau 1.2 : Production mondiale d'hydroélectricité (en TWh - térawattheure)

(Source : BP Statistical Review 2022)

Pays	2020	2021	Part dans la génération hydroélectrique mondiale
Chine	1321.7 TWh	1300.0 TWh	30.4%
Canada	386.5 TWh	380.8 TWh	8.9%
Brésil	396.4 TWh	362.8 TWh	8.5%
Etats-Unis	282.8 TWh	257.7 TWh	6.0%
Russie	212.4 TWh	214.5 TWh	5.0%

1.2.3.2 L'énergie Hydraulique en Algérie

En Algérie, environ 65 milliards de m³ d'eau tombent sur le territoire chaque année. Les ressources en surface du pays diminuent du Nord au Sud. Environ 2/3 des ressources utiles et renouvelables estimées à 25 milliards de m³ proviennent des ressources en surface.[21]

1.2.3.3 Principe de fonctionnement d'une hydraulique :

Les hydrauliques sont similaires aux éoliennes dans la mesure où elles utilisent les courants de marée pour faire tourner les pales de leur turbine, qui est reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. La quantité d'électricité produite dépend de la vitesse des courants de marée. Contrairement aux systèmes houlomoteurs qui utilisent l'énergie des vagues et aux éoliennes qui utilisent l'énergie du vent, les hydrauliques sont immergées dans l'eau. Bien que les courants de marée soient bidirectionnels, les hydroliennes peuvent également être utilisées pour les courants fluviaux unidirectionnels[27], la figure (1.9) illustre le principe de fonctionnement d'un système hydraulique :

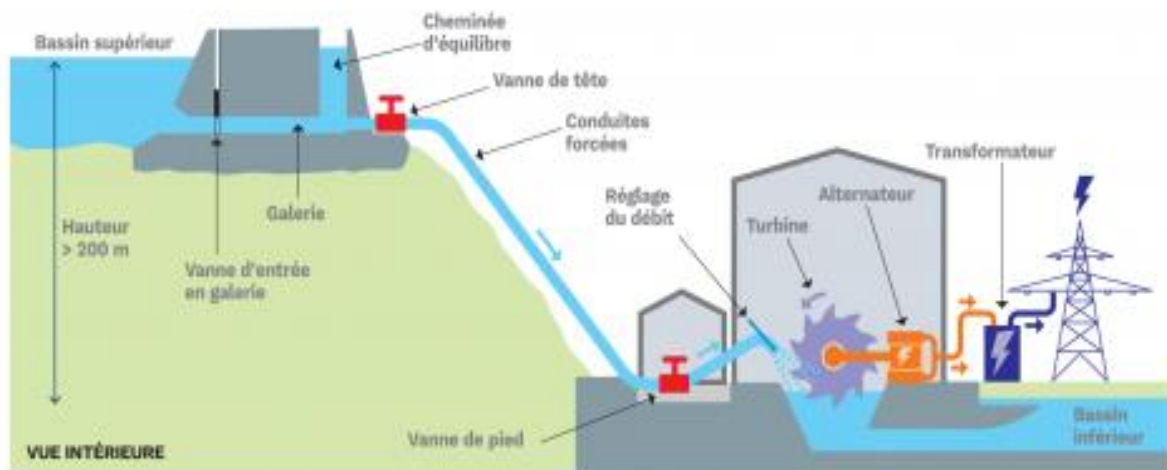


Figure 1.9 : le principe de fonctionnement d'un système hydraulique [30]

1.2.3.4 Typologie des turbines hydrauliques

On distingue deux typologies de turbines hydrauliques :

1. Turbines à action :

Turbine Pelton :

La turbine Pelton utilise une roue avec des seaux spécialement profilés pour maximiser son efficacité en utilisant l'énergie cinétique de l'eau projetée par un injecteur. L'eau s'écoule des côtés de la roue. Cette turbine peut fonctionner à des vitesses nominales allant de 500 à 1500 tr/min, ce qui permet une connexion directe à une génératrice électrique sans avoir besoin d'un multiplicateur.[31]

Turbine Crossflow :

La turbine Crossflow, également appelée turbine à flux traversant, est une machine à action qui se distingue par le fait que l'eau passe à travers la roue deux fois. Elle est simple à construire et se compose de trois parties principales :

- un injecteur à section rectangulaire, dont le débit est régulé par une aube profilée rotative similaire à une vanne papillon.
- une roue en forme de tambour équipée d'aubes cylindriques profilées.
- un bâti qui entoure la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

En règle générale, la vitesse de rotation de cette turbine est basse, ce qui explique pourquoi il est nécessaire d'utiliser un multiplicateur pour la relier à une génératrice.[31]

1. Turbines à réaction :

Turbine Francis :

La turbine Francis convient aux débits moyens allant de 100 à 6000 litres par seconde et est adaptée aux chutes d'eau moyennes de 10 à 100 mètres. Elle est hautement efficace et tourne rapidement à une vitesse de 1000 tours par minute.[31]

Turbine Kaplan :

Les turbines Kaplan (également appelées turbines hélice) conviennent particulièrement bien aux chutes d'eau faibles d'environ 2 mètres et aux débits importants allant de 300 à 15000 litres par seconde. Elles sont efficaces même avec des débits variables et ont un rendement satisfaisant (jusqu'à 84-90% maximum), malgré leur faible vitesse de rotation.

La turbine Kaplan utilise une roue qui ressemble à une hélice de bateau, avec des pales orientables pour maximiser son efficacité, mesurée par le coefficient de rendement η .

La turbine Kaplan présente une similitude intéressante avec les éoliennes en ce qui concerne la possibilité de régler l'orientation des pales.[31]

1.2.3.5 Les types des centrales hydrauliques

1. Les centrales électriques de haute chute ($h > 300\text{m}$) :

Les centrales de haute chute sont équipées de turbines Pelton et sont situées dans les régions très montagneuses telles que les Alpes. Elles ont une hauteur de chute de plus de 300 mètres, mais ont une capacité de réservoir relativement faible.[4]

2. Les centrales électriques de moyenne chute ($30 < h < 300\text{m}$) :

Les centrales de moyenne chute utilisent des turbines Francis et ont une hauteur comprise entre 30 m et 300 m. Elles sont alimentées par l'eau stockée derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Ces centrales possèdent un réservoir de grande capacité, comme la centrale Manic 5 qui a une hauteur de chute de 155 mètres et une puissance de 1528 MW.[4]

3. Les centrales électriques de basse chute ($h < 30\text{m}$) :

Les centrales de basse chute, également appelées centrales au fil de l'eau, utilisent des turbines Kaplan ou Francis et ont une hauteur de chute inférieure à 30 mètres. Elles sont installées sur les rivières ou les fleuves à fort débit, comme la centrale Beauharnois sur le Saint-Laurent, qui a une hauteur de chute de 25 mètres et une puissance de 1575 MW.[4]

1.2.3.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique

Les avantages :

- Maîtrise complète de l'énergie, L'expérience acquise par l'être humain dans la transformation de l'énergie de l'eau en électricité lui a permis de parfaitement maîtriser cette source d'énergie. Les centrales hydroélectriques produisent une énergie propre et sont considérées comme la méthode la plus propre pour produire de l'électricité à grande échelle.
- Rendements élevés, Les centrales hydroélectriques sont construites pour produire de grandes quantités d'énergie. Ces centrales sont généralement situées dans des endroits géographiques favorables, avec des reliefs de terrain permettant des chutes d'eau importantes, ce qui contribue à leur rendement élevé.
- La flexibilité de production, Les barrages permettent de réguler l'intensité du débit d'eau et la production d'énergie finale. Cette flexibilité permet aux centrales de s'adapter facilement aux besoins du réseau en ouvrant plus ou moins le barrage.
- La sécurité maximale, Contrairement aux centrales nucléaires ou à celles utilisant des carburants fossiles, les centrales hydroélectriques ne présentent aucun risque d'explosion et sont considérées comme l'une des sources d'énergie les plus sûres. Les coûts de sécurité sont également nettement inférieurs à ceux des centrales nucléaires, par exemple.[32]

Les inconvénients :

- Les investissements nécessaires, La construction d'une centrale hydraulique demande des investissements lourds. Les coûts de génie civil nécessaires pour la construction d'un barrage sûr et durable sont importants.
- Les impacts environnementaux, La construction d'une centrale hydraulique peut avoir des impacts négatifs sur l'environnement. Construire un barrage dans un cours d'eau peut perturber l'écosystème naturel.
- Les risques de sécheresse, La production d'énergie hydraulique dépend de l'eau, ce qui signifie qu'une sécheresse peut avoir des impacts négatifs sur la production. Bien que cette énergie soit maîtrisable, le risque de sécheresse est imprévisible et peut entraîner un arrêt total de la production d'énergie, perturbant ainsi le réseau énergétique du pays.
- Les contraintes géographiques, La production d'énergie hydraulique nécessite un terrain propice, avec des reliefs montagneux, des cours d'eau à forts courants et des chutes d'eau importantes. La plupart des endroits exploitables par cette énergie ont déjà été équipés, ce qui limite le potentiel de cette énergie propre pour augmenter de manière significative la part de l'énergie hydraulique dans le mix énergétique mondial dans les années à venir.[32]

1.2.4 L'énergie Biomasse

La biomasse, qui englobe tout matériau organique d'origine végétale ou animale, est une source d'énergie ancestrale largement utilisée par l'humanité. Elle est souvent employée pour générer de la chaleur et constitue environ 10% de l'énergie primaire produite à l'échelle planétaire. Elle est fréquemment présente dans les réseaux non-commerciaux et constitue la source d'énergie principale pour presque 2,6 milliards de personnes. Les déchets organiques font partie intégrante de cette ressource.[33]



Figure 1.10 : La centrale Biomasse [34]

1.2.4.1 La biomasse en Algérie

L'Algérie dispose de différentes sources d'énergie renouvelable, y compris la biomasse qui est en constante augmentation. Les déchets non traités, qui représentent 5 millions de tonnes non recyclées, causent une pollution importante provenant notamment des décharges, des centres d'enfouissement techniques et des rejets industriels. Le nord de l'Algérie, qui représente 10% de la surface du pays, possède une forêt de 1,8 million d'hectares et 1,9 million d'hectares de formations forestières dégradées en maquis. Seulement 5% de la forêt algérienne est occupée par le pin maritime et l'eucalyptus, deux plantes intéressantes pour l'utilisation énergétique.

Le potentiel algérien de la biomasse comprend les forêts, qui représentent environ 37 Mtep (le potentiel récupéré est de l'ordre de 10%), et les déchets urbains et agricoles, estimés à 1,33 Mtep/an. Pour mettre en place un plan de développement de traitement et de valorisation énergétique des déchets en Algérie, il est nécessaire de réaliser un inventaire des déchets et de la biomasse[21]

1.2.4.2 Les principales utilisations de la biomasse

Le bois énergie : peut être utilisé comme source de biomasse pour produire de l'énergie par combustion dans une chaudière.[35]

Le biogaz : est obtenu par la décomposition de certains déchets grâce à l'action de bactéries. Composé principalement de méthane, ce gaz peut être épuré pour être utilisé comme source d'énergie dans des chaudières ou pour alimenter des véhicules fonctionnant au Gaz Naturel Véhicule (GNV).[35]

Les biocarburants : sont produits à partir de cultures énergétiques telles que la betterave, la canne à sucre, le soja ainsi que des huiles végétales recyclées. Le Brésil est un exemple de pays qui utilise largement l'éthanol comme biocarburant pour le transport.[35]

1.2.4.3 La Cogénération de biomasse

La production combinée d'électricité et de chaleur en utilisant la biomasse est considérée comme l'une des technologies prometteuses pour atteindre une efficacité énergétique supérieure et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cette méthode est communément appelée cogénération.

En général, la plupart des applications convertissent la production d'énergie mécanique en énergie électrique pour une consommation propre ou une vente à des tiers. D'autre part, l'énergie thermique produite peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude ou pour des procédés industriels. Le système présenté possède un taux de rendement plus élevé (70 à 90%) que la production indépendante de chaleur et d'électricité. De plus, il permet de réduire considérablement les coûts énergétiques et de diminuer les émissions de polluants.

Il existe plusieurs technologies possibles pour la cogénération de biomasse, incluant la turbine à vapeur, le moteur à vapeur, le cycle organique de Rankine, ainsi que le moteur Stirling. La figure (1.11) illustre le principe de base de la cogénération.[36]

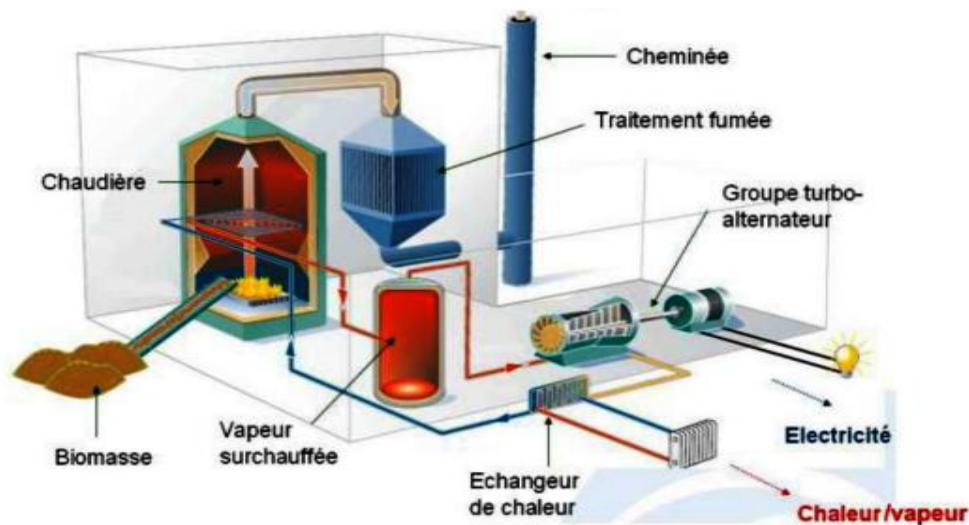


Figure 1.11 : Principe de fonctionnement d'une centrale de cogénération d'électricité et de vapeur à partir de la biomasse [36]

1.2.4.4 Les Avantages et Inconvénients

Les Avantages :

- Les coûts d'investissement dans la biomasse forestière sont caractérisés par une faible intensité et une stabilité notable.
- Contrairement à l'énergie éolienne ou solaire photovoltaïque, la biomasse forestière constitue une source d'énergie continue.

- La densité énergétique de la biomasse forestière est inférieure à celle des combustibles fossiles.[37]

Les Inconvénients :

- La dispersion de la ressource sur le territoire rend coûteuse l'exploitation de la biomasse forestière à grande échelle.
- Les centrales de cogénération à base de biomasse doivent être installées à proximité de la ressource ou des lignes de transport d'électricité pour être efficaces
- La valorisation de la biomasse urbaine est un processus complexe, en partie en raison de la grande variété de déchets impliqués. Il faut mettre en place des activités de triage et recourir à différentes technologies de traitement pour y parvenir.[37]

1.2.5 Énergie Géothermique

La géothermie consiste à extraire la chaleur emmagasinée sous la surface terrestre en utilisant des technologies appropriées. La température du sol augmente en fonction de la profondeur et peut varier selon l'environnement géologique.

En utilisant différents systèmes de collecte, l'énergie stockée peut être récupérée pour alimenter des bâtiments en chaleur ou produire de l'électricité[38]



Figure 1.12 : la chaleur géothermique [39]

1.2.5.1 Énergie géothermique en Algérie

Dans le nord de l'Algérie, les calcaires jurassiques représentent des réservoirs géothermiques majeurs qui alimentent plus de 200 sources thermales. Ces sources sont principalement situées dans les régions du Nord-Est et Nord-Ouest du pays et ont une température moyenne de 40°C, atteignant même les 96°C à Hammam Chellala (anciennement appelé Meskhoutine). Ces sources chaudes sont alimentées par des réservoirs existants et ont un débit cumulé de plus de 2 m³/s.

Bien que la géothermie en Algérie se situe dans la catégorie "moyenne température", les opportunités d'utilisation restent nombreuses et diversifiées. Avec le développement de techniques de prospection et d'exploitation, l'exploitation de cette source d'énergie est devenue de plus en plus attrayante.

D'ici 2030, l'Algérie envisage de produire près de 40% de son électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Bien que l'énergie solaire soit actuellement privilégiée, d'autres options sont également envisagées.[21]

1.2.5.2 Les types de géothermie

On peut catégoriser la géothermie en fonction de la température de la source thermique en quatre types principaux :

1. La géothermie très basse énergie :

La chaleur provenant du sous-sol ou des aquifères superficiels situés entre 0 et 600 mètres de profondeur et dont la température est inférieure à 30 °C est exploitée principalement pour le chauffage, la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire. Cette méthode implique l'installation d'une pompe à chaleur associée à des capteurs ou des forages. Elle est applicable dans de nombreuses régions du monde, y compris en Algérie.[40]

2. La géothermie basse énergie :

Les gisements situés dans des bassins sédimentaires entre 1500 et 2500 mètres de profondeur, dont la température varie entre 30 et 90 °C, sont exploités pour le chauffage de logements et certaines applications industrielles. Cette méthode peut être appliquée dans certaines régions du Sahara septentrional algérien, notamment à Ouargla, Ghardaïa et Biskra.[40]

3. La géothermie moyenne énergie :

La chaleur provenant de gisements profonds situés dans des régions continentales stables entre 2000 et 4000 mètres, ou actives à 1000 mètres, et dont la température varie entre 90 et 150 °C, est exploitée pour des applications directes telles que le chauffage de bâtiments, le séchage de produits alimentaires, la pisciculture, etc., ou pour la production d'électricité à l'aide de systèmes à cycle binaire. Cette méthode peut être appliquée dans les zones thermales du nord de l'Algérie, telles que Mascara, Ain Defla et Khenchela.[40]

4. La géothermie haute énergie :

Les gisements profonds situés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, dont la température est supérieure à 150 °C, sont exploités dans les régions géologiquement actives, telles que les zones volcaniques ou sismiques. Cette méthode implique le pompage du fluide géothermique (vapeur sèche ou humide) du réservoir géothermique profond vers la surface pour être utilisé dans la production d'électricité. Il convient de noter que ce type de géothermie n'existe pas en Algérie.[40]

1.2.5.3 Les Avantages et les Inconvénients

Les Avantages :

- Respectueuse de l'environnement grâce à l'absence de combustibles fossiles, ce qui est commun à la plupart des technologies d'énergie renouvelable.
- Disponible en continu, indépendamment des conditions météorologiques, ce qui en fait une source stable d'énergie de base.
- Coût compétitif par kWh produit en raison de son haut facteur de disponibilité et de l'absence de coûts de combustible.
- Extension possible à grande échelle sans nécessiter beaucoup de terrain ou d'espace.
- Permet des économies d'échelle pour un système électrique.
- Peut être bénéfique pour l'environnement si les centrales géothermiques sont situées dans des zones à haute valeur paysagère.[41]

Les Inconvénients :

- Les ressources géothermiques adaptées à la production d'électricité ne sont pas disponibles dans tous les pays.
- Les ressources géothermiques sous forme de vapeur ou de fluides chauds ne sont disponibles que sur une fraction limitée de la surface de la planète.
- Les technologies et techniques d'exploitation nécessaires pour étendre l'utilisation de cette source d'énergie ne sont pas encore pleinement développées.
- Les projets géothermiques présentent un risque élevé, en particulier lors de la phase d'exploration.[41]

1.3 Etat de l'art

Le tableau suivant montre quelques exemples des problèmes face à les énergies renouvelables qui avaient traitée dans les dernières années :

Tableau 1.3 : les problèmes face à les énergies renouvelables qui avaient traitée dans les dernières années.

Le chercheur	L'Année de recherche	Le problème traité	L'étude et les résultats de la recherche
Dr. Linda Nazar, professeur à l'université de Waterloo	2016	Stockage de l'énergie	Travaillé sur une nouvelle technologie de batterie lithium-soufre qui pourrait offrir une densité d'énergie plus élevée et un coût moindre que les batteries lithium-ion. En 2016, elle a publié une étude dans la revue Nature Communications qui décrit cette nouvelle technologie et ses avantages
Dr. Pierluigi Mancarella, professeur à l'université de Melbourne	2017	Intégration au réseau électrique	publié une étude sur l'utilisation de systèmes de stockage d'énergie pour aider à intégrer l'énergie renouvelable dans le réseau électrique. L'étude a montré que les systèmes de stockage d'énergie peuvent fournir une réserve de puissance instantanée qui peut aider à compenser les fluctuations de la production d'énergie renouvelable.
Dr. Reinaldo Tonkoski (professeur à l'université de l'Iowa)	2019	Intermittence de la production	publié une étude en 2019 sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour prédire la production d'énergie éolienne. Les résultats de l'étude ont montré que la combinaison de techniques d'apprentissage automatique et de modèles météorologiques peut aider à prédire la production d'énergie éolienne avec une précision supérieure à 90%.
Dr. Kai Goebel est un chercheur en ingénierie spécialisé dans le domaine de la maintenance prédictive, de la fiabilité et de la sécurité des systèmes complexes à l'Institut de technologie de Californie.	2019	Amélioration de la prévision de la production d'énergie solaire	développé un modèle de prédiction de la production d'énergie solaire basé sur des données météorologiques historiques et des images satellites en temps réel, ce qui a permis d'améliorer la précision des prévisions de production d'énergie solaire jusqu'à 50 %.
	2021	La fiabilité des éoliennes offshore dans le domaine de l'énergie renouvelable	L'équipe a développé un algorithme de maintenance prédictive basé sur l'apprentissage en profondeur pour améliorer la fiabilité des éoliennes offshore, réduisant ainsi les coûts de maintenance et augmentant leur durée de vie.

1.4 Conclusion

En conclusion, les énergies renouvelables sont des alternatives intéressantes pour répondre aux besoins énergétiques actuels tout en préservant l'environnement. Cependant, leur développement pose des défis tels que la disponibilité intermittente de certaines sources d'énergie renouvelable et le stockage d'énergie. Il est donc crucial de trouver des solutions pour surmonter ces problèmes et maximiser l'utilisation des énergies renouvelables.

Puisqu'il y a une énergie solaire très impressionnante en Algérie et dans les zones désertiques qui peut être utilisée à l'avenir pour augmenter l'économie du pays, nous traiterons des batteries photovoltaïques, et dans la prochaine partie, nous étudierons les types d'intelligence artificielle pour voir lequel est le plus approprié pour cette étude.

CHAPITRE 2
Généralités Et Concepts De
Base De L'intelligence
Artificielle

2.1 Introduction

L'intelligence artificielle est un domaine en constante évolution qui consiste à créer des machines intelligentes capables de résoudre des problèmes de manière autonome. Les techniques utilisées incluent la logique floue (Fuzzy logic), les réseaux de neurones, l'apprentissage automatique, entre autres. Les applications de l'intelligence artificielle sont vastes et touchent de nombreux domaines tels que l'industrie, la médecine, la finance, les transports, etc. L'étude de l'intelligence artificielle a pour objectif de créer des systèmes toujours plus performants et utiles pour l'humanité. Dans ce chapitre, nous allons étudier les différents types de cette technologie.

2.2 La logique floue (Fuzzy logic) :

2.2.1 Définition

La méthode de la logique floue est une approche mathématique efficace pour résoudre des problèmes complexes. Elle est particulièrement utile lorsque les données d'entrée sont imprécises et que les processus sont hautement non linéaires, pour lesquels un modèle mathématique simple n'est pas disponible. La logique floue permet de produire des résultats précis en utilisant des données imprécises. Elle est particulièrement utile dans les ordinateurs et les applications électroniques. Contrairement à la logique classique où les énoncés sont vrais ou faux, la logique floue permet à un objet de prendre n'importe quelle valeur réelle entre 0 et 1. Cette méthode est similaire à la capacité de raisonnement avec incertitudes et jugements du cerveau humain. En revanche, les ordinateurs ne peuvent manipuler que des évaluations précises. La logique floue est une tentative de combiner ces deux techniques. Elle est plus efficace que le mécanisme de contrôle conventionnel, tel que le PID.[42]

2.2.2 Notions de base de la logique floue

2.2.2.1 Sous-ensembles flous

La théorie ensembliste classique stipule que la présence d'un élément dans un sous-ensemble est déterminée par une valeur logique binaire standard : 1 pour une appartenance complète et 0 pour une absence totale. En revanche, dans la théorie floue, l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble peut être partielle et est caractérisée par une valeur numérique comprise entre 0 et 1.[43]

A) Deux ensembles selon la logique classique B) Deux ensembles selon la logique floue

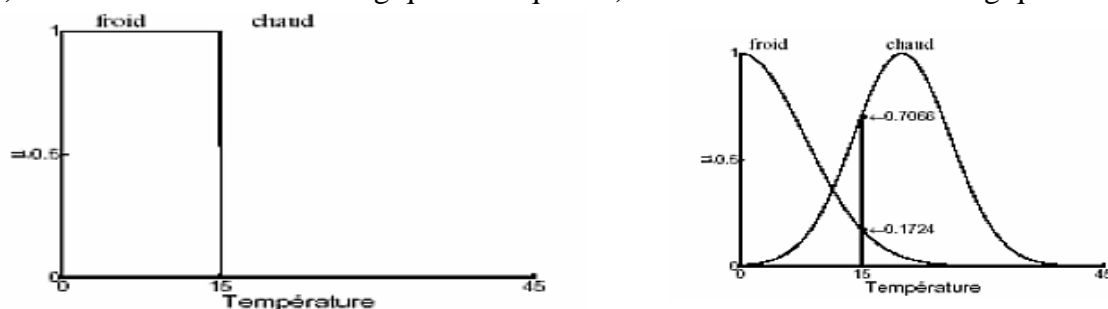


Figure 2.1 : Classification des températures d'une pièce en deux ensembles[43]

Définition : La caractéristique principale d'un sous-ensemble flou A dans un univers du discours X est déterminé par sa fonction d'appartenance $\mu_A(x)$. Cette fonction évalue chaque élément x de X et lui associe une valeur comprise entre [0,1], représentant l'appartenance de x à A.

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

On peut représenter un sous-ensemble flou A de X comme un ensemble de paires ordonnées.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \quad [43]$$

2.2.2.2 Différentes formes de fonction d'appartenance

Nous avons appris que la fonction d'appartenance représente chaque ensemble flou. Les fonctions d'appartenance sont des valeurs discrètes de l'intervalle [0,1] si l'ensemble de référence est discret. Si l'univers du discours est un ensemble continu, nous pouvons représenter ces valeurs de manière analytique, comme des fonctions d'appartenance. Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes telles que :

- Monotones (croissantes ou décroissantes), illustrées dans les figures (2.2.1) et (2.2.2)
- Triangulaires (figure 2.3a),
- Trapézoïdales (figure 2.3b),
- En forme de cloche (Gaussiennes), comme indiqué sur la (figure 2.3c) [44]

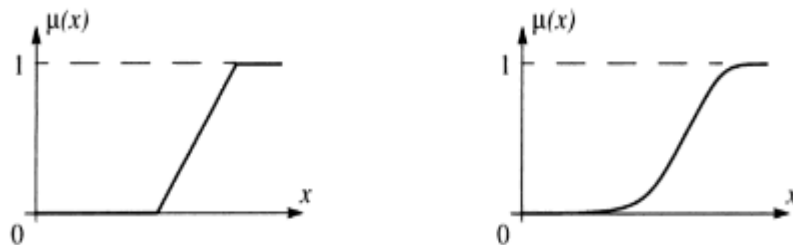


Figure 2.2.1 : fonctions d'appartenance monotones croissantes[44]



Figure 2.2.2 : fonctions d'appartenance monotones décroissantes[44]

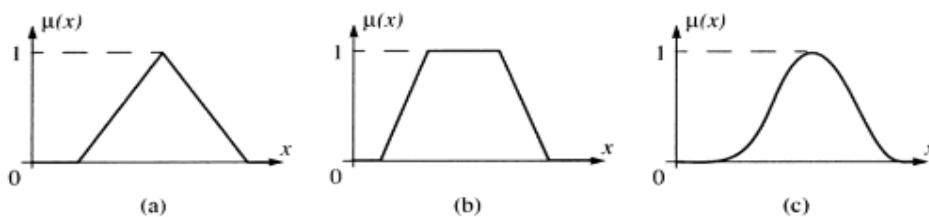


Figure 2.2.3 : fonctions d'appartenance triangulaires, trapézoïdales et de cloche[44]

2.2.2.3 Operateur de la logique floue

Nous avons redéfini les opérateurs de la théorie des ensembles classiques pour faciliter la manipulation des ensembles flous. Cette adaptation a été réalisée afin de prendre en compte les fonctions d'appartenance spécifiques à la logique floue, qui permettent des valeurs comprises entre 0 et 1.

Les opérateurs sur les ensembles flous ont été définis de la même manière que les fonctions d'appartenance. Les ensembles d'opérateurs les plus couramment utilisés pour le complément (NON), l'intersection (ET) et l'union (OU) sont présentés ci-dessous.

En utilisant les définitions courantes des opérateurs flous, nous pouvons toujours observer les propriétés de commutativité, de distributivité et d'associativité des opérateurs classiques. Cependant, il convient de noter deux exceptions importantes :

Dénomination	Intersection ET $\mu_{A \cap B}(x)$	Réunion OU $\mu_{A \cup B}(x)$	Complément NON $\mu_{\bar{A}}(x)$
Opérateur de Zadeh MIN/MAX	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$	$1 - \mu_A(x)$
Probabiliste PROD/PROBOR	$\mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \times \mu_B(x)$	$1 - \mu_A(x)$

En utilisant les définitions courantes des opérateurs flous, les caractéristiques de commutativité, distributivité et associativité des opérateurs classiques sont préservées. Toutefois, il convient de souligner qu'il existe deux exceptions importantes que nous pouvons citer :

-En logique floue, le principe du tiers exclu est contredit: $A \cup \bar{A} \neq X$, autrement dit $\mu_{A \cup \bar{A}}(x) \neq 1$

-En logique floue, un élément peut appartenir à A et non A en même temps : $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$, autrement dit $\mu_{A \cap \bar{A}} \neq 0$. Notons que ces éléments correspondent à l'ensemble $\text{supp}(A) - \text{noy}(A)$ [45]

2.2.2.4 Système d'inférence floue :

On peut représenter la structure élémentaire d'un SIF à l'aide de la figure (3), tandis qu'une description plus détaillée peut être énoncée sous la forme d'un ensemble de règles linguistiques. Ces dernières sont généralement formulées selon un format spécifique :

SI (condition(s)) **ALORS** (action(s)).

Grâce à ces règles, il est possible de transformer la stratégie de contrôle élaborée par un expert humain en une stratégie de contrôle automatique parfaitement adaptée aux conditions réelles. Un SIF se compose de quatre blocs distincts :

Les quatre composants essentiels d'un SIF sont les suivants :

- une base de connaissances
- une interface d'entrée pour la fuzzification,
- un moteur d'inférence ou une logique de prise de décision,
- une interface de sortie pour la défuzzification.

Au cœur du SIF se trouve la base de connaissances floue, qui renferme les définitions des fonctions d'appartenance des variables d'entrée/sortie (par exemple gaussiennes ou trapézoïdales), ainsi que les règles d'inférence. La fuzzification joue un rôle clé en convertissant les grandeurs physiques d'entrée du SIF en variables linguistiques manipulables par les inférences.

Grâce à l'engin d'inférence, il est possible de définir la stratégie de contrôle en utilisant les implications floues qui relient les différentes variables de chaque règle. Parmi les mécanismes d'inférence les plus couramment employés, on peut citer le MAX-MIN, le MAX-PROD et le SOM-PROD.

La défuzzification a pour objectif de transformer le résultat des combinaisons de règles en une forme numérique pertinente pour le milieu du processus à contrôler. De nombreuses méthodes de défuzzification sont décrites dans la littérature, mais celle du centre de gravité est la plus couramment employée.[46]

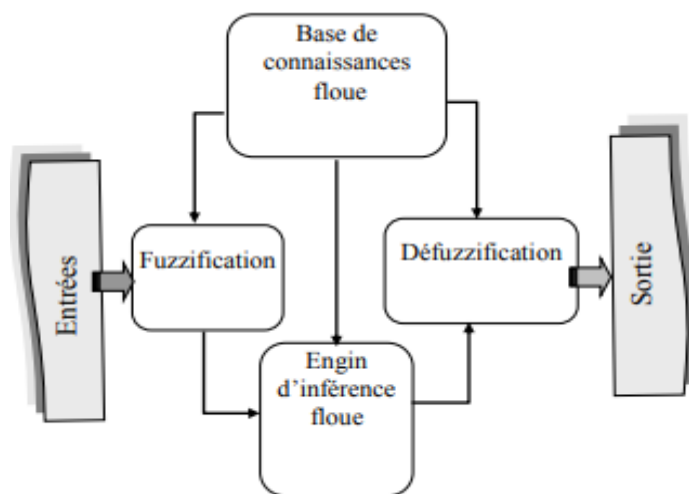


Figure 2.3 : Structure de base d'un SIF.[46]

2.2.3 Les avantages et les inconvénients de la commande par la logique floue

La commande par logique floue présente des avantages et des inconvénients qui doivent être considérés pour déterminer son efficacité dans un contexte donné

Les Avantages :

- Une modélisation mathématique rigoureuse du processus n'est pas nécessaire.
- Intégration des connaissances linguistiques de l'opérateur du processus.

- Maîtrise de processus présentant un comportement complexe, souvent fortement non-linéaire et difficile à modéliser.
- Emploi possible pour des processus rapides grâce à l'utilisation de processeurs dédiés.
- Réduire le temps de développement et de maintenance.
- Définition et conception simplifiées[47]

Les Inconvénients :

- Il n'y a pas de directives claires pour concevoir un réglage, notamment pour choisir les grandeurs à mesurer, déterminer la fuzzification, les inférences et la défuzzification.
- L'approche est souvent artisanale et non systématique, ce qui rend difficile l'implantation des connaissances des opérateurs.
- Il n'est pas possible de garantir la cohérence des inférences a priori, ce qui peut entraîner l'apparition de règles d'inférence contradictoires.[47]

2.3 Le réseau de neurones

2.3.1 Définition

Le réseau neuronal est une méthode d'IA qui utilise des couches de neurones successives.[48]

C'est quoi un réseau de neurones artificiels ?

Un réseau de neurones artificiels est conçu pour imiter la structure du cerveau humain. Il est composé d'au moins deux couches de neurones. Grâce à des données d'apprentissage, ces neurones interagissent pour apprendre à accomplir des tâches. Les réseaux de neurones artificiels peuvent être utilisés dans différents domaines, comme la reconnaissance d'images et la vision par ordinateur, la reconnaissance vocale, ainsi que dans le traitement automatique du langage ou NLP (Naturel Language Processing).[48]

Connections entre les neurones :

Les réseaux de neurones sont constitués de couches qui contiennent des neurones interconnectés avec une fonction d'activation. Les entrées (X_1, X_i, \dots, X_n) sont présentées au réseau via la couche d'entrée et sont transmises aux couches cachées pour un traitement qui utilise des connexions pondérées. Enfin, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S) en utilisant des poids (W_1, W_i, \dots, W_n). Pour connecter les neurones entre eux.[49]

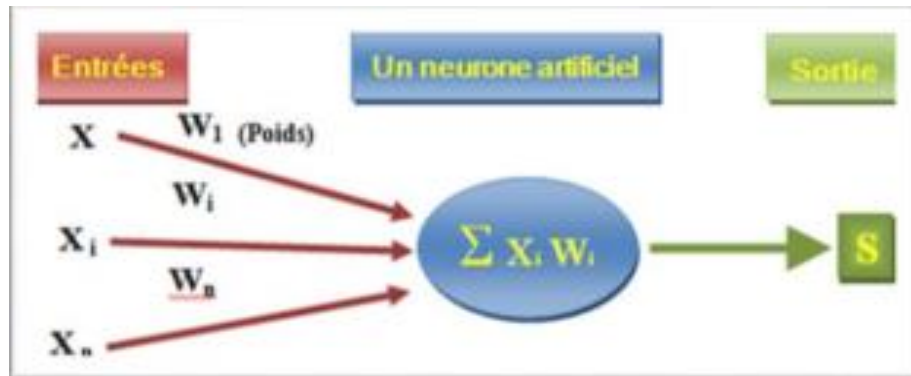


Figure 2.4 : un schéma d'un neurone artificiel.[49]

2.3.2 Structure du réseau neuronal

La structure d'un réseau neuronal est déterminée par le nombre de couches et de neurones dans chaque couche comme illustré dans la figure (5), ainsi que par les poids des connexions entre eux. Les réseaux de neurones artificiels sont constitués de plusieurs couches, chacune contenant plusieurs neurones. Chaque neurone est considéré comme une unité de calcul autonome, et est connecté à tous ou à certains des neurones des couches précédentes en fonction des poids assignés.[49]

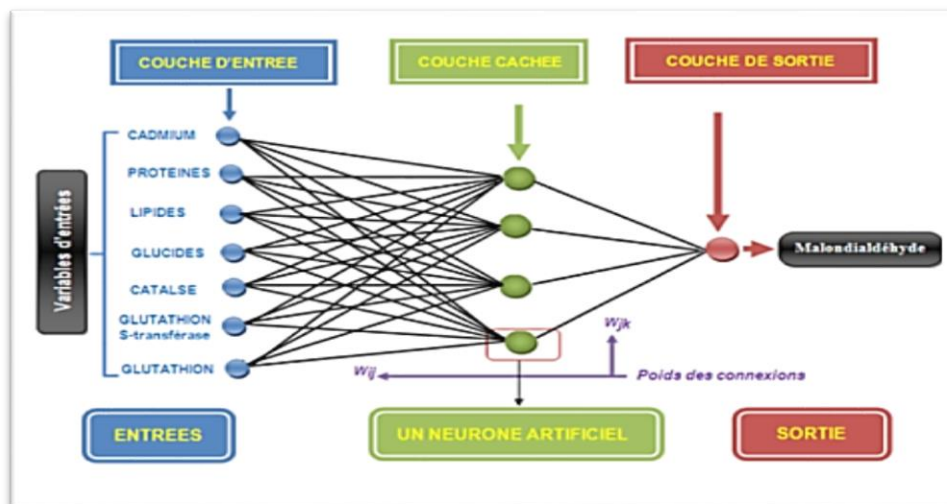


Figure 2.5 : Exemple du modèle RNA à trois couches.[49]

2.3.3 Modes d'apprentissage

Trois méthodes d'acquisition de connaissances sont identifiées : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement.

2.3.3.1 Apprentissage supervisé

Ce mode d'apprentissage implique qu'un professeur ayant une connaissance parfaite de la sortie désirée ou correcte guide le réseau en lui enseignant, à chaque étape, la réponse appropriée. Ainsi, le processus d'apprentissage se déroule en comparant le résultat obtenu à celui souhaité, puis en ajustant les poids des connexions afin de réduire la différence entre les deux.[50]

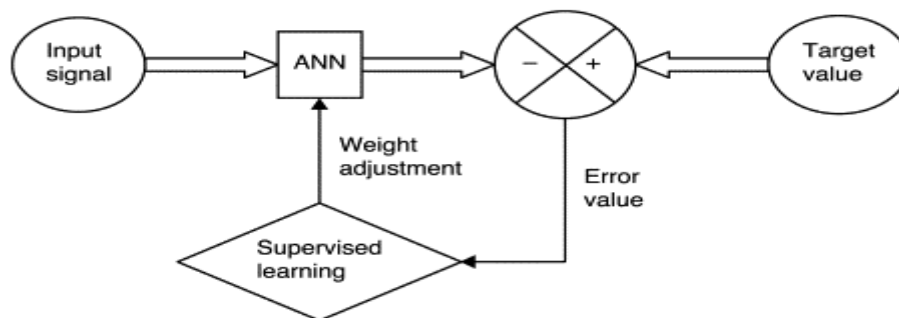


Figure 2.6 : Apprentissage supervisé [51]

2.3.3.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé implique que le réseau ajuste ses paramètres en se basant uniquement sur les informations locales, sans qu'il soit nécessaire de fournir des sorties désirées à l'avance. Ces réseaux, appelés "réseaux à dynamique autonome", agissent comme des détecteurs de régularités en identifiant les schémas récurrents dans les motifs d'entrée et en générant des sorties optimales. En somme, ces méthodes permettent au réseau d'apprendre en détectant les régularités dans la structure des motifs d'entrée sans qu'une supervision explicite soit nécessaire.[50]

2.3.3.3 Apprentissage renforcé :

L'apprentissage par renforcement est utilisé lorsqu'un feedback sur la qualité de la performance est fourni, mais que la conduite souhaitée du réseau n'est pas complètement spécifiée par un professeur. Contrairement à l'apprentissage supervisé, l'apprentissage par renforcement est moins dirigé car il n'implique pas de fournir des exemples d'entrée-sortie pré-étiquetés. Cependant, contrairement à l'apprentissage non supervisé, un signal de renforcement est donné au réseau pour aider à trouver les poids les plus souhaitables lorsque cela est nécessaire. En somme, l'apprentissage par renforcement utilise le feedback pour guider le réseau vers une performance optimale sans imposer une conduite spécifique.[50]

2.3.4 Les fonctions d'activation

Chaque neurone est composé d'une fonction d'activation et d'une valeur de seuil qui détermine la valeur minimale requise pour activer le neurone. Lorsqu'une entrée est reçue, la fonction d'activation est appliquée et la sortie est transmise aux neurones suivants dans le réseau.

Les fonctions d'activation limitent la sortie du neurone à des valeurs spécifiques, généralement comprises entre 0 et 1 ou -1 et +1. Dans la plupart des cas, la même fonction d'activation est utilisée pour tous les neurones dans le réseau, bien que plusieurs fonctions d'activation différentes aient été testées. Parmi les fonctions les plus courantes, on trouve les fonctions étape (step), signe (sign), linéaire (linear) et sigmoïde (sigmoid), chacune ayant des applications spécifiques.

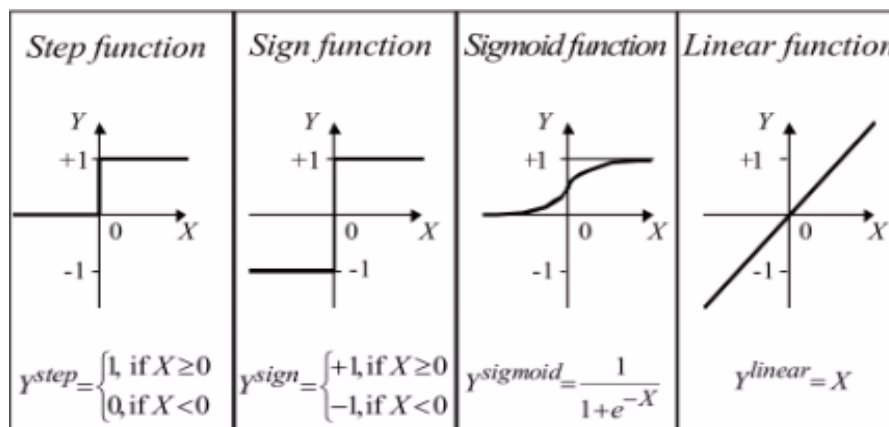


Figure 2.7 : Fonctions d'activation d'un neurone[52]

Par exemple, les fonctions d'activation étape et signe sont souvent utilisées pour la classification et la reconnaissance de motifs, tandis que la fonction sigmoïde est utilisée pour transformer une entrée de valeur infinie en une sortie comprise entre 0 et 1 dans les réseaux de rétro propagation. Enfin, la fonction d'activation linéaire fournit une sortie qui est égale à l'entrée pondérée du neurone, ce qui est souvent utilisé pour l'approximation linéaire.[53]

2.3.5 Les avantages et les inconvénients des réseaux de neurones :

Les avantages :

- Les réseaux de neurones sont capables de représenter n'importe quelle fonction, qu'elle soit linéaire ou complexe.
- La pratique de l'apprentissage et de la construction du modèle est facile.
- Les réseaux de neurones ont une grande capacité d'adaptation au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- Ils sont faciles à manipuler, nécessitant beaucoup moins de travail personnel que l'analyse statistique classique. Il n'est pas nécessaire d'avoir des compétences en mathématiques ou en informatique statistique.

- Les réseaux de neurones ont un comportement plus robuste en cas de faible quantité de données.
- Le concept d'apprentissage des réseaux de neurones est plus facile à comprendre que les complexités des statistiques multi-variables.[47]

Les inconvénients :

- Il n'existe pas de règle universelle pour déterminer la topologie des réseaux de neurones, notamment pour le nombre de couches cachées et de neurones par couche. Pendant l'apprentissage, le problème crucial consiste à trouver un réseau suffisamment grand pour bien apprendre, mais également suffisamment petit pour bien généraliser. Les couches d'entrée et de sortie sont toutefois imposées, car le nombre de neurones qu'elles peuvent contenir dépend du problème à résoudre.
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau de manière aléatoire, ainsi que la détermination précise du taux d'apprentissage, sont deux éléments cruciaux qui ont un impact significatif sur la rapidité de convergence du modèle.
- Les connaissances acquises par un réseau de neurones sont stockées sous forme de valeurs de poids synaptiques. Par conséquent, les réseaux de neurones peuvent être considérés comme des "boîtes noires" où les connaissances sont souvent incompréhensibles pour les utilisateurs.[47]

2.4 L'apprentissage automatique (Machine Learning)

Le domaine de l'apprentissage automatique est fascinant, car il combine plusieurs disciplines telles que les statistiques, l'optimisation, l'algorithmique et le traitement du signal. Il est en constante évolution. Il est devenu omniprésent dans notre société. Bien qu'il soit utilisé depuis plusieurs décennies pour des applications telles que la reconnaissance de caractères et les filtres anti-spam, il est maintenant utilisé pour des tâches plus complexes, telles que la prévention de la fraude bancaire, la recommandation de produits personnalisés, la reconnaissance faciale et la traduction automatique de textes. L'objectif principal de l'apprentissage automatique est de programmer les ordinateurs pour qu'ils puissent résoudre des problèmes en utilisant des exemples de données ou des expériences passées.[54]

2.4.1 Types d'apprentissage automatique :

On peut catégoriser les systèmes d'apprentissage automatique selon leur degré de supervision durant leur phase de formation. En effet, il existe quatre catégories principales : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé, l'apprentissage semi-supervisé et l'apprentissage par renforcement. La nature et la quantité de la supervision sont donc des éléments clés pour différencier ces différentes méthodes d'apprentissage automatique.[55]

2.4.1.1 Apprentissage supervisé

Lorsque l'on utilise l'apprentissage supervisé, les données d'apprentissage fournies à l'algorithme contiennent les résultats attendus, désignés sous le terme d'étiquettes

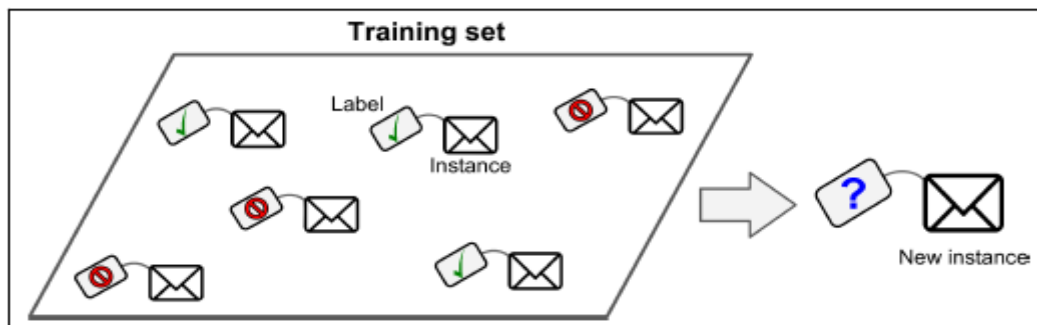


Figure 2.8 : Un ensemble de formation étiqueté pour l'apprentissage supervisé (La classification des spam)[55]

La classification est une tâche courante de l'apprentissage supervisé, comme illustré par l'exemple du filtre anti-spam qui doit être entraîné avec de nombreux exemples d'e-mails associés à leur classe (spam ou ham) afin de classer les nouveaux courriers électroniques. Une autre tâche fréquente est la régression, qui consiste à prédire une valeur numérique cible, comme le prix d'une voiture, à partir d'un ensemble de caractéristiques, telles que le kilométrage, l'âge ou la marque. Pour entraîner un système à effectuer cette tâche, il est nécessaire de lui fournir de nombreux exemples de voitures, comprenant à la fois les prédicteurs et les étiquettes correspondant aux prix.

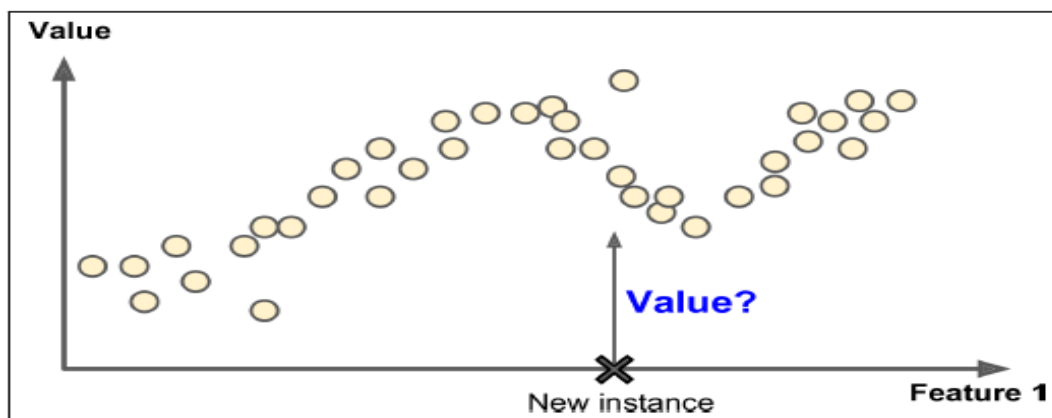


Figure 2.9 : La régression.[55]

Il convient de souligner que certains algorithmes de régression peuvent être adaptés pour effectuer de la classification, et inversement. Un exemple serait l'utilisation courante de la régression logistique pour la classification, grâce à sa capacité à fournir une estimation de la probabilité d'appartenance à une classe spécifique (comme une probabilité de 20 % d'être un spam).

Parmi les plus importants algorithmes on peut citer :

- k-plus proches voisins.
- Régression linéaire.
- Régression logistique.
- Machines à vecteurs de support (SVM).
- Arbres de décision et forêts aléatoires.
- Réseaux de neurones.[55]

2.4.1.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé et l'apprentissage supervisé sont deux problèmes conceptuellement distincts. En effet, en apprentissage non supervisé, il est impossible de réaliser une régression car les sorties ne sont connues pour aucun point de données, empêchant ainsi la déduction de la fonction. Indépendamment, le classement est possible dans ce cas. L'objectif de la classification est d'identifier les similarités entre les entrées appartenant à la même classe, sans informations sur les classes sont correctes. Si l'algorithme est capable d'exploiter ces similarités pour regrouper les entrées similaires, il peut effectuer une classification automatiquement. Par conséquent, l'apprentissage non supervisé vise à découvrir les clusters d'entrées dans les données sans être informé de la classe de chaque point de données. L'algorithme doit ainsi découvrir les similarités pour lui-même.[56]

K-Means Clustering :

K-means est un algorithme d'apprentissage non supervisé simple qui résout le problème de clustering. Il suit une méthode facile pour classer un ensemble de données en un certain nombre de clusters en définissant k centres pour chaque cluster. Le placement des centres est crucial car cela affecte le résultat. Il est préférable de les placer le plus loin possible. Ensuite, chaque point est associé au centre le plus proche. Lorsque tous les points ont été traités, la première étape est terminée et un premier groupe est formé. Pour la prochaine étape, k nouveaux centres sont calculés comme le centre de gravité des clusters résultants de la marche précédente.[57]

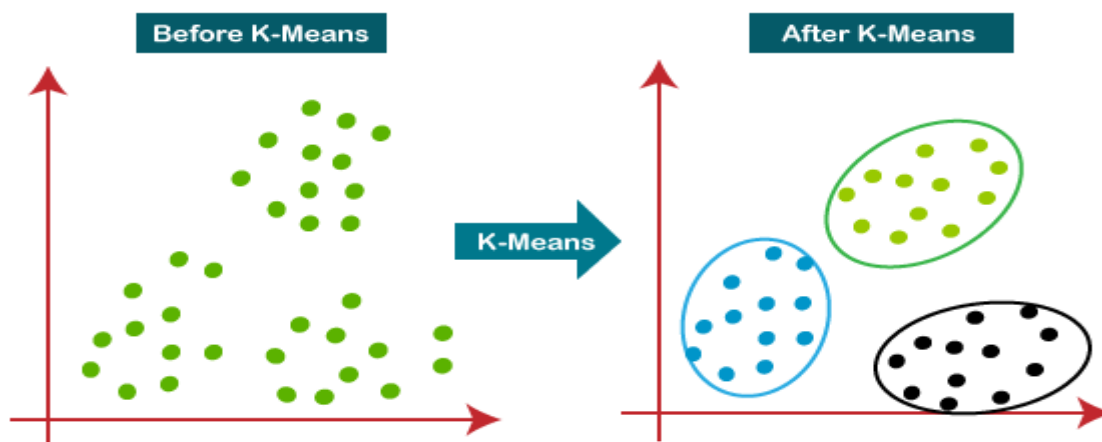


Figure 2.10 : Clustering K-Means [58]

2.4.1.3 L'apprentissage semi supervisé

L'apprentissage automatique semi-supervisé combine des méthodes d'apprentissage automatique supervisé et non supervisé, ce qui peut être particulièrement utile dans les domaines de l'apprentissage automatique et de l'exploration de données où les données non étiquetées sont déjà disponibles et l'obtention de données étiquetées est un processus fastidieux. Contrairement aux méthodes courantes d'apprentissage automatique supervisé, qui consistent à entraîner un algorithme sur un jeu de données « labellisé » où chaque enregistrement contient des informations sur les résultats, les algorithmes d'apprentissage semi-supervisés peuvent exploiter à la fois les données étiquetées et non étiquetées pour améliorer la performance de l'algorithme. Certains exemples d'algorithmes d'apprentissage semi-supervisés sont présentés ci-dessous :[57]

Transductif SVM :

Les machines à vecteurs de support transductifs (TSVM) ont été largement employées comme méthode pour traiter des données partiellement étiquetées dans le cadre de l'apprentissage semi-supervisé. Elles ont suscité de la perplexité, car leur fondement en termes de généralisation n'est pas bien compris. Les TSVM servent à étiqueter les données non étiquetées de manière à maximiser la marge entre les données étiquetées et celles qui ne le sont pas. Toutefois, résoudre le problème exactement avec des TSVM est un problème NP-difficile.[57]

Modèles Génératifs :

Un modèle génératif est capable de produire des données. Il modélise à la fois les caractéristiques et la catégorie (c'est-à-dire les données). En modélisant $P(x, y)$, il est possible d'utiliser cette distribution de probabilité pour générer des points de données, ce qui rend tous les algorithmes modélisant $P(x, y)$ génératifs. La confirmation de la distribution de mélange requiert un exemple étiqueté par composant.[57]

Auto entraînement :

L'auto-entraînement consiste à former un classificateur en utilisant une partie des données déjà étiquetées. Ensuite, le classificateur est nourri avec des données non étiquetées, et les points non étiquetés sont associés aux étiquettes prédites pour former un ensemble d'entraînement. Cette procédure est répétée plusieurs fois. Le nom "auto-entraînement" vient du fait que le classificateur apprend de lui-même.[57]

2.4.1.4 L'apprentissage par renforcement :

Le renforcement d'apprentissage (RL) est une méthode d'apprentissage qui se concentre sur la prise de décision. En utilisant une politique (π), l'agent choisit une action (A) à partir de l'état (S) de l'environnement. L'objectif de l'apprentissage par renforcement est d'optimiser la politique d'action (π) de l'agent en utilisant des récompenses positives et négatives. Étant donné que l'apprentissage nécessite de nombreuses expérimentations, disposer d'un environnement simulé est très utile, voire indispensable. Les jeux vidéo, qui offrent un environnement simulé avec des récompenses (comme le score), sont un choix courant pour l'apprentissage par renforcement. Depuis 2018, le logiciel MuZero de DeepMind (une société rachetée par Google) a montré le potentiel de l'apprentissage par renforcement sans jeu de données préalable pour être le meilleur au jeu de Go et à de nombreux jeux vidéo.

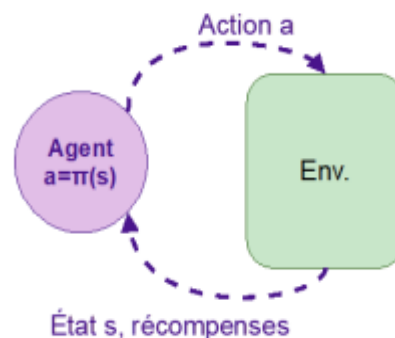


Figure 2.11: Schéma d'interaction entre l'agent et son environnement[59]

Cette ressource ne prétend pas être exhaustive sur le sujet, mais elle fournira une présentation de l'environnement des processus markoviens, dans lequel s'inscrit l'apprentissage par renforcement. Ensuite, elle expliquera en détail l'un des algorithmes d'apprentissage les plus simples, le Q-learning tabulaire. Enfin, elle abordera l'apprentissage par renforcement profond, dans lequel la politique d'action est dérivée d'un réseau de neurones, en utilisant à nouveau l'un des algorithmes les plus simples, le Deep Q-learning.[59]

2.5 L'apprentissage profond (Deep Learning)

Le DL est une méthode particulière de ML qui se concentre sur l'apprentissage de représentations en utilisant des couches successives de plus en plus significatives. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'adjectif "profond" dans l'expression "apprentissage profond" ne se rapporte pas à une compréhension plus approfondie, mais plutôt au nombre de couches dans un modèle, que l'on appelle la profondeur. D'autres termes appropriés pourraient être "apprentissage de représentations en couches" ou "apprentissage de représentations hiérarchiques". Le DL utilise des réseaux de neurones constitués de nombreuses couches de représentations pour apprendre automatiquement à partir des données d'apprentissage. En revanche, d'autres approches de ML se concentrent sur une ou deux couches de représentations, ce qui les qualifie de "non profondes". Les réseaux de neurones sont structurés en couches juxtaposées pour apprendre ces représentations en couches dans le cadre du DL.[54]

2.5.1 Les modèles d'apprentissage profond

Les chercheurs ont développé plusieurs modèles d'apprentissage en profondeur qui sont utilisés dans différents domaines. Bien que chaque modèle soit conçu pour résoudre des problèmes spécifiques, ils partagent tous une caractéristique commune : des niveaux d'apprentissage multiples. Cette section donnera un aperçu succinct des modèles d'apprentissage en profondeur les plus couramment utilisés.[60]

2.5.1.1 Réseau neuronal profond (Deep Neural network)

Le réseau de neurones profond est une variante d'un réseau neuronal artificiel feed-forward multicouche qui comprend plusieurs couches cachées entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Chaque couche cachée contient un nombre similaire de neurones, qui est initialement fixé au hasard et ajusté manuellement pendant la formation du réseau. Le choix du nombre de nœuds dans les couches cachées est crucial car une augmentation de ce nombre peut entraîner une complexité accrue et une diminution de la performance de formation. Cette architecture permet de modéliser des relations non linéaires complexes dans les données d'apprentissage en utilisant une composition en couches de primitives. Les couches cachées supplémentaires permettent la composition d'entités à partir des couches inférieures, ce qui peut potentiellement modéliser des données complexes avec moins d'unités. Cependant, les réseaux de neurones profonds sont sujets au problème de surajustement et au temps de calcul accru. Pour éviter le surajustement, des méthodes de régularisation telles que la perte de poids ou la rareté peuvent être utilisées pendant la formation, tandis que des ensembles de formation plus importants peuvent également aider à surmonter ce problème. Le temps de calcul dépend de plusieurs paramètres, notamment la taille de la couche, le taux d'apprentissage et les poids initiaux, et doit être soigneusement considéré lors de la sélection de ces paramètres. La figure 12 représente une architecture typique d'un réseau neuronal profond :[60]

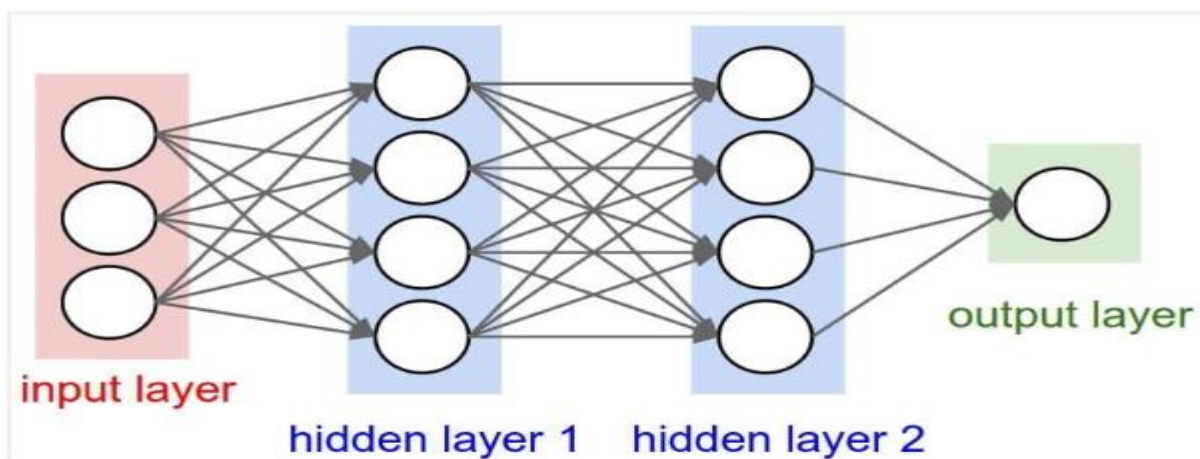


Figure 2.12: Deep Neural Network [61]

2.5.1.2 Réseau de neurones convolutifs (Convolutional Neural Network)

Le réseau neuronal convolutif est un type de réseau neuronal qui utilise l'opération de convolution pour permettre à ses neurones de couvrir les unités adjacentes à l'intérieur du noyau de convolution. Cela le rend très efficace pour le traitement d'images volumineuses. En général, un réseau neuronal convolutif se compose d'une ou plusieurs couches convolutionnelles, d'une couche entièrement connectée et d'une couche de regroupement pour l'intégration. Comparé à d'autres réseaux neuronaux profonds, il nécessite moins de paramètres et donne de meilleurs résultats en termes de reconnaissance d'images et de parole. En raison de ces avantages, les réseaux de neurones convolutifs sont largement utilisés dans l'apprentissage en profondeur. Voici une brève présentation de la structure de base d'un réseau neuronal convolutif.[62]

1. Couche convolutive (Convolutional layer) :

Le réseau de neurones convolutif utilise plusieurs noyaux de convolution dans la couche convolutive pour produire plusieurs cartes de caractéristiques correspondant à chaque noyau. Cette opération présente plusieurs avantages :

- Le partage des poids réduit le nombre de paramètres.
- La connectivité locale permet de prendre en compte les caractéristiques des pixels adjacents lors du traitement des images.
- La position de l'objet sur l'image n'a pas d'impact sur la reconnaissance d'image.

Grâce à ces avantages, il est parfois possible d'utiliser une couche convolutive plutôt qu'une couche entièrement connectée, ce qui accélère le processus d'apprentissage.[62]

2. Couche de mutualisation (Pooling layer) :

Après la convolution pour obtenir les caractéristiques, notre objectif est d'utiliser ces dernières pour la classification. Cependant, les données générées peuvent être très volumineuses et entraîner un surapprentissage. Pour éviter cela, nous agrégeons les statistiques des caractéristiques à différents endroits. Cette agrégation est appelée mise en commun. Dans les réseaux de neurones convolutifs, la couche de regroupement est utilisée pour filtrer les caractéristiques obtenues après la convolution de l'image, afin d'améliorer la performance de la classification.[62]

3. Couche entièrement connectée (Fully connected layer) :

Une fois que la couche de regroupement a été suivie par la couche entièrement connectée, celle-ci a pour fonction d'extraire la carte des caractéristiques dans un vecteur unidimensionnel. La couche entièrement connectée fonctionne de manière similaire à un réseau neuronal traditionnel et constitue environ 90% des paramètres du réseau neuronal convolutif. Ce vecteur de longueur fixe peut être utilisé pour attribuer une classe particulière à une image ou comme vecteur de caractéristiques dans les étapes suivantes du processus. En somme, la couche entièrement connectée permet de cartographier le réseau neuronal convolutif vers l'avant en un vecteur de longueur fixe.[62]

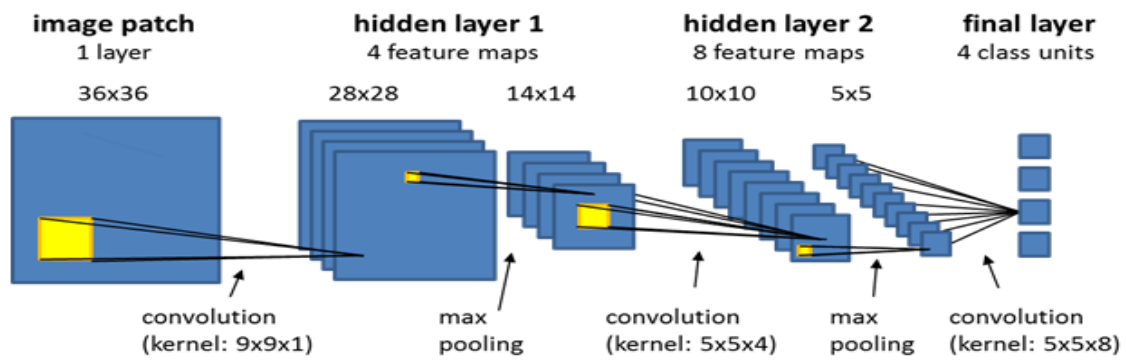


Figure 2.13 : Réseau de neurones convolutifs [63]

2.5.1.3 Réseaux de croyances profondes (Deep Belief Networks)

Les réseaux de croyances profondes sont des réseaux de neurones composés de plusieurs couches de machines Boltzmann restreintes. Ces réseaux sont limités à une couche visible et une couche cachée, où des connexions sont formées entre les couches. Les unités cachées sont entraînées pour capturer les corrélations de données d'ordre supérieur observées au niveau des unités visibles. La préformation initiale a lieu de manière non supervisée et gourmande en calcul, couche par couche, pour obtenir des poids génératifs, permis par la divergence contrastive de Hinton. L'apprentissage se fait par échantillonnage de Gibbs, où un vecteur est présenté aux unités visibles qui transmettent les valeurs aux unités masquées pour tenter de reconstruire l'entrée d'origine. Chaque couche ajoutée améliore la probabilité logarithmique des données d'entraînement, ce qui augmente la vraie représentation du réseau. Cette expansion significative, associée à l'utilisation de données non étiquetées, est un élément clé de toute application d'apprentissage en profondeur. Les deux couches supérieures sont liées pour que la couche supérieure puisse s'associer à son contenu de mémoire. Un DBN peut être affiné pour améliorer les performances discriminatives en utilisant des données étiquetées à travers la rétropropagation. Les réseaux de neurones formés avec la rétropropagation ont souvent des performances inférieures à celles des DBN.[64]

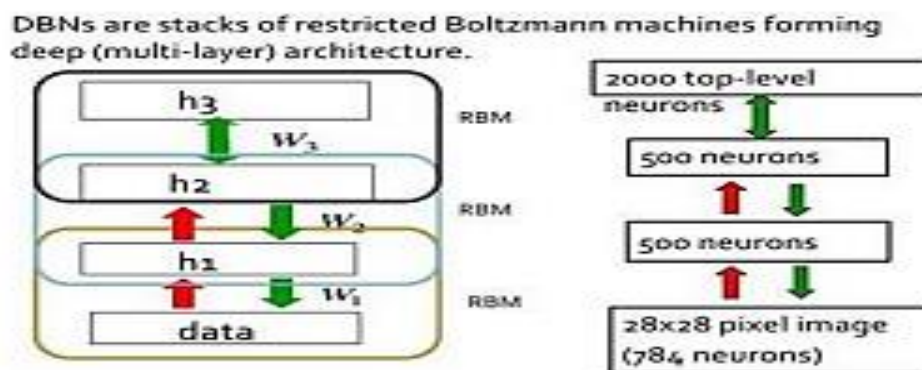


Figure 2.14 : L'architecture de Réseaux de croyances profondes (DBN).[64]

2.6 Comparaison entre l'apprentissage machine et l'apprentissage profond

Au fil des années, l'application de l'apprentissage automatique s'est considérablement développée dans sa capacité à gérer de grandes quantités de données, et est maintenant largement utilisée dans la vie de tous les jours. Cette technologie alimente de nombreux aspects de notre interaction quotidienne, tels que le filtrage des spams et du contenu sur les réseaux sociaux, les recommandations sur les sites de commerce électronique, et elle est de plus en plus présente dans les produits grand public tels que les appareils photo et les smartphones, la reconnaissance vocale comme Siri d'Apple et la reconnaissance de l'écriture manuscrite, également connue sous le nom de reconnaissance optique de caractères. Les principales distinctions entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage en profondeur sont exposées dans les paragraphes suivants :[65]

1. Dépendances des données (Data dependencies) :

Lorsque les données sont à grande échelle, il y a une variation significative des performances entre l'apprentissage en profondeur et l'apprentissage automatique traditionnel. En effet, les algorithmes d'apprentissage profond ne sont pas efficaces avec de petites quantités de données car ils nécessitent une quantité importante de données pour une compréhension parfaite. À l'inverse, les algorithmes d'apprentissage automatique traditionnels basés sur des règles artisanales peuvent fonctionner correctement même avec de petites quantités de données. La figure 15 montre comment les techniques de science des données évoluent-elles avec la quantité de données :[65]

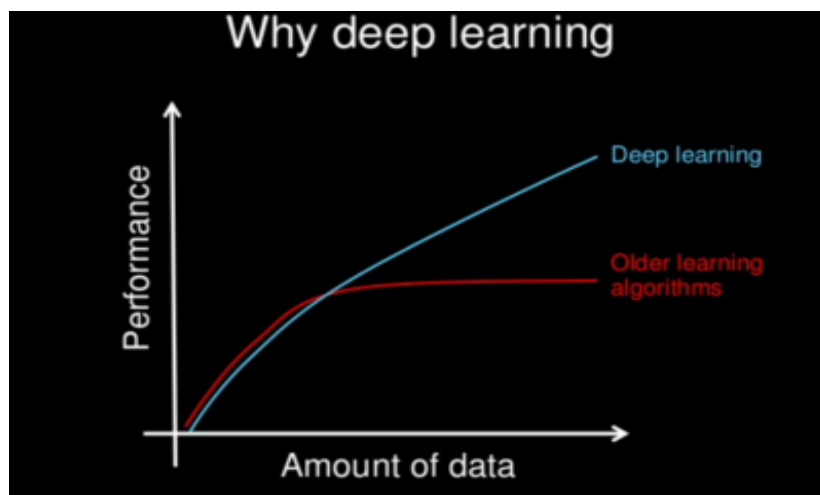


Figure 2.15 : l'évolution des performances en fonction de la quantité de données.[65]

2. Dépendances matérielles (Hardware dependencies) :

Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent s'exécuter efficacement sur des machines peu puissantes grâce à l'intégration de GPU qui effectuent automatiquement un grand nombre d'opérations de multiplication matricielle. En revanche, les algorithmes d'apprentissage en profondeur sont plus dépendants de machines haut de gamme.[65]

3. Extraction de caractéristiques (Feature extraction) :

L'extraction de caractéristiques est une étape importante dans l'apprentissage automatique qui consiste à intégrer des connaissances spécifiques du domaine pour simplifier les données et améliorer les performances des modèles. Cependant, cette tâche est souvent coûteuse et nécessite une expertise approfondie. L'apprentissage en profondeur est une technique qui permet d'extraire automatiquement des caractéristiques de haut niveau à partir des données brutes, ce qui peut simplifier considérablement le processus de développement des modèles.[65]

4. Approche de résolution de problèmes (Problem Solving approach) :

En apprentissage automatique, la résolution de problèmes nécessite souvent de diviser le problème en plusieurs parties à résoudre individuellement avant de les combiner pour obtenir un résultat. En revanche, l'apprentissage en profondeur résout le problème de bout en bout, c'est-à-dire en une seule étape. Par exemple, pour la détection d'objets dans une image, une approche typique de l'apprentissage automatique nécessiterait deux étapes distinctes, la détection d'objets suivie de la reconnaissance d'objets, tandis qu'en utilisant l'apprentissage en profondeur, le processus peut être effectué en une seule étape.[65]

5. Temps d'exécution (Execution Time) :

En apprentissage en profondeur, le grand nombre de paramètres entraîne une longue durée d'entraînement. L'algorithme de pointe ResNet peut prendre environ deux semaines pour les débutants. En revanche, l'apprentissage automatique nécessite comparativement moins de temps pour s'entraîner, allant de quelques secondes à quelques heures. En ce qui concerne le temps de test, l'apprentissage en profondeur est plus rapide que certains algorithmes d'apprentissage automatique, tels que le k-plus proches voisins, dont le temps de test augmente avec la taille des données. Cependant, certains algorithmes d'apprentissage automatique ont également des temps de test courts.[65]

6. Interprétabilité (Interpretability) :

L'interprétabilité est un facteur crucial pour comparer l'apprentissage automatique et en profondeur, car l'interprétation des résultats est encore difficile en apprentissage en profondeur. Par exemple, un modèle de notation automatisée basé sur l'apprentissage en profondeur peut donner une performance excellente, mais il est difficile de savoir comment le score a été attribué. En revanche, les algorithmes d'apprentissage automatique tels que les arbres de décision fournissent des règles explicites pour comprendre les résultats, ce qui les rend plus faciles à interpréter. En conséquence, les algorithmes d'interprétabilité tels que les arbres de décision et la régression linéaire/logistique sont largement utilisés dans l'industrie.[65]

2.7 Les applications de l'intelligence artificielle :

- Concevoir des éléments mécaniques en respectant les limites de taille.
- Diagnostiquer les systèmes électroniques de locomotion.
- Utiliser dans les systèmes électroniques et électrochimiques.
- Diagnostiquer le processus de développement logiciel.
- Identifier des structures et composés chimiques.
- Utiliser dans le diagnostic médical.
- Planifier des expériences en biologie, chimie et génétique moléculaire.
- Faire un portefeuille d'actions et d'obligations pour la sélection et la gestion.
- Dépanner des systèmes.
- Planifier et explorer l'espace.
- Prévoir les dommages aux cultures.
- Développer des usines et industries complètement automatisées[42]

2.8 Les avantages et les inconvénients

Les avantages :

- Il est possible de réduire le travail humain en remplaçant les travailleurs par des machines, ce qui permet aux humains de se consacrer à d'autres tâches, Les travaux tels que la programmation, l'auto-écriture et l'auto-modification peuvent libérer l'homme d'un fardeau grâce à l'intelligence artificielle.
- L'intelligence artificielle peut être considérée comme une main-d'œuvre peu coûteuse qui permet d'effectuer le travail rapidement et d'augmenter les bénéfices.
- De plus, l'intelligence artificielle peut être facilement déployée, les machines ne nécessitant ni pauses ni rafraîchissements comme les êtres humains.
- Les machines peuvent également être reprogrammées pour travailler de manière constante sans se fatiguer ni s'ennuyer.
- Les domaines de la robotique et de l'intelligence artificielle peuvent être utilisés dans des activités telles que l'exploitation minière et l'exploration de combustibles pour sauver des vies humaines.
- L'utilisation de l'intelligence artificielle peut être étendue aux industries et aux entreprises.
- L'utilisation de l'IA en combinaison avec d'autres technologies permettra aux machines de prendre des décisions et d'agir plus rapidement que les humains. Contrairement à l'homme, qui doit tenir compte de nombreux facteurs à la fois émotionnellement et pratiquement pour prendre une décision, la machine alimentée par l'IA fonctionne en fonction de sa programmation et fournit des résultats plus rapidement.[66]

Les inconvénients :

- La création de machines est difficile en raison du coût élevé des équipements nécessaires.
- Les réparations robotiques peuvent réduire le temps et la nécessité de faire intervenir des humains, mais elles sont coûteuses en termes de ressources.
- Les robots qui remplacent les emplois peuvent causer un chômage massif, à moins que les humains ne trouvent des emplois qui ne peuvent pas être remplacés par l'IA ou ne changent de système politique.
- Les machines peuvent causer des destructions si elles sont utilisées à mauvais escient, ce qui nécessite une certaine réglementation humaine.
- L'utilisation de l'IA pour automatiser le travail peut rendre les humains paresseux et dépendants, ce qui peut être préjudiciable pour les générations futures.
- Bien que les machines soient plus efficaces dans certaines tâches, elles ne peuvent pas remplacer les relations humaines nécessaires pour construire une équipe.
- Les machines ont des limites et ne peuvent pas effectuer des tâches pour lesquelles elles ne sont pas programmées, ce qui peut causer des problèmes si elles sont utilisées de manière inappropriée.[66]

2.9 Etat de l'art

Le tableau suivant montre quelques exemples des réalisations grâce à l'IA dans les dernières années :

Tableau 2.1 : quelques exemples de réalisations grâce à l'intelligence artificielle.

Les chercheurs	Année	réalisation	La méthode utilisée
Karen Simonyan et Andrew Zisserman	2015	Classification d'images	Réseau de neurones convultifs
Diuqar Uqar	2017	Contrôle MPPT d'un système d'énergie renouvelable	La logique floue
Yan Lecun	2018	Détection d'objets	Réseau de neurones convultifs
Alex krizhevsky	2022	Analyse d'images médicales	Réseau de neurones convultifs
Open Ai	2020	Système de langage (Chat GPT)	L'apprentissage profond

2.10 Conclusion

En résumé, la logique floue, les réseaux de neurones, l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond sont des techniques clés de l'intelligence artificielle, largement utilisées dans de nombreux domaines pour la reconnaissance de motifs, la classification de données, la prédiction et l'analyse de données, ainsi que pour la résolution de problèmes complexes. Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, la logique floue est une technique particulièrement pertinente pour la gestion de batteries, en raison de sa capacité à traiter de manière flexible et adaptative les données incertaines et imprécises.

Dans le prochain chapitre, nous verrons les possibilités d'intégrer la logique floue dans la gestion d'une batterie d'un système d'énergie photovoltaïque.

CHAPITRE 3

***Architecture Proposé Et
Démarche Expérimentale***

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons choisir la logique floue comme méthode de l'IA et l'énergie photovoltaïque comme une problématique. L'intégration de la logique floue dans la gestion d'une batterie d'un système d'énergie photovoltaïque présente un potentiel significatif pour améliorer l'efficacité et l'optimisation de ces systèmes. Les fluctuations naturelles de la production d'énergie solaire peuvent entraîner des variations dans la demande et la production d'énergie, nécessitant une gestion précise de la batterie pour maintenir un équilibre. Dans ce chapitre, nous proposons une architecture basée sur la logique floue pour la gestion de la batterie, et nous procédons à des expérimentations pour évaluer son efficacité. Cette approche flexible et adaptative permettra d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire disponible et de répondre de manière adéquate aux besoins énergétiques.

3.2 Problématique

Comment l'intégration de la logique floue dans la gestion des batteries photovoltaïques peut-elle améliorer l'efficacité énergétique, optimiser l'utilisation des ressources disponibles et répondre de manière flexible aux besoins des utilisateurs, tout en surmontant les défis techniques tels que la modélisation précise des variables floues, la gestion des incertitudes liées aux prévisions météorologiques ?

3.3 Batterie lithium-ion photovoltaïque

Définition : Une batterie lithium-ion est une batterie rechargeable qui utilise des ions lithium comme chargeurs, lesquels se déplacent de l'anode vers la cathode lors de la décharge et dans le sens inverse lors de la recharge.[67]



Figure 3.1 : batterie lithium-ion photovoltaïque (marque BASEN)

3.3.1 Caractéristique des batteries au lithium-ion

- Longue durée de vie : Durée de vie 2 à 3 fois supérieure au plomb.[68]
- Résistance aux décharges profondes ou partielles : Les batteries au lithium surpassent les autres types de batteries en termes de résistance aux décharges profondes ou partielles.[68]
- Taille et poids réduits : Les batteries au lithium se distinguent également par leur taille et leur poids réduits par rapport à d'autres batteries .[68]
- Haute capacité de charge et de décharge : Les batteries au lithium offrent des courants de charge et de décharge élevés.[69]

-Densité d'énergie élevée : Les batteries au lithium possèdent une densité d'énergie élevée, ce qui signifie qu'elles fournissent une puissance supérieure pour un poids réduit.[69]

3.4 Architecture Proposé

Les entrées :

1. Température ambiante de la batterie (Te) : L'influence de la température sur les processus électrochimiques à l'intérieur de la cellule est considérable, ce qui affecte directement les performances générales de la batterie et son vieillissement. Les taux de réaction augmentent de manière exponentielle à mesure que la température augmente.[70]

2. Ensoleillement(Es) : L'ensoleillement, également connu sous le nom de quantité d'énergie solaire atteignant une surface spécifique, comme la surface de la Terre [71] [72], peut être exploité pour générer de l'électricité grâce à l'utilisation de panneaux solaires photovoltaïques.[72] [73]

3. Charge de la batterie(Cb) : La charge de la batterie, mesurée en pourcentage de sa capacité totale, correspond à l'énergie électrique stockée à un moment donné [74]. Elle revêt une importance cruciale, car elle détermine l'autonomie de l'appareil alimenté par cette batterie [75]. En effet, plus la charge de la batterie est élevée, plus l'appareil peut fonctionner longtemps avant de nécessiter une recharge. Pour mesurer précisément la charge de la batterie, on peut utiliser un algorithme d'état de charge qui emploie des méthodes telles que la coulométrie pour évaluer le pourcentage d'énergie résiduelle[74]. Par ailleurs, des systèmes de gestion de batterie informatisés sont également disponibles pour surveiller et réguler la charge de la batterie.[76]

Les sorties :

1. Quantité d'énergie (Qe) : La mesure de la quantité d'énergie stockée dans une batterie s'exprime en watt-heures (Wh) ou en ampères-heures (Ah). Plusieurs facteurs influencent la quantité d'énergie prélevée d'une batterie, notamment sa capacité, sa tension, le courant de décharge, la température et sa durée de vie.[77]

2. Niveau de remplissage d'une batterie (Nr) : Le niveau de remplissage d'une batterie fait référence à la quantité d'énergie stockée dans celle-ci, exprimée en pourcentage de sa capacité totale. Il indique la quantité de puissance disponible et le temps restant avant que la batterie ne doive être rechargée. Une estimation précise de l'état de charge est importante pour une gestion et un contrôle efficaces de la batterie.[78] [79]

3. Durée de vie de la batterie(Dv) : La durée de vie d'une batterie lithium-ion est évaluée en fonction du nombre de cycles de charge et de décharge qu'elle peut supporter. Un cycle complet se compose d'une charge complète suivie d'une décharge complète. À mesure que le nombre de cycles augmente, la capacité de la batterie diminue progressivement. La durée de vie d'une batterie lithium-ion peut varier considérablement en fonction des conditions d'utilisation, notamment la température, le taux de charge et le taux de décharge.[80]

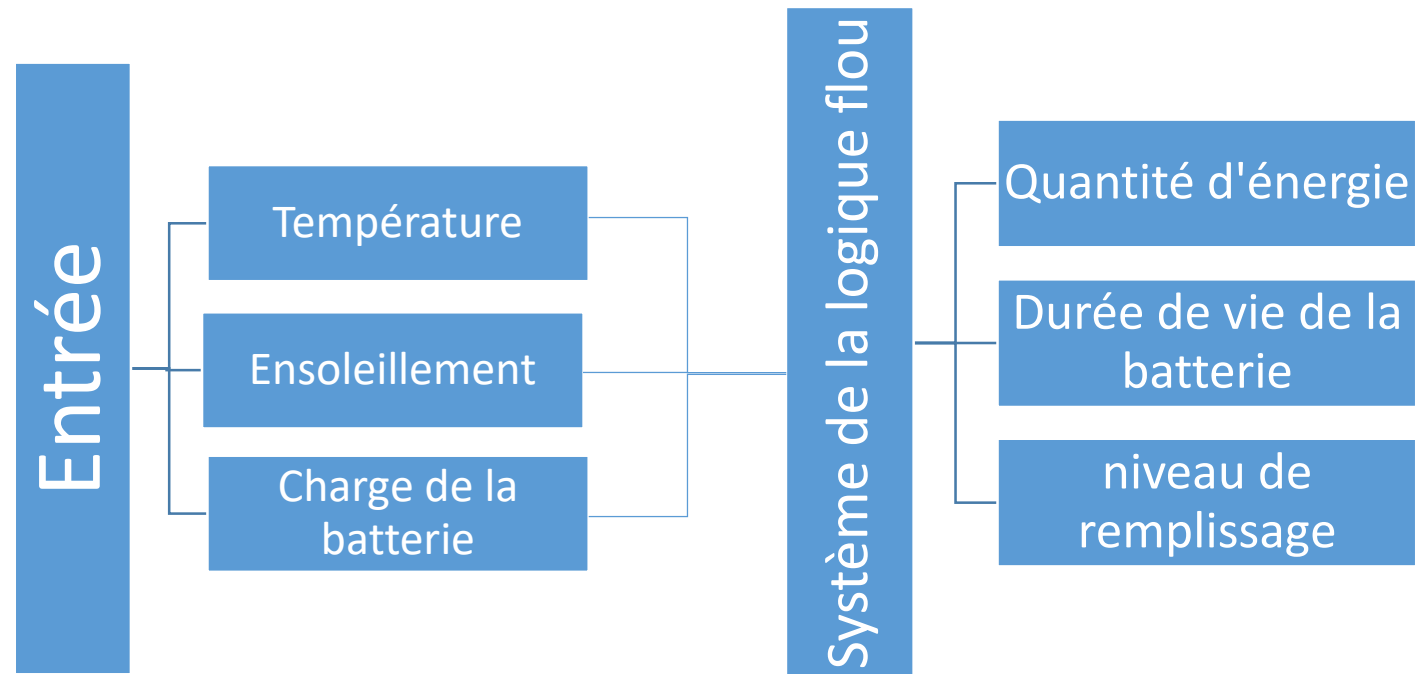


Figure 3.2 : Architecture proposé

MATLAB :

MATLAB est un langage de programmation avancé et un environnement interactif largement utilisé dans les domaines du calcul numérique, de la visualisation et de la programmation. Il est couramment employé dans les secteurs de l'ingénierie, des sciences et des mathématiques pour des tâches telles que l'analyse de données, la simulation et la modélisation. MATLAB offre une gamme variée de fonctions intégrées et de boîtes à outils pour différentes applications, notamment le traitement du signal, le traitement d'images, les systèmes de contrôle et l'optimisation.

MATLAB est reconnu pour sa simplicité d'utilisation et son caractère interactif, ce qui permet aux utilisateurs de prototyper et de tester rapidement leurs idées. Il bénéficie également d'une vaste communauté d'utilisateurs actifs qui partagent du code et offrent leur soutien via des forums et d'autres ressources. [81]

3.5 Implémentation du système (SIF) par l'interface graphique

- Utilisez la commande fuzzy pour ouvrir l'interface graphique FIS Editor.
- Dans cette interface, vous pouvez définir entièrement votre système flou.
- Par défaut, l'interface propose une entrée et une sortie avec la méthode de Mamdani.
- Les opérateurs ET et OU sont respectivement réalisés par le min et le max.
- L'implication se fait par le min, l'agrégation des règles par le max et la défuzzification par la méthode du centre de gravité (centroid).
- Dans la fenêtre FIS Editor : Untitled ouverte par la commande fuzzy, utilisez l'option (Add input ou output) du menu Edit pour ajouter d'autres variables d'entrée et sortie.
- Pour chaque variable d'entrée ou de sortie sélectionnée à la souris, spécifiez un nom et choisissez entre les méthodes "max-min".
- En double-cliquant sur une variable, une fenêtre d'édition des fonctions d'appartenance s'ouvre.
- Dans cette fenêtre, vous pouvez choisir le nombre et le type de fonctions, ainsi que l'intervalle de valeurs pour cette variable.
- Sélectionnez chaque fonction d'appartenance à la souris et attribuez-lui un nom qui sera utilisé dans les règles floues.
- Une fois que toutes les variables d'entrée et de sortie sont complètement définies, ouvrez la fenêtre "Rule Editor" en utilisant l'option "Edit rules" du menu "View".
- Chaque règle peut être pondérée par un coefficient écrit entre parenthèses à la fin de la règle (par défaut, le coefficient vaut 1).
- Pour valider une règle, appuyez simultanément sur "add rule".

3.6 Structure du système d'inférence flou (SIF)

Nous avons choisi, un système d'inférence flou de type Mamdani avec trois variables à l'entrée (Te, Es, Cb) et trois variable à la sortie (Qe, Dv, Nr). La figure 3.3 montre le schéma bloc de notre système.

Nous avons ajouté des règles qui permettent de définir la relation entre les prémisses et la conséquence en fonction des variables floues résultants de la fuzzification.

Nous avons choisi un mécanisme d'inférence floue qui fonctionne avec les méthodes apparaissant sur la figure et qui doit conduire à des valeurs de les variables de les sorties. Ces méthodes sont :

- And method : méthode utilisée pour l'opérateur ET (min)
- Or method : méthode utilisée pour l'opérateur OU (max)
- Implication method : méthode d'implication (min)
- Aggregation : méthode d'agrégation des règles (max)
- Defuzzification : méthode de défuzzification (centroid)

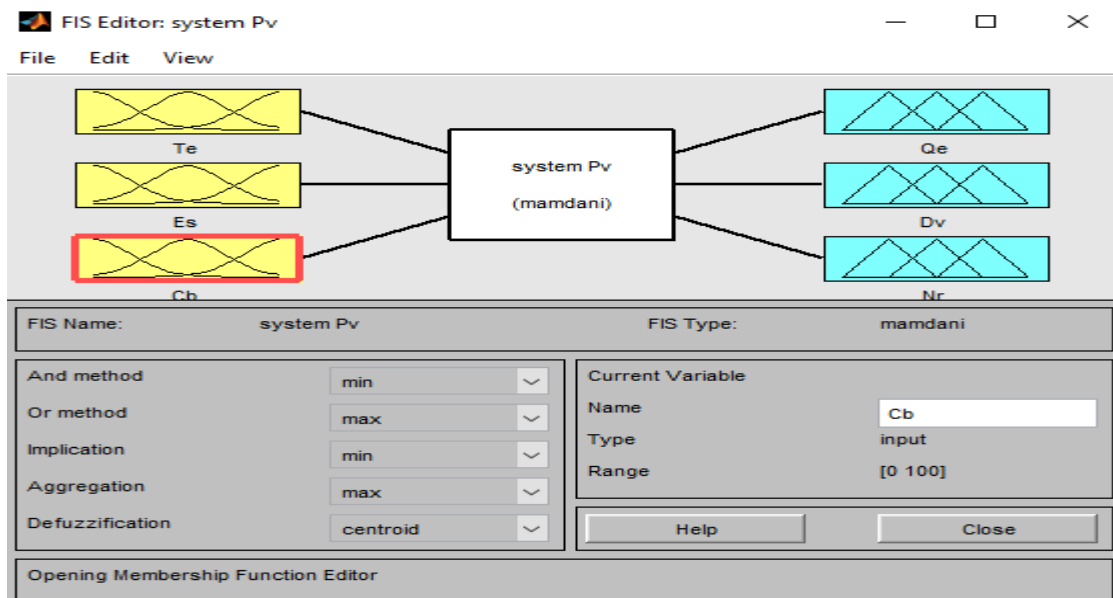


Figure 3.3 : Schéma bloc du (SIF)

3.7 Fuzzification

3.7.1 Fuzzification des variables d'entrée

3.7.1.1 Fuzzification de la variable d'entrée (température (Te))

Cette variable varie entre [-5,15] C° le climat du Sahara d'Algérie (voir la référence [82])

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf** (Elles sont définies par trois paramètres qui spécifient l'emplacement des points gauche, central et droit du triangle).

- La première appelée froid avec trois paramètres [-5 -5 15]
- La deuxième appelée Tempéré avec trois paramètres [10 20 30]
- La troisième appelée chaud avec trois paramètres [25 50 50]

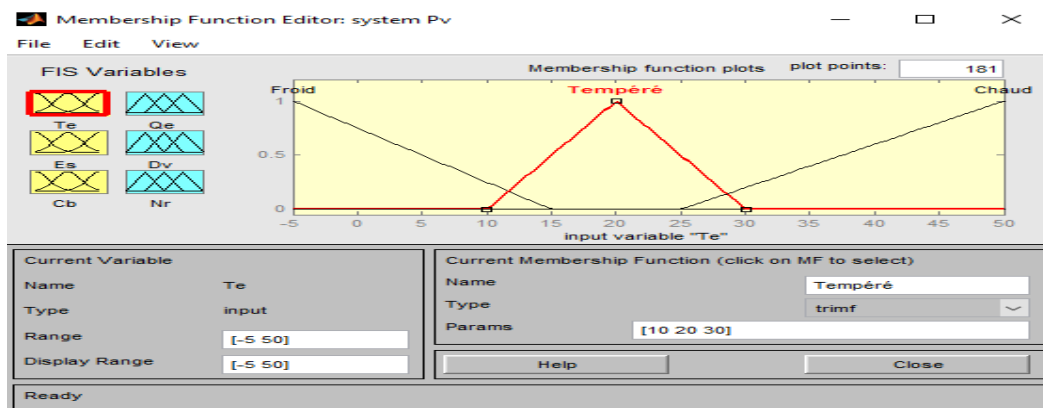


Figure 3.4 : Fuzzification de la variable d'entrée(Te) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf** (la fonction gaussienne se caractérise par deux paramètres [σ et μ] σ est l'écart type et μ est l'espérance mathématique).

- La première appelée froid avec deux paramètres [$\sigma=7, \mu=-5$]
- La deuxième appelée Tempéré deux trois paramètres [$\sigma=4, \mu=20$]
- La troisième appelée chaud avec deux paramètres [$\sigma=8, \mu=50$]

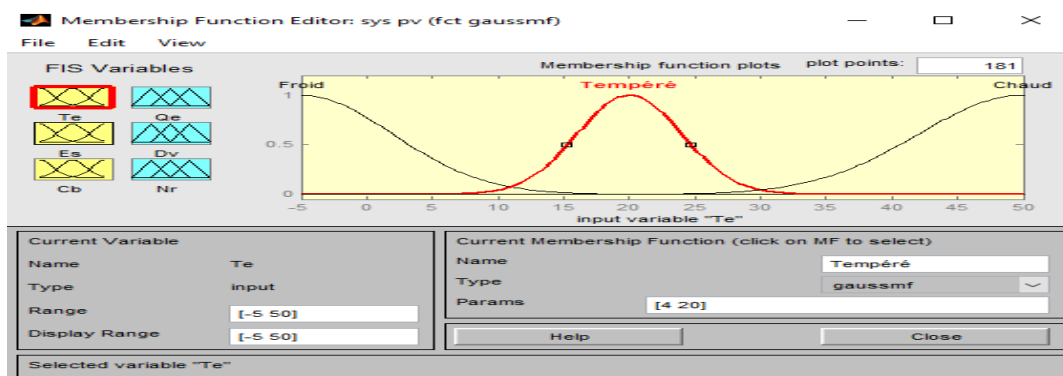


Figure 3.5 : Fuzzification de la variable d'entrée(Te) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

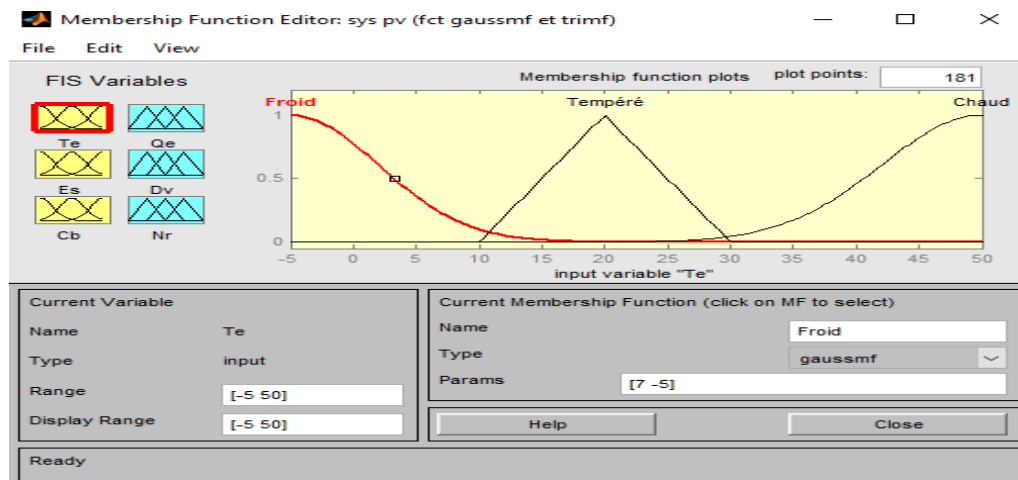


Figure 3.6 : Fuzzification de la variable d'entrée(Te) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.7.1.2 Fuzzification de la variable d'entrée (Ensoleillement (Es))

Cette variable varie entre [0,1000] W/m². (voir la référence [83])

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf**.

- La première appelée faible avec trois paramètres [0 0 350]
- La deuxième appelée moyen avec trois paramètres [300 450 600]
- La troisième appelée fort avec trois paramètres [500 1000 1000]

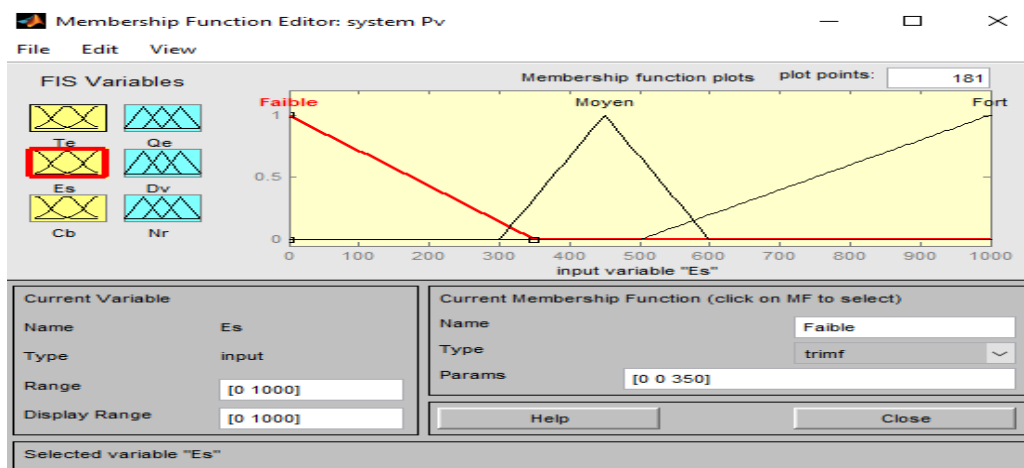


Figure 3.7 : Fuzzification de la variable d'entrée(Es) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf**.

- La première appelée faible avec deux paramètres [$\sigma=130, \mu=0$]
- La deuxième appelée moyen avec deux paramètres [$\sigma=63, \mu=450$]
- La troisième appelée fort avec deux paramètres [$\sigma=157, \mu=1000$]

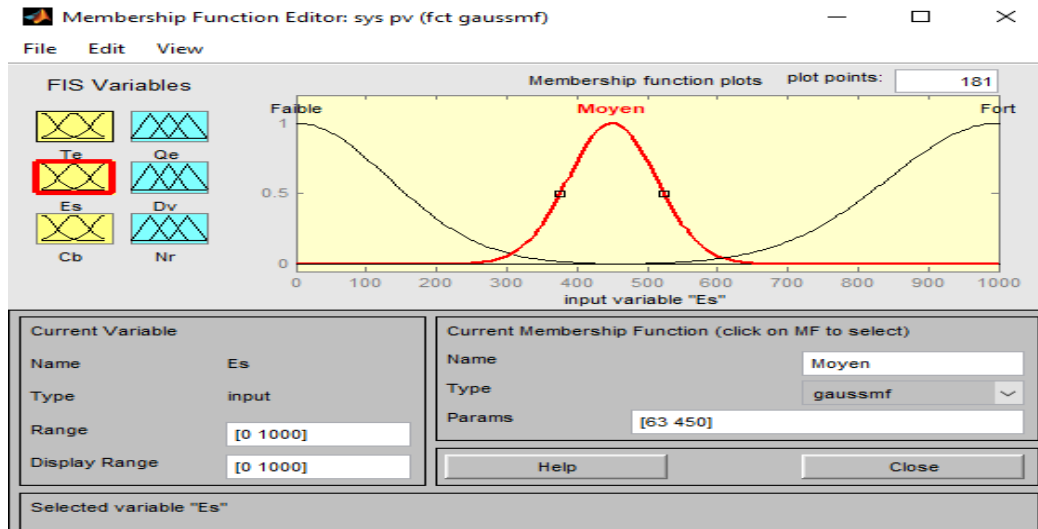


Figure 3.8 : Fuzzification de la variable d'entrée(Es) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

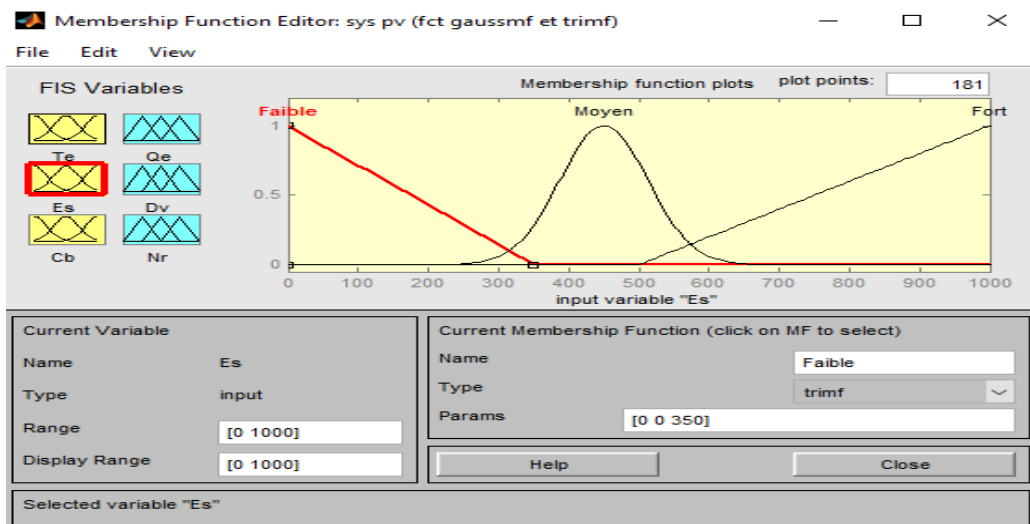


Figure 3.9 : Fuzzification de la variable d'entrée(Es) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.7.1.3 Fuzzification de la variable d'entrée (la charge de la batterie (Cb))

Cette variable varie entre [0,100] %.

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf**.

- La première appelée faible avec trois paramètres [0 0 35]
- La deuxième appelée moyenne avec trois paramètres [30 45 60]
- La troisième appelée élevée avec trois paramètres [50 100 100]

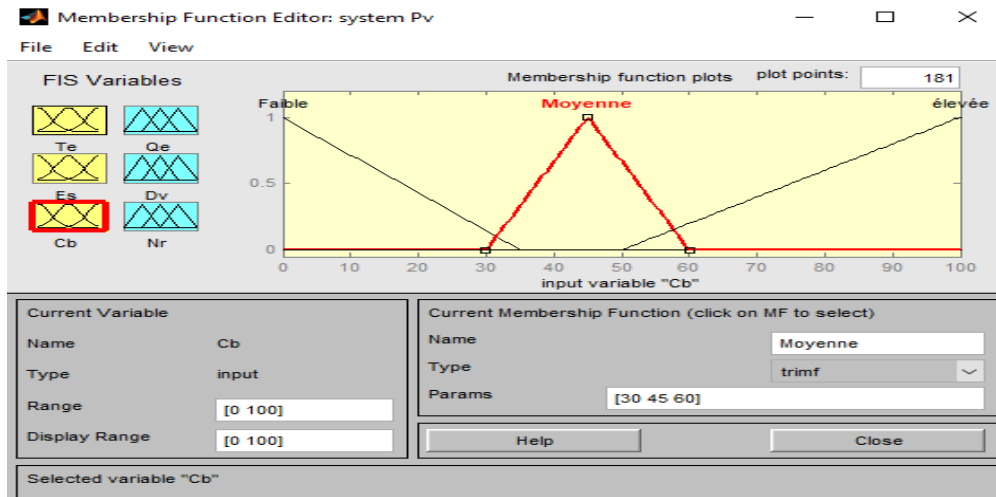


Figure 3.10 : Fuzzification de la variable d'entrée(Cb) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf**.

- La première appelée faible avec deux paramètres [$\sigma=13, \mu=0$]
- La deuxième appelée moyenne avec deux paramètres [$\sigma=6, \mu=45$]
- La troisième appelée élevée avec deux paramètres [$\sigma=16, \mu=100$]

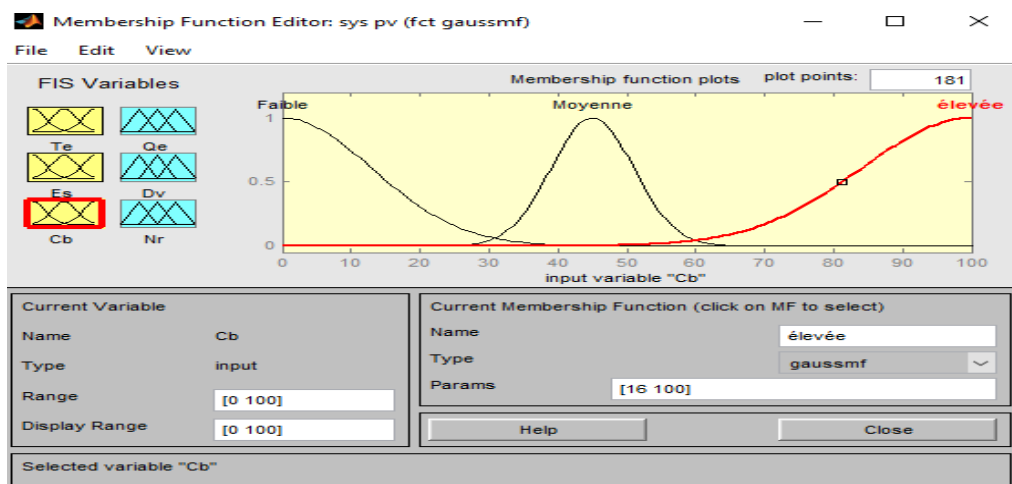


Figure 3.11 : Fuzzification de la variable d'entrée(Cb) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

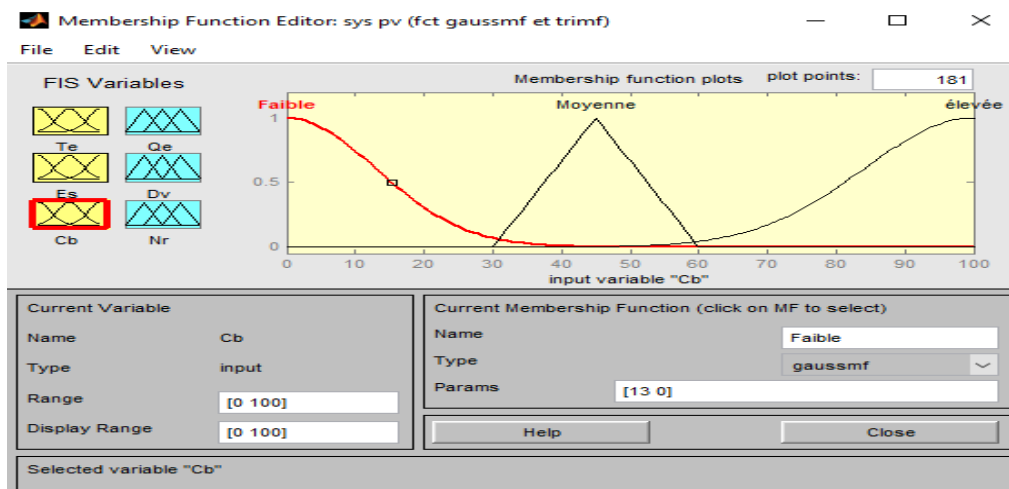


Figure 3.12 : Fuzzification de la variable d'entrée(Cb) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.7.2 Fuzzification des variables de sortie

3.7.2.1 Fuzzification de la variable de sortie (Quantité d'énergie (Qe))

Cette variable varie entre [0,3600] Wh, (la quantité d'énergie d'une batterie lithium-ion (marque BASEN) de 12v 300ah ce qui équivaut 3600wh) [84]

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf**.

- La première appelée faible avec trois paramètres [0 0 1000]
- La deuxième appelée moyenne avec trois paramètres [800 1500 2200]
- La troisième appelée élevée avec trois paramètres [2000 3600 3600]

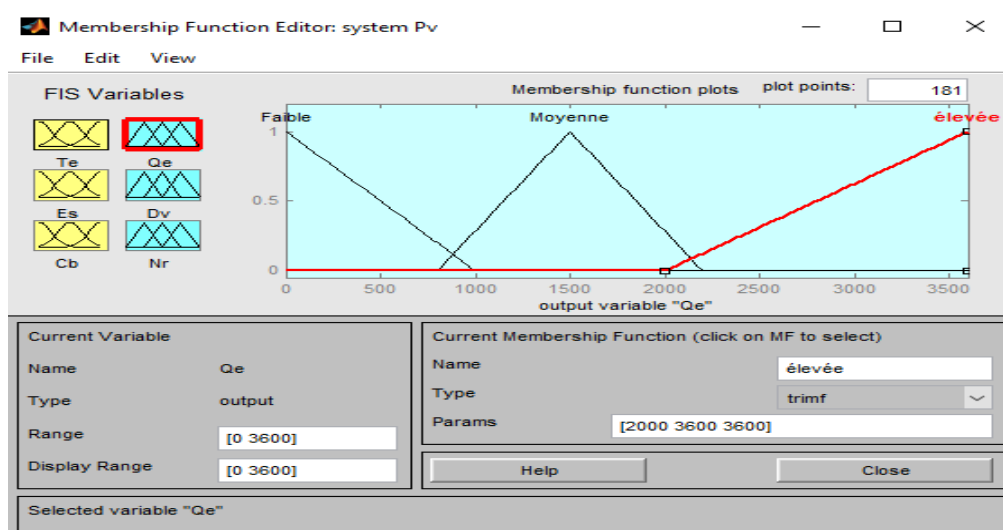


Figure 3.13 : Fuzzification de la variable de sortie(Qe) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf**.

- La première appelée faible avec deux paramètres [$\sigma=374, \mu=0$]
- La deuxième appelée moyenne avec deux paramètres [$\sigma=275, \mu=1500$]
- La troisième appelée élevée avec deux paramètres [$\sigma=615, \mu=3600$]

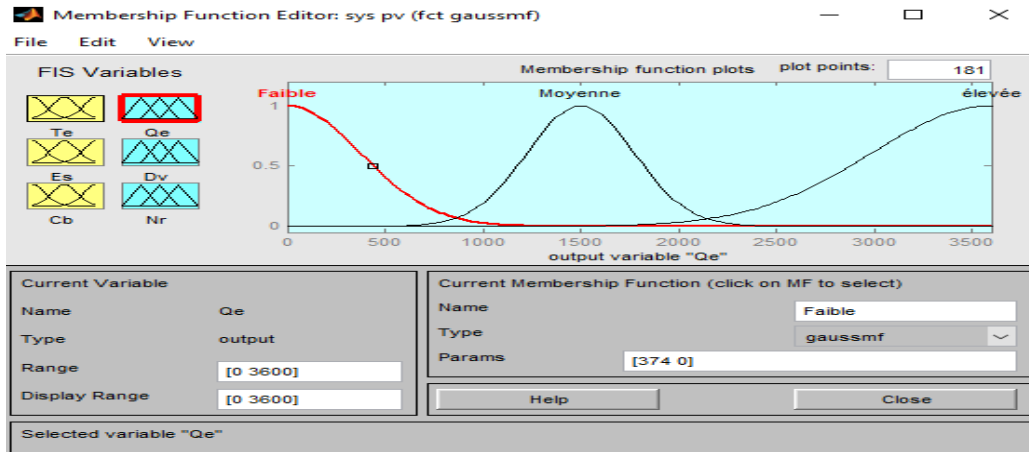


Figure 3.14 : Fuzzification de la variable de sortie (Qe) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

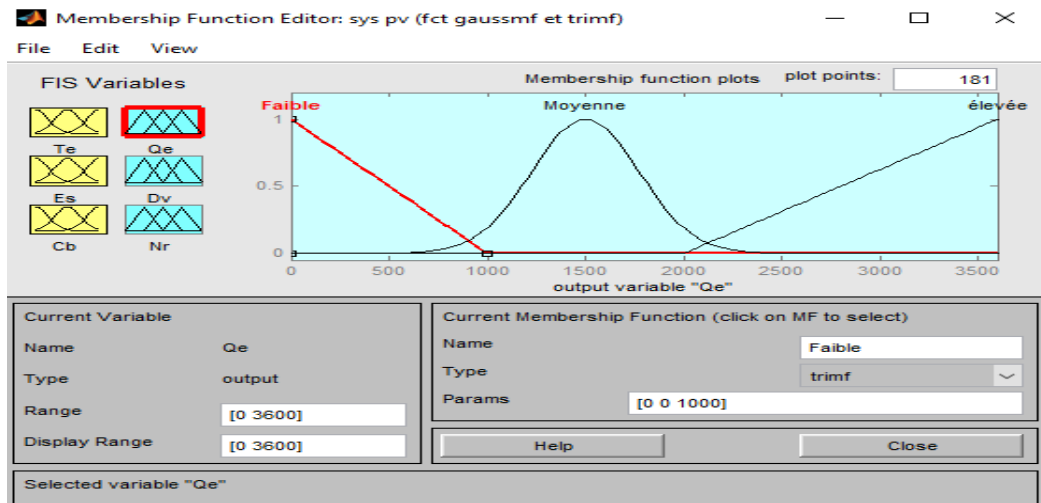


Figure 3.15 : Fuzzification de la variable de sortie (Qe) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.7.2.2 Fuzzification de la variable de sortie (Durée de vie de la batterie (Dv))

Cette variable varie entre [0,10] ans. (voir la référence [84]).

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf**.

- La première appelée courte avec trois paramètres [0 0 4]
- La deuxième appelée moyenne avec trois paramètres [3 5.5 8]
- La troisième appelée longue avec trois paramètres [7 10 10]

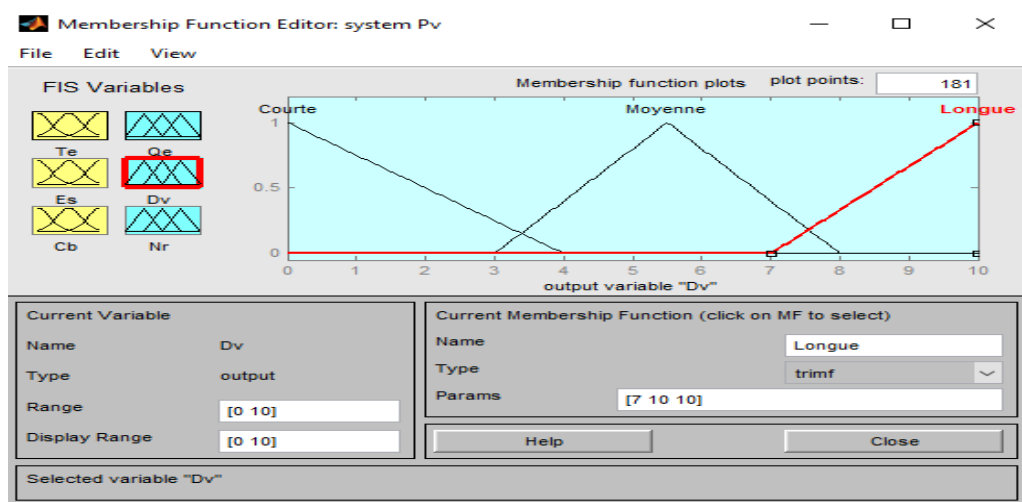


Figure 3.16 : Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf**.

- La première appelée courte avec deux paramètres [$\sigma=1.5, \mu=0$]
- La deuxième appelée moyenne avec deux paramètres [$\sigma=1, \mu=5.5$]
- La troisième appelée longue avec deux paramètres [$\sigma=1, \mu=10$]

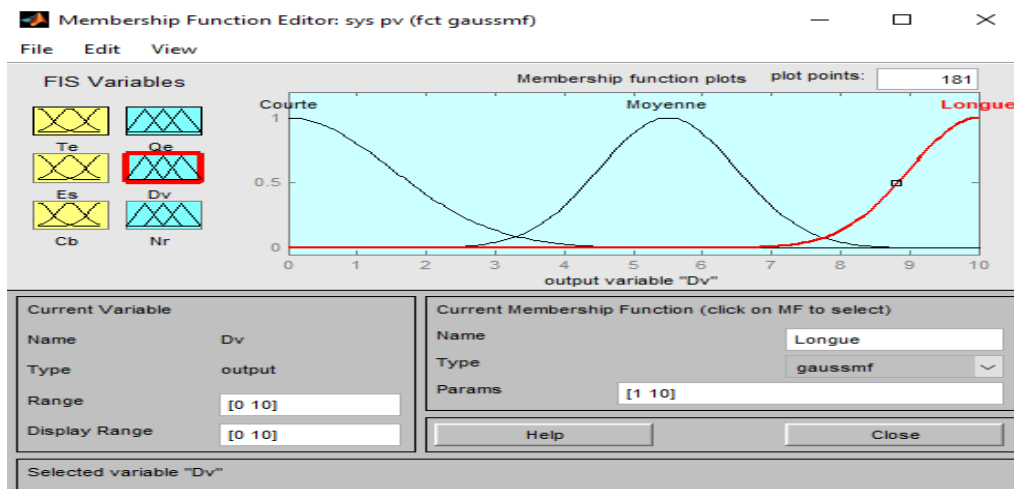


Figure 3.17 : Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

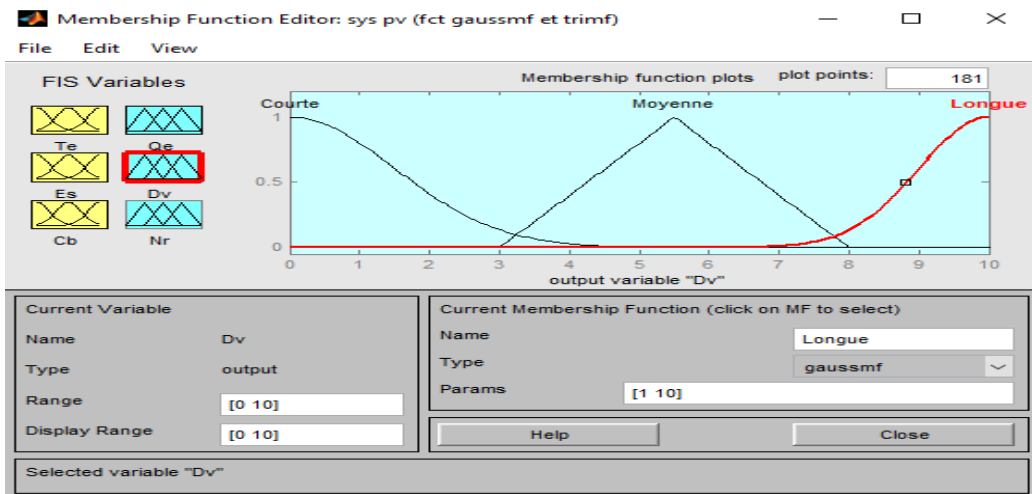


Figure 3.18 : Fuzzification de la variable de sortie (Dv) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.7.2.3 Fuzzification de la variable de sortie (Niveau de remplissage de la batterie (Nr))

Cette variable varie entre [0,100] %

1ère cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Trimf**.

- La première appelée bas avec trois paramètres [0 0 35]
- La deuxième appelée moyen avec trois paramètres [30 45 60]
- La troisième appelée haut avec trois paramètres [50 100 100]

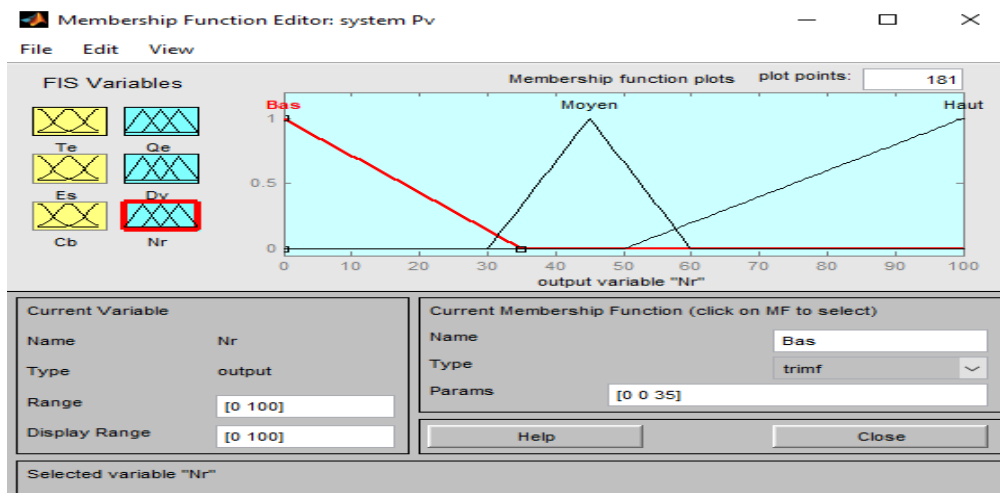


Figure 3.19 : Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance trimf)

2ème cas : nous avons choisi trois fonctions d'appartenance de type **Gaussmf**.

- La première appelée bas avec deux paramètres [$\sigma=13, \mu=0$]
- La deuxième appelée moyen avec deux paramètres [$\sigma=6, \mu=45$]
- La troisième appelée haut avec deux paramètres [$\sigma=16, \mu=100$]

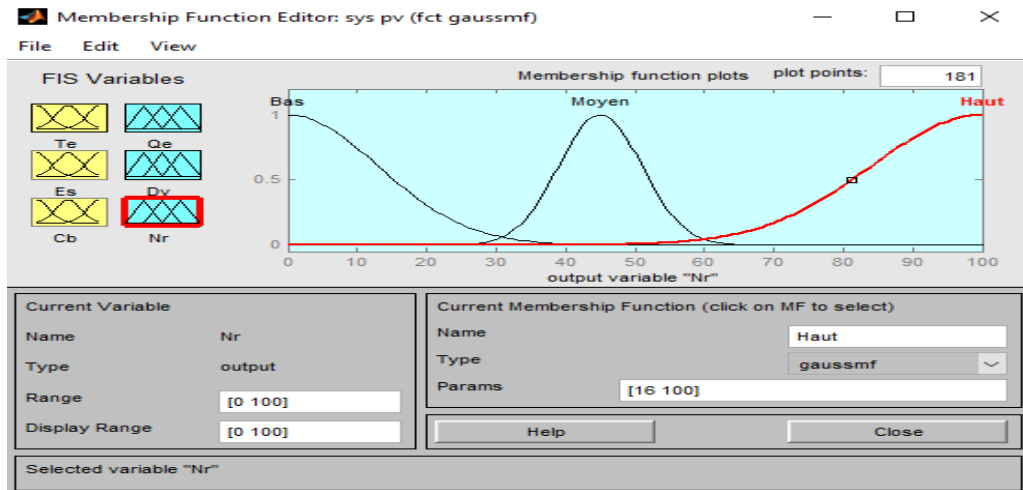


Figure 3.20 : Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf)

3ème cas : nous avons mélangé entre les fonctions d'appartenance **Trimf** et **Gaussmf**.

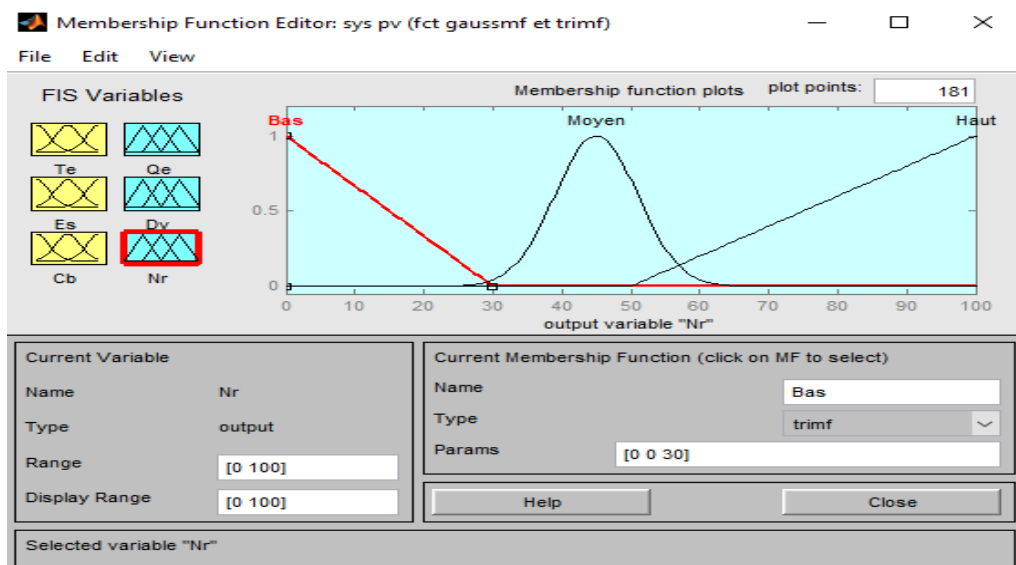


Figure 3.21 : Fuzzification de la variable de sortie (Nr) (Avec les fonctions d'appartenance gaussmf et trimf)

3.8 Génération des règles d'inférence

Les différentes règles possibles selon la fuzzification des différentes variables d'entrée et de sortie choisis sont les suivantes (3 variables d'entrée et 3 fonctions d'appartenances pour chacune des variables, on obtient 27 règles d'inférences ($3^3 = 27$)).

1. **Si** Te est froid ET Es est faible ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est bas et Dv est courte.
2. **Si** Te est froid ET Es est faible ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est faible, Nr est bas et Dv est moyenne.
3. **Si** Te est froid ET Es est faible ET Cb est élevée, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est longue.
4. **Si** Te est froid ET Es est moyen ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est bas et Dv est courte.
5. **Si** Te est froid ET Es est moyen ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est moyenne.
6. **Si** Te est froid ET Es est moyen ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est longue.
7. **Si** Te est froid ET Es est fort ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est courte.
8. **Si** Te est froid ET Es est fort ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est moyenne.
9. **Si** Te est froid ET Es est fort ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est haut et Dv est longue.
10. **Si** Te est tempéré ET Es est faible ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est bas et Dv est courte.
11. **Si** Te est tempéré ET Es est faible ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est courte.
12. **Si** Te est tempéré ET Es est faible ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est moyenne.
13. **Si** Te est tempéré ET Es est moyen ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est moyenne.
14. **Si** Te est tempéré ET Es est moyen ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est moyenne.
15. **Si** Te est tempéré ET Es est moyen ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est haut et Dv est longue.

16. **Si** Te est tempéré ET Es est fort ET Cb est faible, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est longue.
17. **Si** Te est tempéré ET Es est fort ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
18. **Si** Te est tempéré ET Es est fort ET Cb est élevée, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
19. **Si** Te est chaud ET Es est faible ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est moyen et Dv est courte.
20. **Si** Te est chaud ET Es est faible ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est moyenne.
21. **Si** Te est chaud ET Es est faible ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est longue.
22. **Si** Te est chaud ET Es est moyen ET Cb est faible, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est longue.
23. **Si** Te est chaud ET Es est moyen ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
24. **Si** Te est chaud ET Es est moyen ET Cb est élevée, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
25. **Si** Te est chaud ET Es est fort ET Cb est faible, **Alors** Qe est moyen, Nr est haut et Dv est longue.
26. **Si** Te est chaud ET Es est fort ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
27. **Si** Te est chaud ET Es est fort ET Cb est élevée, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.

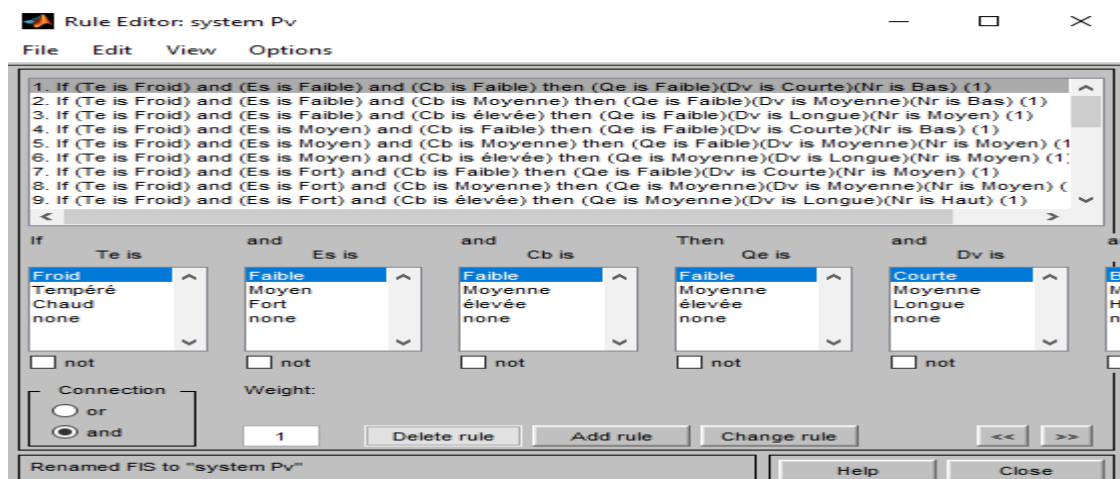


Figure 3.22 : Les règles d'inférence

Tableau 3.1 : Les règles d'inférence

Règles	Les entrées			Les sorties		
	Te	Es	Cb	Qe	Nr	Dv
1	Froid	Faible	Faible	Faible	Bas	Courte
2	Froid	Faible	Moyenne	Faible	Bas	Moyenne
3	Froid	Faible	Élevée	Faible	Moyen	Longue
4	Froid	Moyen	Faible	Faible	Bas	Courte
5	Froid	Moyen	Moyenne	Faible	moyen	Moyenne
6	Froid	Moyen	Élevée	Moyen	moyen	Longue
7	Froid	Fort	Faible	Faible	moyen	Courte
8	Froid	Fort	Moyenne	Moyen	moyen	Moyenne
9	Froid	Fort	Élevée	Moyen	Haut	Longue
10	Tempéré	Faible	Faible	Faible	Bas	Courte
11	Tempéré	Faible	Moyenne	Faible	Moyen	Courte
12	Tempéré	Faible	Élevée	Moyen	Moyen	Moyenne
13	Tempéré	Moyen	Faible	Faible	Moyen	Moyenne
14	Tempéré	Moyen	Moyenne	Moyen	Moyen	Moyenne
15	Tempéré	Moyen	Élevée	Moyen	Haut	Longue
16	Tempéré	Fort	Faible	Moyen	Moyen	Longue
17	Tempéré	Fort	Moyenne	Élevée	Haut	Longue
18	Tempéré	Fort	Élevée	Élevée	Haut	Longue
19	Chaud	Faible	Faible	Faible	Moyen	Courte
20	Chaud	Faible	Moyenne	Moyen	Moyen	Moyenne
21	Chaud	Faible	Élevée	Moyen	Moyen	Longue
22	Chaud	Moyen	Faible	Moyen	Moyen	Longue
23	Chaud	Moyen	Moyenne	Élevée	Haut	Longue
24	Chaud	Moyen	Élevée	Élevée	Haut	Longue
25	Chaud	Fort	Faible	Moyen	Haut	Longue
26	Chaud	Fort	Moyenne	Élevée	Haut	Longue
27	Chaud	Fort	Élevée	Élevée	Haut	Longue

3.9 Défuzzification de la variable de sortie

Exemple d'application : nous avons pris input [43 850 40]. Le system nous a donné ces résultats : Quantité d'énergie 3030Wh, durée de vie 8.94 ans et niveau de remplissage 82.2%

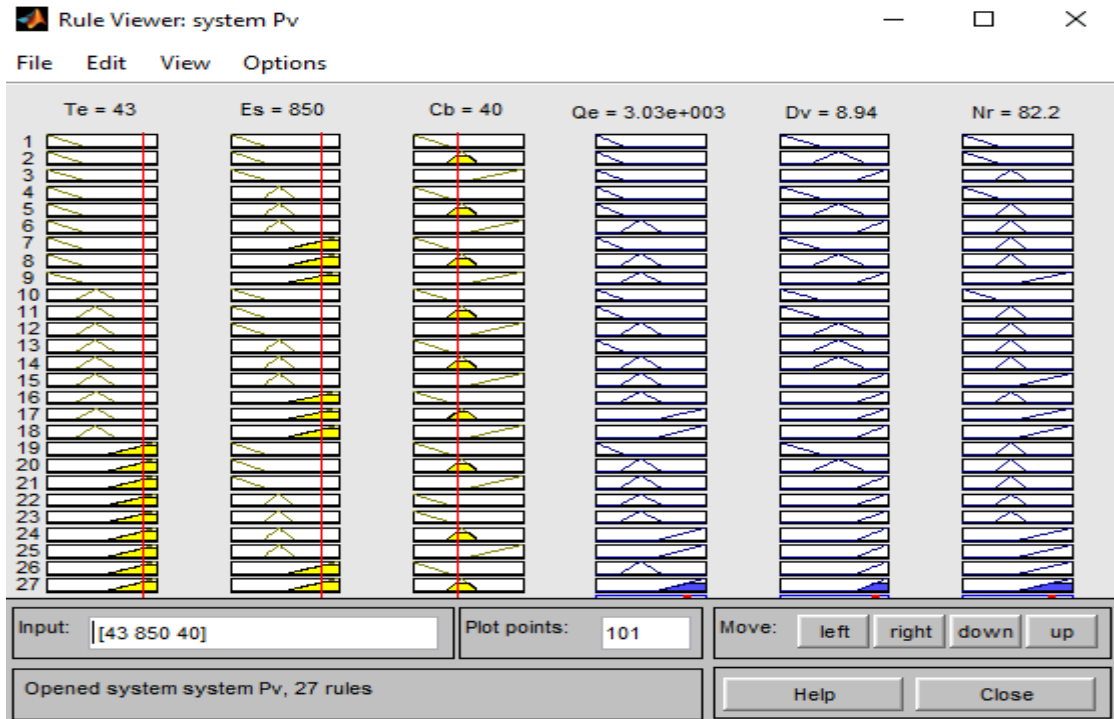


Figure 3.23 : Défuzzification des variables de sortie

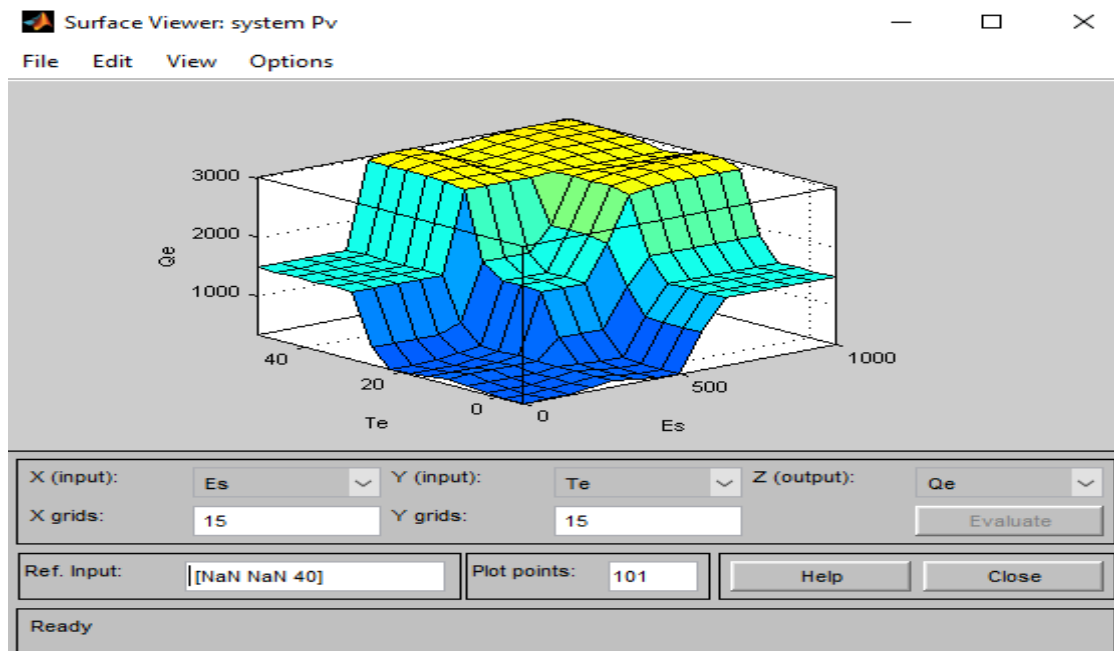


Figure 3.24 : Défuzzification de la variable de la sortie (Q_e) (surface)

Le Visualiseur de Surface est équipé de menus déroulants X (entrée), Y (entrée) et Z (sortie) qui vous permettent de sélectionner deux entrées et une sortie pour l'affichage. Sous ces menus se trouvent deux champs d'entrée, X grids et Y grids, qui vous permettent de spécifier le nombre de lignes de la grille de l'axe des x et de l'axe des y que vous souhaitez inclure. Cette fonctionnalité vous permet de maintenir un temps de calcul raisonnable pour les problèmes complexes.

Par défaut, le graphique de surface se met à jour automatiquement lorsque vous modifiez les sélections des variables d'entrée ou de sortie. Pour désactiver les mises à jour automatiques du graphique, dans le menu Options, décochez l'option Toujours évaluer. Lorsque cette option est désactivée, pour mettre à jour le graphique, cliquez sur Évaluer.

En cliquant sur les axes du graphique et en faisant glisser la souris, vous pouvez manipuler la surface afin de l'observer sous différents angles.

Le champ Entrée de Réf. est utilisé dans les situations où le système requiert plus d'entrées que ce que la surface cartographie. Vous pouvez éditer ce champ pour définir explicitement les entrées qui ne sont pas spécifiées dans le graphique de surface.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a exploré l'intégration de la logique floue dans la gestion d'une batterie photovoltaïque. Nous avons développé les fonctions d'appartenance et les règles floues spécifiques à ce système. Cette approche floue permet de prendre en compte l'incertitude et les variations des conditions environnementales, offrant ainsi une gestion plus flexible de la batterie.

Dans le prochain chapitre, nous prévoyons de discuter et d'analyser les résultats expérimentaux que nous avons obtenus en utilisant la logique floue à l'aide du programme MATLAB.

CHAPITRE 4

Discussions Expérimentales

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur l'interprétation et la discussion des résultats de notre expérience, cherchant ainsi à identifier des solutions efficaces pour augmenter la production d'énergie tout en réduisant les risques d'incendie liés à la batterie. En analysant les données obtenues, nous espérons proposer des mesures concrètes visant à optimiser la quantité d'énergie générée tout en assurant la sécurité de l'utilisation de la batterie. Ce faisant, nous contribuerons à une meilleure compréhension des défis énergétiques actuels et à la recherche de solutions viables et durables.

4.2 Discussion expérimental et interprétation

4.2.1 Méthode comparative entre les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf

Nous avons choisi cinquante valeurs (50) aléatoires pour chaque entrée qui incluent toutes les probabilités possibles, en utilisant toutes les vingt-sept (27) règles floues. Puis on fait l'opération 3 fois en utilisant les fonctions d'appartenance : Trimf, gaussmf et un mélange entre les deux.

Les tableaux suivants représentent les résultats :

Tableau 4.1 : résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf

Entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	321	1,3	11,3
-3	150	30	456	1,83	16
-1	200	50	393	5,5	13,8
0	250	10	424	1,7	14,9
2	100	40	354	5,5	12,5
4	300	90	456	8,63	45
5	400	35	413	5,5	45
6	450	60	1500	8,67	45
7	500	100	1500	8,8	45
8	600	28	443	1,78	45
9	520	31	804	3,4	25,7
10	580	56	1110	6,41	63,5
11	630	12	887	3,72	45
12	700	34	2240	6,48	68,1
13	810	76	2580	8,74	78,8
14	5	19	399	1,61	14
15	50	32	459	1,84	32,5
16	100	80	1500	5,5	45
17	60	1	347	1,4	12,2

18	230	45	411	1,66	45
19	310	90	1500	6,23	61,1
20	330	8	443	4,84	37,6
21	400	36	1500	5,5	45
22	470	68	1500	8,78	79,4
23	510	12	427	5,57	45
24	900	52	3000	8,88	81,1
25	950	73	2970	8,84	80,4
26	1000	21	1500	8,8	50,1
27	870	59	2880	8,66	77,4
28	680	73	2890	8,67	77,4
29	0	28	452	1,82	32,6
30	30	57	1500	6,38	45
31	80	100	1500	8,7	45
32	120	7	425	1,71	45
33	350	54	2930	8,75	79
34	360	98	2940	8,78	79,4
35	480	2	1500	8,8	45
36	490	48	2970	8,82	80,2
37	550	62	2900	8,7	78,1
38	580	31	2040	8,61	65,7
39	520	46	3000	8,88	81,1
40	670	58	2860	8,62	76,9
42	810	13	1500	8,92	81,9
43	850	40	3030	8,94	82,2
45	880	99	1800	5	50
46	910	22	1500	8,78	79,5
47	930	57	2890	8,67	77,7
48	1000	100	2370	8,62	76,9
49	980	5	1500	9,01	83,3
50	700	32	2370	8,62	76,9

Interprétation :

Le tableau 4.1 représente trois variables de sortie (Q_e , D_v , N_r) par apport trois entrées (T_e , E_s , C_b) lorsque nous avons utilisé vingt-sept règles et trois fonctions d'appartenance du type trimf

-D'après les valeurs d'entrée $T_e=-5$; $E_s=0$; $C_b=0$, nous obtenons la valeur minimale pour la quantité d'énergie 321 Wh, la durée de vie de la batterie 1.3 ans et le niveau de remplissage 11.3%.

-Lors les valeurs d'entrée $T_e=43$; $E_s=850$; $C_b=40$, nous obtenons une valeur de quantité d'énergie maximale de 3030Wh, bien que cela ne soit pas considéré comme idéal, une durée de vie 8.94 ans et niveau de remplissage 82.2%.

Tableau 4.2 : résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Gaussmf

Entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	287	1,17	10,1
-3	150	30	502	3,67	17,5
-1	200	50	388	5,52	14,2
0	250	10	437	1,76	15,2
2	100	40	329	5,46	11,6
4	300	90	1040	8,65	45,2
5	400	35	423	5,25	41,9
6	450	60	1180	6,28	45,1
7	500	100	1530	8,86	46,3
8	600	28	1140	3,36	34
9	520	31	1090	4,31	35,4
10	580	56	1300	5,79	54,3
11	630	12	1120	4,78	39,2
12	700	34	2330	6,44	72,3
13	810	76	2710	8,82	82
14	5	19	385	1,56	13,4
15	50	32	482	2,65	35,1
16	100	80	1480	5,53	45
17	60	1	309	1,25	10,8
18	230	45	445	1,82	44,9
19	310	90	1490	6,62	66,8
20	330	8	451	4,92	38,1
21	400	36	1460	5,42	44,1
22	470	68	1530	8,64	80
23	510	12	358	5,51	45,3
24	900	52	3020	9,07	85
25	950	73	2920	8,9	82,3
26	1000	21	1500	8,93	47,1
27	870	59	2760	8,65	78,3
28	680	73	2830	8,77	80,2
29	0	28	763	2,84	24,4
30	30	57	1140	4,67	45
31	80	100	1500	7,12	45

32	120	7	492	1,98	41,7
33	350	54	2510	7,22	73,4
34	360	98	2650	8,65	76,1
35	480	2	1500	8,71	46
36	490	48	2900	8,8	81,8
37	550	62	2750	8,6	77,9
38	580	31	2220	8,64	65,6
39	520	46	2980	8,99	83,9
40	670	58	2810	8,72	79,4
42	810	13	1500	9,06	84,9
43	850	40	3030	9,13	85,9
45	880	99	1800	6,58	50
46	910	22	1500	8,9	82,3
47	930	57	2850	8,79	80,4
48	1000	100	1800	6,41	50
49	980	5	1500	9,22	87,4
50	700	32	2410	8,72	79,3

Interprétation :

Le tableau 4.2 représente trois variables de sortie (Qe, Dv, Nr) par apport trois entrées (Te, Es, Cb) lorsque nous avons utilisé vingt-sept règles et trois fonctions d'appartenance du type Gaussmf.

-D'après les valeurs d'entrée $Te=-5$; $Es=0$; $Cb=0$, nous obtenons la valeur minimale pour la quantité d'énergie 321Wh, la durée de vie de la batterie 1.17 ans et le niveau de remplissage 10.1%.

-Lors les valeurs d'entrée $Te=43$; $Es=850$; $Cb=40$, nous obtenons une valeur de quantité d'énergie maximale de 3030Wh, une durée de vie 9.13 ans et niveau de remplissage 85.9%.

Tableau 4.3 : résultats du system avec vingt-sept règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf

entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	321	1,17	9,67
-3	150	30	474	2,03	14,3
-1	200	50	396	5,53	12,7
0	250	10	424	1,6	12,7
2	100	40	361	5,45	10,9
4	300	90	872	8,8	45
5	400	35	415	5,28	42,4
6	450	60	1500	8,57	45
7	500	100	1500	8,9	45
8	600	28	468	1,93	33,9
9	520	31	993	4,06	31,5
10	580	56	1090	5,82	52,9
11	630	12	1170	5,18	40,9
12	700	34	2460	6,87	73,2
13	810	76	2760	8,95	78,8
14	5	19	411	1,54	12,4
15	50	32	461	2,28	36,9
16	100	80	1480	5,55	45
17	60	1	347	1,28	10,4
18	230	45	433	1,63	44,9
19	310	90	1490	6,38	62,7
20	330	8	464	4,74	36,8
21	400	36	1470	5,5	45,1
22	470	68	1520	8,79	76,8
23	510	12	433	5,56	45,3
24	900	52	2990	9,08	81,1
25	950	73	2900	8,91	78,1
26	1000	21	1500	8,93	47,1
27	870	59	2830	8,65	76,1
28	680	73	2870	8,87	77,7
29	0	28	468	1,93	22,7
30	30	57	1500	6,23	45
31	80	100	1500	8,63	45
32	120	7	471	1,98	45
33	350	54	2850	8,74	76,5
34	360	98	2860	8,79	76,9
35	480	2	1500	8,84	45

36	490	48	2880	8,88	77,7
37	550	62	2830	8,63	76
38	580	31	2230	8,65	65,6
39	520	46	2940	9,01	79,6
40	670	58	2860	8,78	76,9
42	810	13	1500	9,12	81,7
43	850	40	3030	9,15	82,3
45	880	99	2590	6,53	70,7
46	910	22	1500	8,9	78,1
47	930	57	2890	8,87	77,7
48	1000	100	1790	5,65	60,9
49	980	5	1500	9,22	83,6
50	700	32	2510	8,78	76,8

Interprétation :

Le tableau 4.3 représente trois variables de sortie (Qe, Dv, Nr) par apport trois entrées (Te, Es, Cb) lorsque nous avons utilisé vingt-sept règles et trois fonctions d'appartenance du type trimf et gaussmf

-D'après les valeurs d'entrée $Te=-5$; $Es=0$; $Cb=0$, nous obtenons la valeur minimale pour la quantité d'énergie 321Wh, la durée de vie de la batterie 1.17 ans et le niveau de remplissage 9.67%.

-Lors les valeurs d'entrée $Te=43$; $Es=850$; $Cb=40$, nous obtenons une valeur de quantité d'énergie maximale de 3030Wh, une durée de vie 9.15 ans et niveau de remplissage 82.3%.

4.2.1.1 Discussion du SIF et de ses fonctions d'appartenance en utilisant vingt-sept règles floues :

Dans l'ensemble des trois cas étudiés, Nous constatons une relation de corrélation entre Nr et Qe, ce qui signifie que lorsque Nr augmente, Qe augmente également, et inversement. Concernant Dv, son niveau est élevé lorsque la batterie est utilisé dans des conditions appropriées, et il diminue lorsqu'elle est utilisé dans des conditions inappropriées nous avons observé une convergence significative des résultats, soulignant ainsi une tendance commune entre les différentes fonctions examinées. Toutefois, une légère supériorité de la fonction trimf par rapport à la fonction gaussmf a été constatée dans certains scénarios spécifiques. La fonction trimf a démontré une capacité supérieure à modéliser et représenter certaines distributions de données, offrant ainsi une meilleure adéquation dans ces cas particuliers.

D'un autre côté, nous avons également observé une supériorité de la fonction gaussmf sur la fonction trimf dans d'autres cas. La fonction gaussmf a montré une meilleure capacité à capturer des distributions plus complexes et asymétriques, ce qui s'est avéré bénéfique dans ces scénarios spécifiques.

Cependant, il est important de noter que ces différences de performance se sont avérées minimales en termes de pourcentages. Par conséquent, il serait prématuré de conclure de manière définitive qu'une fonction est meilleure que l'autre pour notre système. Les résultats ont mis en évidence les subtilités entre les performances des deux fonctions, soulignant leur sensibilité aux circonstances spécifiques de l'expérience.

Afin d'approfondir notre analyse et de mieux comprendre les performances relatives des fonctions trimf et gaussmf, nous prévoyons de mener une expérience ultérieure en réduisant le nombre de règles appliquées. En réduisant le nombre de règles, nous pourrions mieux évaluer les interactions spécifiques entre ces fonctions dans des contextes plus restreints. Cette approche nous permettra d'obtenir des informations plus précises sur les forces et les faiblesses respectives de chaque fonction dans des situations plus spécifiques.

En recueillant de nouvelles données à partir de cette expérience, nous serons en mesure d'améliorer notre compréhension globale de l'impact de ces fonctions sur notre système, ce qui nous aidera à prendre des décisions plus éclairées pour son développement et son amélioration continue.

Dans ce cas, nous avons réduit le nombre de règles floues de vingt-sept à neuf règles afin d'observer les différences entre les résultats des différentes fonctions d'appartenance.

Les règles d'inférence utilisées:

1. **Si** Te est froid ET Es est faible ET Cb est faible, **Alors** Qe est faible, Nr est bas et Dv est courte.
2. **Si** Te est froid ET Es est moyen ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est longue.
3. **Si** Te est froid ET Es est fort ET Cb est élevée, **Alors** Qe est moyen, Nr est haut et Dv est longue.
4. **Si** Te est tempéré ET Es est moyen ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est moyen, Nr est moyen et Dv est moyenne.
5. **Si** Te est tempéré ET Es est fort ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
6. **Si** Te est tempéré ET Es est fort ET Cb est élevée, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
7. **Si** Te est chaud ET Es est moyen ET Cb est élevée, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.
8. **Si** Te est chaud ET Es est fort ET Cb est faible, **Alors** Qe est moyen, Nr est haut et Dv est longue.
9. **Si** Te est chaud ET Es est fort ET Cb est moyenne, **Alors** Qe est élevé, Nr est haut et Dv est longue.

Voici les résultats obtenus :

Tableau 4.4 : résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf

entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	321	1,3	11,3
-3	150	30	456	1,83	16
-1	200	50	1800	5	50
0	250	10	424	1,7	14,9
2	100	40	1800	5	50
4	300	90	1800	5	50
5	400	35	1800	5	50
6	450	60	1500	8,67	45
7	500	100	1500	8,8	45
8	600	28	1800	5	50
9	520	31	1800	5	50
10	580	56	1500	8,61	65,7
11	630	12	1800	5	50
12	700	34	2890	8,67	77,7
13	810	76	2580	8,74	78,8
14	5	19	478	1,93	16,8
15	50	32	1800	5	50
16	100	80	1800	5	50
17	60	1	1800	5	50
18	230	45	1800	5	50
19	310	90	1800	5	50
20	330	8	1800	5	50
21	400	36	1500	5,5	45
22	470	68	1800	5	50
23	510	12	1800	5	50
24	900	52	3000	8,88	81,1
25	950	73	2970	8,84	80,4
26	1000	21	1500	8,56	75,7
27	870	59	2880	8,66	77,4
28	680	73	2890	8,67	77,7
29	0	28	1800	5	50
30	30	57	1800	5	50
31	80	100	1800	5	50
32	120	7	1800	5	50
33	350	54	2840	8,59	76,2

34	360	98	2940	8,78	79,4
35	480	2	1800	5	50
36	490	48	1800	5	50
37	550	62	2900	8,7	78,1
38	580	31	2400	8,61	76,7
39	520	46	2820	8,56	75,7
40	670	58	2860	8,62	96,9
42	810	13	1500	89,2	81,9
43	850	40	3030	8,94	82,2
45	880	99	1800	5	50
46	910	22	2500	8,78	79,5
47	930	57	2890	8,67	77,7
48	1000	100	1800	5	50
49	980	5	1500	9,01	83,3
50	700	32	2370	8,62	76,9

Interprétation :

Le tableau 4.4 représente trois variables de sortie (Qe, Dv, Nr) par apport trois entrées (Te, Es, Cb) lorsque nous avons utilisé neuf règles et trois fonctions d'appartenance du type trimf

Nous remarquons une répétition des mêmes valeurs dans plusieurs tentatives de différentes valeurs d'entrée, à savoir Qe : 1800 Wh, Dv : 5 ans et Nr : 50%, qui sont les valeurs médianes de la plage de chaque variable de sortie.

Tableau 4.5 : résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Gaussmf

Entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	287	1,17	10,1
-3	150	30	502	2,02	17,5
-1	200	50	1170	4,45	32
0	250	10	437	1,76	15,2
2	100	40	627	2,52	21,8
4	300	90	1500	8,63	45
5	400	35	816	2,8	25,2
6	450	60	1550	8,25	46,7
7	500	100	1530	8,9	46,3
8	600	28	2100	6,11	62,8
9	520	31	1830	5,77	55,3

10	580	56	2000	6,05	60
11	630	12	1250	4,43	43
12	700	34	2800	8,76	80,4
13	810	76	2690	8,88	82
14	5	19	566	2,28	19,7
15	50	32	590	2,38	20,6
16	100	80	1800	6,51	54,4
17	60	1	637	2,57	22,2
18	230	45	1320	4,87	35,8
19	310	90	1640	8,17	49,8
20	330	8	779	3,06	27,6
21	400	36	1500	5,5	45
22	470	68	2380	7,33	69
23	510	12	1480	7,47	68
24	900	52	3020	9,08	85,1
25	950	73	1500	8,3	72,7
26	1000	21	1530	8,36	73,6
27	870	59	2760	8,65	78,3
28	680	73	2840	8,77	80,2
29	0	28	938	3,77	32,7
30	30	57	966	3,88	33,6
31	80	100	1800	7,01	52,1
32	120	7	1160	4,23	38,4
33	350	54	2410	7,13	70,1
34	360	98	2850	8,79	8,4
35	480	2	1500	8,22	71,4
36	490	48	2400	7,89	71,2
37	550	62	2750	8,62	77,9
38	580	31	2140	8,49	75,9
39	520	46	2440	8,33	73,2
40	670	58	2810	8,72	79,4
42	810	13	1500	9,06	84,9
43	850	40	3030	9,13	85,9
45	880	99	1800	6,82	50
46	910	22	1500	8,9	82,3
47	930	57	2850	8,79	80,4
48	1000	100	1800	6,44	50
49	980	5	1500	9,22	87,4
50	700	32	2410	8,72	79,4

Interprétation :

Le tableau 4.5 représente trois variables de sortie (Qe, Dv, Nr) par apport trois entrées (Te, Es, Cb) lorsque nous avons utilisé neuf règles et trois fonctions d'appartenance du type gaussmf

D'après les valeurs d'entrée $Te=-5$; $Es=0$; $Cb=0$, nous obtenons la valeur minimale pour la quantité d'énergie 287 Wh, la durée de vie de la batterie 1.17 ans et le niveau de remplissage 10.1%.

Lors les valeurs d'entrée $Te=43$; $Es=850$; $Cb=40$, nous obtenons une valeur de quantité d'énergie maximale de 3030Wh, une durée de vie 9.13 ans et niveau de remplissage 85.9%.

Tableau 4.6 : résultats du system avec neuf règles d'inférence en utilisant les fonctions d'appartenance Trimf et Gaussmf

entrée			Sortie		
Te (c°)	Es (w/m ²)	Cb (%)	Qe (Wh)	Dv (années)	Nr (%)
-5	0	0	321	1,17	9,67
-3	150	30	474	2,02	14,2
-1	200	50	1160	4,45	30,7
0	250	10	424	1,6	12,7
2	100	40	486	2,52	14,5
4	300	90	1500	8,63	45
5	400	35	1500	7,87	45
6	450	60	1500	8,58	45
7	500	100	1500	8,9	45
8	600	28	1510	7,66	58,6
9	520	31	1510	7,75	59,1
10	580	56	1500	8,47	63,5
11	630	12	1520	7,49	74,2
12	700	34	2880	8,86	77,6
13	810	76	2760	8,95	78,8
14	5	19	486	2,28	14,5
15	50	32	486	2,28	14,5
16	100	80	1800	7,06	55,4
17	60	1	486	2,57	14,5
18	230	45	1320	4,87	35,8
19	310	90	1640	8,17	49,8
20	330	8	486	2,86	14,5
21	400	36	1500	5,5	45
22	470	68	2460	8,13	69,9
23	510	12	1500	8,19	75,5

24	900	52	3000	9,09	81,1
25	950	73	2900	8,91	78,1
26	1000	21	1500	8,36	75,5
27	870	59	2830	8,65	76,1
28	680	73	2880	8,87	77,7
29	0	28	486	3,77	14,5
30	30	57	486	3,88	14,5
31	80	100	1800	7	54,6
32	120	7	709	4,12	20,2
33	350	54	2810	8,42	75,5
34	360	98	2860	8,79	76,9
35	480	2	1800	6,88	53,9
36	490	48	2810	8,25	75,5
37	550	62	2830	8,63	76
38	580	31	2230	8,65	76,1
39	520	46	2750	8,56	75,7
40	670	58	2860	8,78	76,9
42	810	13	1500	9,12	81,7
43	850	40	3000	9,14	83,2
45	880	99	2590	6,54	70,7
46	910	22	1500	8,9	78,1
47	930	57	2890	8,87	77,7
48	1000	100	1790	6,17	75,5
49	980	5	1500	9,22	83,6
50	700	32	2510	8,78	76,9

Interprétation :

Le tableau 4.6 représente trois variables de sortie (Qe, Dv, Nr) par apport trois entrées (Te, Es, Cb) lorsque nous avons utilisé neuf règles et trois fonctions d'appartenance du type trimf et gaussmf

Nous constatons que la valeur de quantité d'énergie 1500 Wh s'est répétée à plusieurs reprises, et certaines d'entre elles étaient égales à 1800 Wh dans le tableau 4.4 (avec les fonctions d'appartenance seulement). Mais dans le mélange gaussmf et trimf elle est égale à 1500Wh.

4.2.1.2 Discussion du SIF et de ses fonctions d'appartenance en utilisant neuf règles floues :

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé neuf règles floues et constaté que les résultats se regroupaient autour de la valeur centrale de la plage pour la fonction "Trimf". Cependant, nous avons remarqué une répétition fréquente des mêmes valeurs (Qe : 1800Wh, Dv : 5 ans, Nr : 50 %), ce qui a soulevé des doutes quant à l'efficacité de la fonction "Trimf" dans notre système. En revanche, la fonction "Gaussmf" a bien fonctionné et a produit des valeurs raisonnables.

En combinant les résultats des deux fonctions, nous avons observé que la fonction "Gaussmf" couvrait efficacement les perturbations de la fonction "Trimf". Cela nous a conduit à conclure que la fonction "Gaussmf" était plus adaptée à notre système, car elle permettait d'obtenir des résultats plus cohérents et précis.

En résumé, notre étude suggère que la fonction "Gaussmf" est plus adaptée à notre système en raison de sa capacité à couvrir les insuffisances de la fonction "Trimf". Cependant, nous continuons à explorer d'autres possibilités d'amélioration et à rechercher des solutions plus performantes pour notre modèle flou.

En conclusion, il est essentiel de prendre en compte les risques d'incendie liés à la batterie photovoltaïque et de modéliser ce problème en utilisant la logique floue. Les deux facteurs principaux à considérer sont la température et le niveau de remplissage de la batterie, car ils peuvent avoir un impact significatif sur les risques d'incendie. Une température élevée peut entraîner une augmentation des risques d'incendie, car elle peut accélérer les réactions chimiques à l'intérieur de la batterie. De même, un niveau de remplissage élevé peut augmenter les risques de surcharge et de défaillance du système, ce qui peut également entraîner un incendie. En utilisant la logique floue, nous pouvons modéliser ces facteurs en définissant des règles et des fonctions d'appartenance qui prennent en compte les variations de température et de niveau de remplissage. Cela permettrait de quantifier le niveau de risque d'incendie en fonction de différentes combinaisons de ces variables. En identifiant les zones à risque élevé, des mesures de sécurité spécifiques peuvent être mises en place, telles que des systèmes de refroidissement supplémentaires ou des mécanismes de décharge pour prévenir les situations dangereuses.

4.2.2 Représentation graphique des résultats

Étant donné que Q_e est la sortie principale pour l'étude que nous menons et que T_e et E_s sont des facteurs principaux pour la production de Q_e , nous observons les variations de Q_e en fonction de T_e et E_s en introduisant les valeurs responsables du résultat maximal que nous avons atteint à travers les probabilités que nous avons expérimentées. Dans ces expériences, la valeur de Q_e était de 3030 Wh en utilisant la fonction gaussmf. L'objectif est de comprendre la relation entre chacun de ces facteurs et leur contribution à maximiser l'énergie possible

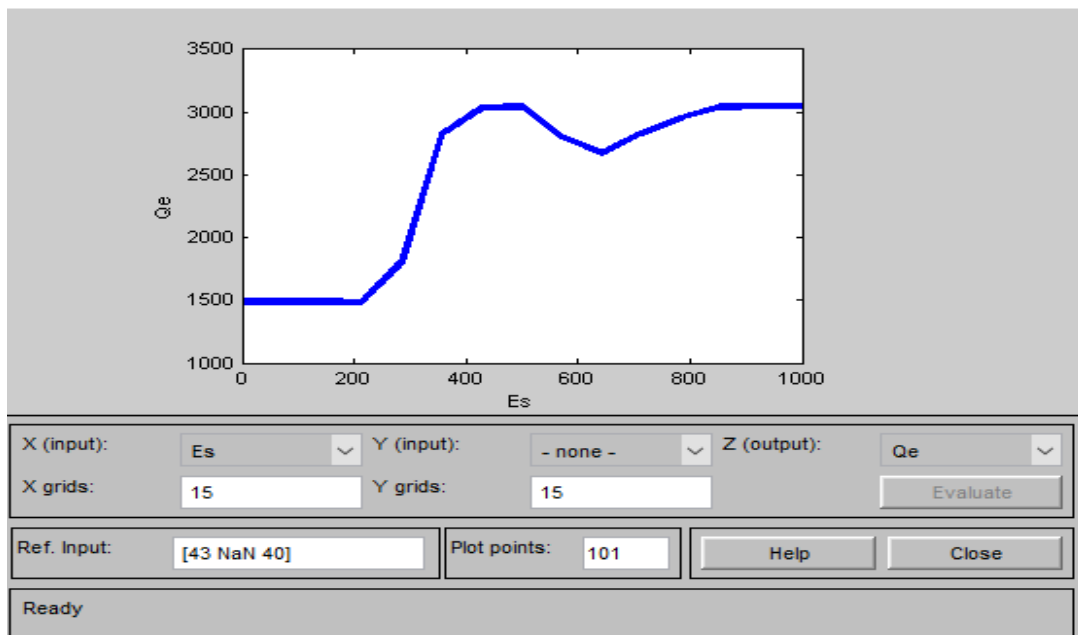


Figure 4.1 : Représentation graphique de la sortie Q_e par apport à E_s

4.2.2.1 Interprétation du résultat

La figure 4.1 montre la variation de la sortie quantité d'énergie (Q_e) par apport à l'ensoleillement (E_s)

- De 0W/m^2 à 200W/m^2 , l'ensoleillement est faible, ce qui entraîne une faible quantité d'énergie.
- De 200W/m^2 à 500W/m^2 , nous observons une augmentation de la quantité d'énergie avec l'augmentation d'ensoleillement.
- De 500W/m^2 à 650W/m^2 , nous remarquons une légère baisse de la quantité d'énergie, peut-être due à une consommation d'énergie de la batterie.
- De 650W/m^2 à 1000W/m^2 , l'ensoleillement est très fort, ce qui entraîne une augmentation significative de la quantité d'énergie, atteignant une valeur maximale estimée à 3030Wh.

Nous pouvons conclure que la quantité d'énergie est proportionnelle au ensoleillement, de sorte que plus l'ensoleillement est fort, plus la quantité d'énergie est élevée, et plus les rayons du soleil sont faibles, plus la quantité d'énergie diminue.

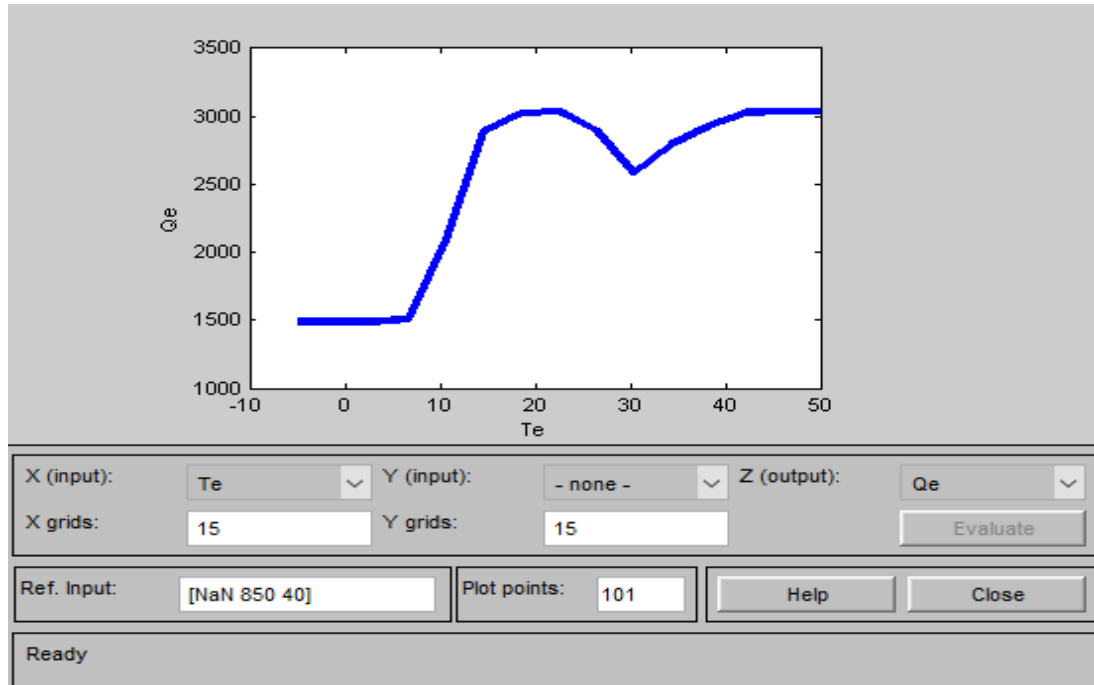


Figure 4.2 : Représentation graphique de la sortie Q_e par apport à T_e

La figure 4.2 montre la variation de la sortie quantité d'énergie (Q_e) par apport à la Température (T_e)

- De -5°C à 9°C , une température basse, on observe une faible quantité d'énergie.
- De 9°C à 20°C , avec l'augmentation de la température, la quantité d'énergie augmente également.
- De 20°C à 30°C , une température modérée, on constate une légère diminution de la quantité d'énergie, peut-être due à la consommation d'énergie de la batterie.
- De 30°C à 50°C , une température élevée, on observe une augmentation de la quantité d'énergie, atteignant son maximum estimé à 3030W.

On peut en conclure que plus la température augmente, plus la quantité d'énergie augmente, et plus la température diminue, plus la quantité d'énergie diminue.

4.2.2.2 Discussion

La logique floue permet de modéliser et de gérer les valeurs d'ensoleillement et de température d'une manière plus nuancée et flexible. Au lieu de simplement diviser les conditions en catégories strictes (faible, modérée, forte), la logique floue introduit des degrés de membership pour chaque catégorie. Par exemple, au lieu de dire que l'ensoleillement est soit faible, soit fort, nous pouvons attribuer un degré d'appartenance à chaque catégorie en fonction de la valeur réelle de l'ensoleillement. Cela permet de prendre en compte les variations subtiles et les transitions graduelles entre les différentes valeurs.

Dans le cas de l'ensoleillement, la logique floue nous permet de quantifier la quantité d'énergie produite en fonction des degrés d'appartenance aux différentes plages d'ensoleillement. Par exemple, lorsqu'il y a une augmentation progressive de l'ensoleillement, la logique floue peut prendre en compte cette augmentation graduelle et ajuster la quantité d'énergie produite en conséquence. De même, lorsque l'ensoleillement diminue légèrement dans la plage de 500W/m^2 à 650W/m^2 , la logique floue permet de modéliser cette baisse et d'ajuster la quantité d'énergie produite en conséquence.

De même, pour la température, la logique floue permet de prendre en compte les variations continues et graduelles de la température et leur impact sur la quantité d'énergie générée. Plutôt que de simplement diviser les températures en catégories discrètes, la logique floue nous permet de quantifier les variations subtiles et de modéliser la relation entre la température et la quantité d'énergie produite de manière plus précise.

En utilisant la logique floue, il est possible de développer des systèmes de contrôle qui prennent en compte simultanément l'ensoleillement et la température pour optimiser la quantité d'énergie générée par le système. Ces systèmes peuvent ajuster en temps réel les paramètres de fonctionnement du système, tels que la puissance de charge, pour maximiser l'efficacité et la performance globale.

En conclusion, la logique floue joue un rôle essentiel dans l'influence des valeurs d'ensoleillement et de température sur la quantité d'énergie générée par un système de batterie lithium-ion photovoltaïque. Elle permet de modéliser et de gérer les variations continues et graduelles de ces variables, ce qui conduit à une optimisation plus précise de la quantité d'énergie produite. En utilisant des techniques de logique floue, il est possible d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques et d'obtenir une meilleure quantité d'énergie dans des conditions environnementales variables.

4.3 Conclusion

Cette étude a démontré que la fonction "Gaussmf" est plus adaptée que la fonction "Trimf" pour modéliser les risques d'incendie liés à une batterie photovoltaïque. Bien que les deux fonctions aient montré des performances similaires dans certains scénarios, la fonction "Gaussmf" a mieux couvert les distributions complexes et asymétriques des données, offrant ainsi une meilleure adéquation dans ces cas spécifiques.

Cependant, il est important de souligner que nos résultats ne sont pas parfaits et qu'il reste des opportunités d'amélioration. Dans nos futures recherches, nous prévoyons de poursuivre cette étude en explorant d'autres formules de fonctions ou en ajustant les valeurs responsables des meilleurs résultats. Nous prévoyons également d'introduire le concept de poids des règles, en utilisant des ports, afin de mieux évaluer l'importance relative de chaque règle dans notre système. Cela nous permettra de mieux ajuster les paramètres et de trouver un équilibre optimal entre les différentes règles.

Ces conclusions mettent en évidence le potentiel de la logique floue pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques et optimiser la production d'énergie dans des conditions environnementales variables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette étude, nous avons examiné l'intégration de l'intelligence artificielle dans la gestion des énergies renouvelables de manière générale, et plus spécifiquement l'intégration de la logique floue dans la gestion d'un système d'énergie photovoltaïque. Nous avons utilisé cette approche d'intelligence artificielle pour améliorer les performances d'un système de batterie lithium-ion photovoltaïque.

Nous avons proposé une architecture pour ce système de logique floue et appliqué un ensemble de règles floues. En utilisant différentes fonctions d'appartenance, nous avons suivi toutes les étapes, de la fuzzification à la défuzzification. Malgré certaines difficultés rencontrées, telles que le manque de temps, nous avons réussi à obtenir des résultats satisfaisants. Ces résultats peuvent être développés et améliorés dans les futures recherches.

Après avoir étudié et discuté ces résultats, nous avons identifié des solutions préliminaires permettant d'obtenir la plus grande quantité d'énergie possible tout en évitant les risques d'incendie.

En résumé, ce projet a démontré l'importance de l'intelligence artificielle dans la gestion des systèmes d'énergie renouvelable, en particulier dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. L'intégration de la logique floue dans la gestion des batteries photovoltaïques au lithium-ion a montré des résultats prometteurs, ouvrant ainsi la voie à des avancées significatives en termes d'efficacité et de performance des systèmes d'énergie renouvelable. Ces travaux contribuent à la recherche continue visant à accélérer la transition énergétique et à promouvoir un avenir plus durable et écologique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Baoula, « Énergie renouvelable, croissance économique et atténuation des émissions de dioxyde de carbone dans les pays de l'UEMOA », *Rev. Int. Économistes Lang. Fr.*, 2022, Consulté le: 1 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/%C3%89nergie-renouvelable%2C-croissance-%C3%A9conomique-et-des-Baoula/0c4869cb1e8ca35b5a17e1d100b7e94a90393e02>
- [2] G. Aboïna, « Etude du confort et de gestion d'un ensemble hétérogène de dispositif de collecte, de stockage et distribution d'énergie renouvelable pour l'habitat individuel », 2020.
- [3] G. Gragnic, V. Chevalier, et F. Esperet, « La production d'énergie renouvelable à la station d'épuration d'Angers Loire Métropole », 2020.
- [4] M. M. Mounira, « Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable », Thèse de doctorat, BADJI MOKHTAR ANNABA, 2014.
- [5] « Capacité éolienne cumulée dans le monde 2000-2015 », *Statista*. <https://fr.statista.com/statistiques/570511/evolution-capacite-eolienne-cumulee-installee-dans-le-monde/> (consulté le 11 mars 2023).
- [6] D. N. Hafida, « L'énergie éolienne en Algérie ».
- [7] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [8] « Programme des Energies Renouvelables, CREG, Adrar, 17 mars 2015 Potentiel éolien en Algérie, CREG, Adrar, 17 mars 2015 ». <https://www.google.com/search?q=Programme+des+Energies+Renouvelables%2C+CREG%2C+Adrar%2C+17+mars+2015+Potentiel+%C3%A9olien+en+Alg%C3%A9rie%2C+CREG%2C+Adrar%2C+17+mars+2015&sourceid=chrome&ie=UTF-8> (consulté le 11 mars 2023).
- [9] « L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 mégawatts à Adrar », *Espace Manager*. <https://www.espacemanager.com/lalgerie-inaugure-sa-premiere-ferme-eolienne-de-10-megawatts-adrar.html> (consulté le 11 mars 2023).
- [10] S. Metatla, « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA », Thèse, Ecole nationale polytechnique, 2009. Consulté le: 11 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/6004>
- [11] « art088_figure8_eoliennes-Darrieus-Savonius.jpg (567×683) ». https://www.encyclopedie-energie.org/wp-content/uploads/2018/09/art088_figure8_eoliennes-Darrieus-Savonius.jpg (consulté le 11 mars 2023).
- [12] coyle franklin, *Vertical Axis, Savonius & Airborne Wind Turbine Vertical axis wind turbine PDF (Free | 202 Pages)*, 2016^e éd. Consulté le: 11 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.pdfdrive.com/vertical-axis-savonius-airborne-wind-turbine-vertical-axis-wind-turbine-d55102611.html>
- [13] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Grenoble INPG, 2005. Consulté le: 11 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2005INPG0176>
- [14] T. ZOHEIR, « Fig. I. 1 : Principaux organes du système de conversion éolien... », *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/1-Principaux-organes-du-systeme-de-conversion-eolien-Lenergie-eolienne-est-une-energie_fig1_265087995 (consulté le 11 mars 2023).

Bibliographie

- [15] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de doctorat, Paris, ENSAM, 2003. Consulté le: 11 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2003ENAM0022>
- [16] A. BEN AMAR, « Document Details | ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA », Thèse de magister, Hadj lakhdar-Batna, 2016. Consulté le: 11 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: http://theses.univ-batna.dz/index.php/theses-en-ligne/doc_details/4957-etude-de-la-commande-dun-systeme-eolien-base-sur-une-gada
- [17] B. Fellah, « Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah », Thèse de magister, Tlemcen, 2012. Consulté le: 12 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/2241>
- [18] A. BOUDEN et B. MARIR, « Analyse Optimisée De Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université Frères Mentouri - Constantine 1. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses-algerie.com>
- [19] admin-lk, « L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé », *Encyclopédie de l'énergie*, 25 avril 2018. <https://www.encyclopedie-energie.org/lenergie-solaire-photovoltaïque-pv-une-filiere-competitive-en-site-isole/> (consulté le 2 juillet 2023).
- [20] « Le solaire photovoltaïque en chiffres | EDF FR », 29 janvier 2021. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-solaire-photovoltaïque-en-chiffres> (consulté le 12 mars 2023).
- [21] N. Boubou-bouziani, « Potentiel et développement des énergies renouvelables en Algérie », *Commun. Sci. Technol.*, vol. 6, n° 1, p. 123-132, janv. 2017.
- [22] P. Avavian et C. Dupont, « QUESTIONS DE PHYSIQUE AUTOUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE », 2012.
- [23] A. Labouret et M. Villos, *Solar photovoltaic energy*. 2010. [En ligne]. Disponible sur: https://cerist.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwtV07T8MwELZ4dAAx8FTLS11gQUGO7cTpWAAIhFTUhVLEFDIOLCqVtKJBQvx67pxXG4mBgCWK7ShKfGfnzr7v00I4u6ROY00IIq2Zz5DcLhFCUmiQOgYITRQU5b7-cUfvIrRQPbrnK11278KHtpA9Aik_YPwq4dCA1yDCkAJSgBlwz6uqiXufuNLZ2_TbAorUKbG-iKxOL8qBAdjkj_ys4jrtD5dH40nk-l3GVJfRNQX-wI2vKzcF7DuIbhuPXDGvJwRdJlpuvEHqOLy0DvsYTricyQef4_HOrtKUuf5aZWscOqZMW76j-V0dZHI2K_Z50C6ni8L6yCnVhcuLak5cL94I4WKJwvKrbIzWK4j-rKF2JzP-cIvf7hN1hAGskNWknSXBc7QNu6Rjh3b7uLYdvOx3Sej-7vh7YNTpJhwIJBceo4B-1MihxmlRnEWSR27bsKCCAx6iaB6oGD7ZkYvDwtTYCa6xqudcSNoNxwdkC2FGIR0sxiFuM26UqlKNh9aHqhR-opQZUr4h64BjBlgqhDzvLPCmc5o0jIwjKLaRh4lv2IC8bC7CvrkHbjvko-h793HZGNWh2OyboBTU5OSEtb6u9TK8IfFIIOfg
- [24] C. hung Tran, « Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement », Thèse de doctorat, Reims, 2019. Consulté le: 12 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2019REIMS009>
- [25] S. Abouda, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompes. », Thèse de doctorat, Reims, 2015. Consulté le: 12 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2015REIMS005>

Bibliographie

- [26] M. Belhadj, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », These de magister, Bechar, 2008.
- [27] A. Roy, « Gestion optimale d'un système multi-sources pour un site isolé en mer », phdthesis, Université de Nantes (UNAM), 2019. Consulté le: 13 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/tel-02514912>
- [28] « Thomsea met au point une turbine hydroélectrique - Informateur Judiciaire ». <https://www.informateurjudiciaire.fr/actualites/thomsea-met-au-point-une-turbine-hydroelectrique/> (consulté le 2 juillet 2023).
- [29] « Production mondiale d'hydroélectricité ». <https://www.planete-energies.com/fr/media/chiffres/production-mondiale-dhydroelectricite> (consulté le 13 mars 2023).
- [30] « Qu'est-ce que l'énergie hydraulique ? | EDF FR », 4 septembre 2022. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique> (consulté le 2 juillet 2023).
- [31] M. M. Nasser, « Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés », phdthesis, Arts et Métiers ParisTech, 2011. Consulté le: 13 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00593845>
- [32] M. Adeline, « Énergie hydraulique : avantages et inconvénients », *TotalEnergies*, 8 avril 2020. <https://www.totalenergies.fr> (consulté le 14 mars 2023).
- [33] B. JEAN, *ÉNERGIES ALTERNATIVES - 2e édition*, Omiscience.la biomasse, 2^e éd. in Collection Écrin. 2011.
- [34] « LA CENTRALE BIOMASSE - Biovea Energie ». <https://biovea-energie.com/la-centrale-biomasse/> (consulté le 2 juillet 2023).
- [35] D. Hamiti et S. Bouzadi-daoud, « LA STRATEGIE ALGERIENNE DE TRANSITION ENERGETIQUE CONFORMEMENT AU PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES ET D'EFFICACITE ENERGETIQUE: ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT. », *مجلة الدراسات التجارية والاقتصادية المعاصرة*, vol. 4, n° 2, p. 594-622, juill. 2021.
- [36] S. Haddoum, A. Rahmani, R. r Ben Brahim, O. Zanndouche, et T. Ahmed Zaïd, « Etude du potentiel de biomasse forestière en vue du développement des filières bois énergie en Algérie », *Revue Energ. Renouvelables*, vol. 16, n° 3, p. 507-516, sept. 2013.
- [37] « Filière d'énergie renouvelable. L'énergie de la biomasse », 4e trimestre 2014, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/fiche-biomasse.pdf>
- [38] J.-S. Marcil, « La géothermie profonde : une ressource abondante absente du portfolio énergétique québécois », vol. 1, déc. 2021.
- [39] « Géothermie : exploiter la chaleur de la planète | IFPEN ». <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/geothermie-exploiter-chaleur-planete> (consulté le 2 juillet 2023).
- [40] S. Ouali, « Chauffage et rafraîchissement par la géothermie », vol. N°48, p. 2-5, févr. 2020.
- [41] M. Gehringer et V. Loksha, *Geothermal Handbook*. World Bank, Washington, DC, 2012. Consulté le: 15 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/10986/23712>

Bibliographie

- [42] G. Singh, A. Vedrtnam, et D. Sagar, « AN OVERVIEW OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE », 20 février 2013. doi: 10.13140/RG.2.2.20660.19840.
- [43] H. Merabti, « Étude des systèmes flous a intervalle », Mémoire de Magister, Université de Constantine 1, 2008. Consulté le: 16 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://library.crti.dz/mg90>
- [44] J. Godjevac, *Idées nettes sur la logique floue*. PPUR presses polytechniques, 1999.
- [45] F. Dernoncourt, « Introduction à La Logique Floue », août 2011.
- [46] A. Soukkou, A. Khellaf, et S. Leulmi, « SUPERVISION NEURO-FLOUE A APPRENTISSAGE GENETIQUE D'UN PID ROBUSTE », *Sci. Technol. B Sci. L'ingénieur*, n° 23, p. 95-106, juin 2005.
- [47] Z. Mohammed Lamine, « “Synthèses Des Techniques de Commande DTC Associe à L'intelligence Artificielle Appliquée au Contrôle D'un Moteur Asynchrone Alimenté par Onduleur Multi-Niveaux” », These de doctorat, USTO-Mohamed Boudiaf D'Oran, 2017.
- [48] D. Antoine Crochet, « Journal du net Fr », 29 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.journaldunet.fr/web-tech/guide-de-l-intelligence-artificielle/1501851-reseau-de-neurones-artificiels/>
- [49] M. Djekoun, R. Djebbar, S. Bensoltane, et L. Ghrieb, « CONTRIBUTION DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS (RNA) A LA CARACTERISATION D'UN STRESS OXYDATIF CHEZ *Saccharomyces cerevisiae* INDUIT PAR LE CADMIUM. MISE EN EVIDENCE D'UN BIOMARQUEUR POTENTIEL (CAS DU MALONDIALDEHYDE », *Sci. Technol. C Biotechnol.*, n° 33, p. 16-22, juin 2011.
- [50] F. z Bessai, M. Krelifaoui, et M. Guergab, « Utilisation des cartes auto-organisatrices de Kohonen dans la recherche documentaire », *Rev. Inf. Sci. Tech.*, vol. 13, n° 1, p. 31-52, mai 2003.
- [51] V. Haghnejad *et al.*, « L'Apprentissage Automatique Supervisé (AAS), une branche de l'Intelligence Artificielle (IA), dans la segmentation et les mesures d'images microscopiques », *Morphologie*, vol. 106, n° 354, Supplement, p. S20-S21, sept. 2022, doi: 10.1016/j.morpho.2022.06.093.
- [52] D. Kumar et B. S. Surjan, « Transient Stability Analysis Using MATLAB Simulink and Neural Network », 2013. Consulté le: 2 juillet 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Transient-Stability-Analysis-Using-MATLAB-Simulink-Kumar-Surjan/36c997cc2078b89cd6c0b4c4bb1c83579460573c>
- [53] A. Benlaria et L. Boubekeur, « Forecasting Exchange Rates Using Artificial Neural Networks », *مجلة البشائر الاقتصادية*, vol. 7, n° 2, p. 804-814, août 2021.
- [54] K. Kasambya Moïse, H. Nsenge, et V. Baraka, « Déploiement mobile d'un réseau de neurones profond pour l'identification des étudiants de l'UAC/ISDA en salle d'examens », *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 39, p. 136-155, mars 2023.
- [55] A. Géron, *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*, 2nd edition., vol. 8,9,10. Beijing China ; Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2019.
- [56] S. Marsland, *Machine Learning: An Algorithmic Perspective, Second Edition*, 2nd éd. Chapman & Hall/CRC, 2014.
- [57] B. Mahesh, « Machine learning algorithms-a review », *Int. J. Sci. Res. IJSRInternet*, vol. 9, p. 381-386, 2020.
- [58] « K-Means Clustering Algorithm - Javatpoint ». <https://www.javatpoint.com/k-means-clustering-algorithm-in-machine-learning> (consulté le 2 juillet 2023).
- [59] A. J. N. LALI, « Introduction à l'apprentissage par renforcement ».

Bibliographie

- [60] V. Kumar et M. L., « Deep Learning as a Frontier of Machine Learning: A Review », *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 182, p. 22-30, juill. 2018, doi: 10.5120/ijca2018917433.
- [61] J. Johnson, « What's a Deep Neural Network? Deep Nets Explained », *BMC Blogs*. <https://www.bmc.com/blogs/deep-neural-network/> (consulté le 2 juillet 2023).
- [62] Z. Hao, « Deep learning review and discussion of its future development », *MATEC Web Conf.*, vol. 277, p. 02035, janv. 2019, doi: 10.1051/mateconf/201927702035.
- [63] S. Timilsina, S. Sharma, et J. Aryal, « MAPPING URBAN TREES WITHIN CADASTRAL PARCELS USING AN OBJECT-BASED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK », *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. IV-5/W2, p. 111-117, déc. 2019, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-5-W2-111-2019.
- [64] C. Mishra et D. Gupta, « Deep Machine Learning and Neural Networks: An Overview », *IAES Int. J. Artif. Intell. IJ-AI*, vol. 6, p. 66, juin 2017, doi: 10.11591/ijai.v6.i2.pp66-73.
- [65] T. Tiwari, T. Tiwari, et S. Tiwari, « How Artificial Intelligence, Machine Learning and Deep Learning are Radically Different? », *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng.*, vol. 8, p. 1, mars 2018, doi: 10.23956/ijarcsse.v8i2.569.
- [66] S. Bhosale, V. Pujari, et M. Multani, « Advantages And Disadvantages Of Artificial Intelligence », févr. 2020.
- [67] S. Mohajer, « Stratégies de charge rapide de batteries lithium-ion prenant en compte un modèle de vieillissement », thesis, Bordeaux, 2019. Consulté le: 22 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019BORD0027>
- [68] « Notre gamme de batteries Lithium / Powerbank utilisables en solaire - Prix & capacités. », *Solaris - Expert de l'autonomie solaire*. <https://www.solaris-store.com/144-batterie-solaire-lithium> (consulté le 22 mai 2023).
- [69] « Batterie au Lithium | Batterie Solaire ». <https://www.ecolodis-solaire.com/batterie-au-lithium-150> (consulté le 22 mai 2023).
- [70] S. Paarmann, L. Cloos, J. Technau, et T. Wetzel, « Measurement of the Temperature Influence on the Current Distribution in Lithium-Ion Batteries », *Energy Technol.*, vol. 9, n° 6, p. 2000862, 2021, doi: 10.1002/ente.202000862.
- [71] A. Laniepce, « Introduction de données énergétiques dans l'urbanisme : mise au point d'outils d'optimisation et d'évaluation de l'enseillement d'un projet », 1985. Consulté le: 22 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-de-donn%C3%A9es-%C3%A9nerg%C3%A9tiques-dans-%3A-mise-au-Laniepce/269fcf5b78ebc95dd33e0b3c301c9c86d74e41d8>
- [72] M. B. Diallo, « Estimation et prévision de l'enseillement en zone intertropicale », 2018.
- [73] M. André, « Proposition d'un modèle de prévision spatio-temporel à court terme de l'enseillement global, à partir de trois sites en Guadeloupe », oct. 2015. Consulté le: 22 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Proposition-d'un-mod%C3%A8le-de-pr%C3%A9vision-%C3%A0-court-terme-Andr%C3%A9/446c9bbb91045679a904965b866b8c23454f21d7>
- [74] O. Caumont, « Détermination de l'état de charge d'une batterie plomb acide en utilisation véhicule électrique », 1997. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/D%C3%A9termination-de-l%C3%A9tat-de-charge-dune-batterie-en-Caumont/36a75ce214f47ffad893b42770491bf3199b3ecc>

- [75] S. Mohajer, « Stratégies de charge rapide de batteries lithium-ion prenant en compte un modèle de vieillissement », mars 2019. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Strat%C3%A9gies-de-charge-rapide-de-batteries-prenant-en-Mohajer/1c920b9ed76254e09e07468eddd93b37cbd3aed4>
- [76] M. Kirimoto *et al.*, « Système de charge/décharge d'appareil d'accumulation d'électricité », déc. 2013. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Syst%C3%A8me-de-charge-d%C3%A9charge-d'appareil-d%C3%A9lectricit%C3%A9-Kirimoto-%E6%A1%90%E6%9C%AC/f4a19b6c1b49623a6dd41e8255272820b1f961c9>
- [77] B. Kabisher, T. Khason, et Y. Gilboa, « Approximation de la distance restant à parcourir d'un véhicule alimenté par une batterie », janv. 2013. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Approximation-de-la-distance-restant-%C3%A0-parcourir-Kabisher-Khason/8e7eb87c5d365f4d867f75f252a4560e3651af0d>
- [78] J. Li, Z. Jiang, Y. Jiang, W. Song, et J. Gu, « The State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery Based on Battery Capacity », *J. Electrochem. Soc.*, 2022.
- [79] M. Dahmardeh et Z. Xi, « State-of-Charge Uncertainty of Lithium-Ion Battery Packs Considering the Cell-to-Cell Variability », *ASCE-ASME J Risk Uncert Engrg Sys Part B Mech Engrg*, 2019.
- [80] A. Sivert, B. Vacossin, T. Lequeu, et F. Betin, « Capacité énergétique, diagnostic, durée de vie de batterie Lithium Application à l'estimation de l'autonomie d'un véhicule électrique », juin 2016. Consulté le: 23 mai 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Capacit%C3%A9-%C3%A9nerg%C3%A9tique%2C-diagnostic%2C-dur%C3%A9e-de-vie-de-%C3%A0-Sivert-Vacossin/853a92dcf89d9b19024dc4ca6578afc5e0e3da59>
- [81] S. Bodenbarg et J. Lunze, « Plug-and-Play Control — Definition and Realisation in MATLAB », in *auto*, juill. 2013, p. 487-494. doi: 10.1524/auto.2013.0042.
- [82] « LE CLIMAT DU SAHARA ». <https://www.assikel.com/news/35-le-climat-du-sahara> (consulté le 14 juin 2023).
- [83] « Ensoleillement », *Energie Plus Le Site*, 22 septembre 2010. <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/> (consulté le 14 juin 2023).
- [84] « EU stock 12V 300Ah LiFePO4 With BT Batteries Pack Basen Lithium Ion Battery – Basengreen | CATL LiFePO4 | Battery pack | Fast delivery ». <https://www.basengreen.com/product/eu-stock-fast-delivery-12v-300ah-lifepo4-with-bt-batteries-pack-basen-best-solar-system-lithium-ion-battery/> (consulté le 14 juin 2023).