

N° Ordre ...../DGM/FT/UMBB/2023

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



**Faculté de Technologie Département de Génie Mécanique**

## **Mémoire de Fin d'Études**

**En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en : Filière : Génie  
Mécanique**

**Spécialité : Energétique**

### **THEME**

**Prédiction de la Production d'hydrogène par le procédé de  
Fermentation en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA)**

Présenté par :

**M<sup>elle</sup> CHEBBAB Lilya**

**M<sup>elle</sup> BENCHEMAM Nada Amani**

Promoteur :

**Dr. HIMRANE Nabil**

Co-Promoteur :

**Dr. MOUGARI Nour Elislam**

Promotion 2022-2023

# **Remerciement**

*Ce travail est le résultat de longues années d'études. Durant toutes ces années, nous avons suivi les enseignements de nos professeurs, qui ont fait de leur mieux pour nous transmettre leurs connaissances. Malgré des moments compliqués, nous avons continué d'y croire et de tracer notre chemin. Et nous arrivons finalement à la fin de ce cycle d'étude. Nous tenons tout d'abord à remercier les membres du Jury pour leur présence, Leur lecture Attentive, ainsi que pour les remarques qu'ils nous adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer notre travail. Nous tenons à exprimer toute notre gratitude envers notre Promoteur **Dr. Himrane Nabil**, qui nous a encadré et suivi durant la réalisation de notre mémoire*

*Nous remercions vivement **Dr Mougari Nour Elislam** qui nous a aidé, orienté et soutenu tout le long de ce travail*

*Nous remercions sincèrement tous nos professeurs, qui nous ont enseigné et transmis leurs connaissances durant toutes ces années.*

**Lilya, Nada**

## ***Dédicaces***

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude a mes chers parents. Pour leur patience et leurs encouragements.*

*A mon frère et ma sœur a toute ma famille, mes proches et mes amies.*

*A mon binôme DEYDEY , merci pour les moments qu'on a passés ensemble.*

***Lilya***

## **Dédicaces**

*En ce moment de fierté et de réalisation, je souhaite dédier mon mémoire de fin d'études à ma très chère mère, mon très cher père et mes frères Racim et Kamil. Votre soutien et vos encouragements constants ont été les piliers qui m'ont permis d'atteindre cette étape importante de mon parcours académique.*

*A toute ma famille, petite et grande, proche et lointaine, ma famille du Handball.*

*A toutes mes amies.*

*A mon binôme LEYLEY, merci pour les moments qu'on a passés ensemble.*

Que cette dédicace soit le témoignage de ma gratitude infinie envers vous. Je suis fière de faire partie de cette famille.

**Nada**

## **Résumé**

L'épuisement des énergies fossiles est un défi majeur pour l'humanité, car leur utilisation massive, en tant que principale source d'énergie pendant des décennies, a des conséquences néfastes sur l'environnement. La production du bio hydrogène à partir des déchets a attiré l'attention en tant que sources d'énergie renouvelable et respectueuse pour l'environnement. Le présent travail présente le développement des modèles basés sur l'approche des réseaux de neurones artificiels (RNA), pour la prédiction du bio hydrogène et bio butanol en utilisant les déchets comme matières première par le procédé de la fermentation. Deux modèles ont été proposés, dans le premier modèle, la température, l'espace libre de la cuve du réacteur (Headspace), la supplémentation en acide butyrique sont pris comme paramètres d'entrée et la production du bio hydrogène comme paramètre de sortie. Dans le deuxième modèle, la production du bio butanol est pris comme paramètre de sortie. Pour les deux produits de fermentation le modèle utilisé est basé sur une seule couche cachée avec 11 neurones et une fonction d'activation Tan-sigmoïde. L'ensemble de données a présenté une valeur de  $R^2$  (coefficient de détermination) maximales de 0,99881 pour la prédiction de la production du bio hydrogène, et une valeur de  $R^2$  de 0,99977 pour la prédiction de la production du bio butanol. Ces résultats révèlent que l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels est robuste avec une capacité prédictive élevée pour la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène et du bio butanol à partir des déchets par le procédé de la fermentation, en raison de sa vitesse et de sa capacité d'apprentissage.

**Mots clés :** Valorisation de déchets, fermentation ; Réseaux de neurones artificiels (RNA), production d'hydrogène ; coefficient de détermination  $R^2$ .

## **Abstract:**

The depletion of fossil fuels is a major challenge for humanity, as their extensive use as the primary source of energy for decades has had detrimental effects on the environment. The production of biohydrogen from waste materials has gained attention as a renewable and environmentally friendly energy source. This study presents the development of models based on artificial neural networks (ANNs) for predicting biohydrogen and biobutanol production using waste materials through the fermentation process.

Two models were proposed. In the first model, parameters such as temperature, reactor headspace, nutrient content in the medium, and butyric acid supplementation were considered as input parameters, while the biohydrogen production yield was the output parameter. In the second model, the biobutanol production yield was the output parameter. The results demonstrated a strong correlation between experimental values and predicted values. Performance analysis showed that the models exhibited high accuracy.

The dataset achieved a maximum  $R^2$  value of 0.99881 for predicting biohydrogen production yield and a value of 0.99977 for predicting biobutanol production. These results indicate that the ANN-based approach is robust, with high predictive capability for biohydrogen and biobutanol production yield prediction from waste materials through the fermentation process. This is due to its speed and learning capacity.

Keywords : Waste valorization, fermentation ; Artificial neural networks (ANNs), hydrogen production ; coefficient of determination  $R^2$ .

## ملخص

يشكل نضوب الطاقة الأحفورية تحديًا كبيرًا أمام البشرية، نظرًا للتأثيرات السلبية لاستخدامها الواسع كمصدر رئيسي للطاقة على مر العقود على البيئة. لقد أثار إنتاج الهيدروجين الحيوي من النفايات اهتمامًا كمصدر للطاقة المتجددة والمحترمة للبيئة. يقدم هذا لتوقع إنتاج الهيدروجين الحيوي والبيوبوتانول (ANNs) العمل تطوير نماذج استنادًا إلى نهج الشبكات العصبية الاصطناعية باستخدام النفايات كموا د خام عن طريق عملية التخمر. تم اقتراح نموذجين، حيث تم اعتبار درجة الحرارة ومساحة الفضاء الحر والإضافة المكملة للحمض البيوتيريك كمعاملات الإدخال وإنتاج الهيدروجين الحيوي (Head space) في حوض التفاعل كمعاملة الإخراج في النموذج الأول. وفي النموذج الثاني، تم اعتبار إنتاج البيوبوتانول كمعاملة الإخراج. للمنتجين المتحللين تم استخدام نموذج يعتمد على طبقة مخفية واحدة تحتوي على 11 خلية عصبية ووظيفة تنشيط تانجنتية. أظهرت مجموعة البيانات تبلغ 0.99977 لتوقع إنتاج  $R^2$  (معامل التحديد) القصوى تبلغ 0.99881 لتوقع إنتاج الهيدروجين الحيوي، وقيمة  $R^2$  قيمة البيوبوتانول. تكشف هذه النتائج أن النهج القائم على الشبكات العصبية الاصطناعية قوي بقدرته التوقعية العالية لأداء إنتاج والبيوبوتانول من النفايات عن طريق عملية التخمر، نظرًا لسرعته وقدرته على التعلم الهيدروجين الحيوي

الكلمات المفتاحية : تثمين النفايات، التخمر؛ الشبكات العصبية الاصطناعية، إنتاج الهيدروجين؛ معامل التحدي  $R^2$

## **Table des matières**

<i>Remerciement</i> .....	
Table des matières .....	
Liste des tableaux .....	
Liste des figures.....	
Introduction générale.....	1

### **Chapitre I Classification et gestion des déchets**

I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition des déchets .....	3
I.2.1 Définition économique de "déchet" .....	3
I.2.2 Définition juridique de "déchet" .....	3
I.2.3 Définition sociologique de "déchet" .....	4
I.3 Classifications des déchets .....	4
I.3.1 Selon leur nature .....	4
I.3.2 Selon le mode de traitement et d'élimination .....	4
I.3.3 Selon l'origine .....	5
I.3.4 Selon le comportement et les effets sur l'environnement .....	5
I.3.5 Selon le mode d'enlèvement des déchets .....	6
I.4 Système de gestion des déchets .....	6
I.5 Production des déchets .....	7
I.5.1 Production de déchets dans le monde .....	7
I.5.2 Production et gestion de déchets en Algérie .....	8
I.6 Cadre législatif sur la gestion des déchets .....	9
I.7 Définition de la valorisation .....	10
I.7.1 La valorisation de la matière .....	11
I.7.2 La valorisation organique.....	11
I.7.3 Valorisation énergétique .....	14
I.8 Production d'hydrogène .....	15
I.9 Modes de production d'hydrogène.....	15
I.10 Avantages et Inconvénients de l'hydrogène.....	18
I.11 Valorisation des déchets en Algérie .....	19

### **Chapitre II : Réseaux de Neurones Artificiel**

II.1 Introduction.....	22
II.2 Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).....	22
II.3 Définition .....	23
II.4 Neurone biologique.....	23
II.5 Neurone artificiel .....	24
II.6 Fonction d'activation .....	25

II.7	Architecture des Réseau de neurones.....	26
II.7.1	Réseaux Feed-forward.....	27
II.7.2	Réseaux de rétroaction.....	30
II.8	L'apprentissage des réseaux de neurones.....	30
II.9	Utilisations des réseaux de neurones.....	31
II.10	Les types des réseaux de neurones.....	31
II.11	Conclusion.....	32

### **Chapitre III : Prédiction de la production d'hydrogène**

III.1	Introduction.....	33
III.2	Matériel et méthodes.....	33
III.2.1	Collecte des données.....	33
III.2.2	Normalisation des données.....	33
III.2.3	Développement des modèles.....	39
III.2.4	Analyses statistiques.....	40
III.3	Résultats et discussion.....	40
III.3.1	Architecture des modèles développés.....	40
III.3.2	Résultats de la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène et bio butanol :.....	43
III.4	Conclusion.....	50
	Conclusion générale.....	52
	Références.....	54

## Liste des tableaux

Tableau II- 1: Analogie entre neurone biologique et neurone artificiel. ....	25
Tableau II- 2: Fonctions d'activation couramment utilisées. ....	26
Tableau III- 1: Données d'hydrogène non normalisées.....	35
Tableau III- 2: Données de butanol non normalisés.....	36
Tableau III- 3: Données d'hydrogène normalisées.....	37
Tableau III- 4: Données de butanol normalisées. ....	38
Tableau III- 5: Résultats des essais pour le premier modèle. ....	41
Tableau III- 6: Résultats des essais pour le deuxième modèle. ....	41
Tableau III- 7: Paramètres détaillés des deux modèles. ....	42
Tableau III- 8: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de l'hydrogène.....	47
Tableau III- 9: Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de butanol	49

## Liste des figures

Figure I- 1: Cycle de vie des déchets .....	7
Figure I- 2: Production de déchets projetée, par région (millions de tonnes/an).....	8
Figure I- 3: Le cycle de compost de déchets organiques .....	12
Figure I- 4: Processus de méthanisation .....	14
Figure I- 5: Hydrogene production et consommation dans le monde .Près de 96% de la production mondiale d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles. ....	16
Figure I- 6: La chaîne hydrogène.....	18
Figure II- 1: Structure d'un réseau de neurones biologiques.....	22
Figure II- 2: simplifié d'un neurone biologique .....	23
Figure II- 3: le neurone artificiel .....	25
Figure II- 4: Composition d'un réseau de neurones artificiels. ....	27
Figure II- 5: Architecture d'un perceptron monocouche .....	28
Figure II- 6: Architecture du perceptron multicouche (MLP).....	28
Figure II- 7: Structure d'un réseau de neurones de type RBF.....	29
Figure III- 1: Architecture du modèle RNA pour la prédiction de la production du bio hydrogène. .....	42
Figure III- 2: Architecture du modèle RNA pour la prédiction de la production du bio butanol. ....	43
Figure III- 3: Changements de l'erreur quadratique moyenne avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : prédiction de la production d'hydrogène.....	44
Figure III- 4: Changements de l'erreur quadratique moyenne avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : Prédiction de la production du bio butanol.....	44
Figure III- 5: Graphiques de régression du RNA pour la prédiction du rendement de la production d'hydrogène.....	45
Figure III- 6: Graphiques de régression du RNA pour la prédiction de la production du bio butanol. ....	46

---

# Introduction générale

---

## **Introduction générale :**

L'épuisement des énergies fossiles constitue l'un des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée aujourd'hui. Les combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ont été la principale source d'énergie pendant des décennies. Cependant, leur utilisation massive a des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en contribuant au réchauffement climatique.

Face à cette situation, la recherche de sources d'énergie alternatives et durables est devenue une priorité. L'hydrogène émerge comme une solution prometteuse, offrant un potentiel considérable pour remplacer les combustibles fossiles. L'une des méthodes de production d'hydrogène les plus intéressantes est l'utilisation et la valorisation des déchets comme matière première, en effet Les sources de biomasses en particulier les biocarburants sans émission de carbone ont attirés beaucoup d'attention, leurs utilisations dans les industries chimique et bio chimique ont été considérer comme une source d'énergie fiable

Les déchets organiques, tels que les résidus alimentaires, les déchets agricoles et les boues d'épuration, sont riches en matières organiques qui peuvent être converties en hydrogène, il existe plusieurs types de production comme la gazéification et méthanisation ...etc.

Une autre approche pour produire de l'hydrogène à partir de déchets est la fermentation. Cette méthode est la voie biologique la plus efficace pour produire du bio hydrogène et bio butanol car la récupération d'énergie est élevée, En utilisant des sources d'énergie renouvelable, la fermentation peut être une solution durable et respectueuse de l'environnement.

La sélection et la surveillance des paramètres qui influencent la production de bio hydrogène et bio butanol jouent un rôle essentiel dans l'optimisation du processus de fermentation, Néanmoins dans les études expérimentales ces tests coutent cher et prennent beaucoup de temps, D'autre part, développer un modèle précis par les méthodes numériques classique s'avère difficile en raison de la nature complexe. De ce fait, la méthode des réseaux de neurones artificiels peut représenter une alternative fiable pour développer un modèle précis, les performances de la production du bio hydrogène et bio butanol peuvent être modélisées à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNA).

Les RNAs peuvent être utilisés pour résoudre une grande variété de problèmes en science et en ingénierie, en particulier dans certains domaines où les méthodes de modélisation conventionnelles échouent. La capacité prédictive d'un RNA résulte de l'apprentissage sur des

données expérimentales puis de la validation par des données indépendantes. Un modèle RNA peut prendre en charge plusieurs variables d'entrée pour prédire plusieurs variables de sortie.

Notre travail consiste à développer un modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la production du bio hydrogène et bio butanol en utilisant les déchets comme matières première par le procédé de la fermentation. Deux modèles ont été proposés, dans le premier modèle, la température, l'espace libre de la cuve du réacteur (Headspace), la supplémentation en acide butyrique sont pris comme paramètres d'entrée et la production du bio hydrogène comme paramètre de sortie. Dans le deuxième modèle, la production du bio butanol est pris comme paramètre de sortie.

Le présent mémoire est organisé en trois (03) chapitres comme suit :

**Chapitre 1** : Présente, dans la première partie, un aperçu sur la classification et gestion des déchets, au monde et en Algérie, dans la deuxième partie, un aperçu sur la production d'hydrogène, et son mode d'utilisation dans l'industrie chimique et biochimique.

**Chapitre 2** : présente une description et une analyse de l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels qui est utilisée dans ce travail, y compris son concept de base.

**Chapitre 3** : présente le développement des modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la production du bio hydrogène et bio butanol par le procédé de la fermentation, ainsi que les résultats et discussion.

---

# Chapitre I

## Classification et gestion des déchets

---

**I.1 Introduction :**

Ce chapitre présente, dans la première partie, un aperçu sur la classification et gestion des déchets, au monde et en Algérie. Et dans la deuxième partie, un aperçu sur la production d'hydrogène, et son mode d'utilisation dans l'industrie chimique et biochimique.

**I.2 Définition des déchets :**

Un déchet est un produit ou une substance qui n'est plus adapté à l'usage auquel il est destiné. Pour les législateurs et les gouvernements, définir et classer les déchets en fonction des risques liés à l'environnement et à la santé humaine sont donc importants afin d'assurer une gestion appropriée et efficace des déchets. Pour le producteur ou le détenteur, évaluer si un matériau est un déchet ou non est important pour déterminer si les règles relatives aux déchets doivent être suivies. Les définitions sont également pertinentes pour la collecte et l'analyse des données sur les déchets ainsi que pour les obligations de déclaration nationales et internationales.

**I.2.1 Définition économique de "déchet" :**

Un déchet est défini comme étant un objet ou une matière dont la valeur économique est nulle ou négative, pour son détenteur, à un moment et dans un lieu donné. Pour s'en débarrasser, le détenteur devra payer quelqu'un ou faire lui-même le travail (contrairement à un bien qui a une valeur économique positive et donc un acquéreur pour lequel on doit payer un prix). Cette définition de la nullité de valeur reste cependant relative car les déchets des uns peuvent servir de matières premières secondaires pour la fabrication d'autres produits voire même des biens pour d'autres personnes ou communautés aussi bien dans les pays développés ou industrialisés (PI) que dans ceux en développement selon l'expression « les résidus des uns font le bonheur des autres » [1].

**I.2.2 Définition juridique de "déchet" :**

Sur le plan juridique, la question est surtout de savoir comment une chose est requalifiée comme déchet : la réponse ne concerne pas tant des caractéristiques techniques ou formelles d'une chose mais est liée à l'action de se défaire. Au niveau européen, un déchet correspond à toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou l'obligation de se défaire en vertu des dispositions nationales en vigueur [2].

### **1.2.3 Définition sociologique de "déchet" :**

Socialement, les déchets s'accompagnent de jugements de valeur négatifs. Ils sont disqualifiés, comportent une connotation malsaine, suscitent souvent de la répulsion voire du dégoût et nécessitent une séparation, une ségrégation, une exclusion, un rejet [3].

## **I.3 Classifications des déchets :**

### **I.3.1 Selon leur nature :**

La classification des déchets d'après leur nature aboutit à trois catégories essentielles : Déchets solides, Déchets liquides et Déchets gazeux. Dans ce qui suit, il ne sera considéré que les déchets solides et semi-solides étant donné le contexte et l'objet de l'étude.

### **I.3.2 Selon le mode de traitement et d'élimination :**

Professionnels et chercheurs s'accordent à regrouper les déchets solides en quatre grandes familles, selon :

- ❖ **Les déchets inertes** : généralement constitués d'éléments minéraux stables ou inertes au sens de leur incompatibilité avec l'environnement et proviennent de certaines activités d'extraction minières ou de déblais de démolition (terres, gravats, sables, stériles, ...etc.)
- ❖ **Les déchets banaux** : cette catégorie regroupe essentiellement des déchets constitués de papiers, plastiques, cartons, bois produit par des activités industrielles ou commerciales et ordures ménagères.
- ❖ **Les déchets spéciaux** : ils peuvent contenir des éléments polluants et sont spécifiquement issus de l'activité industrielles (boues de peintures ou d'hydroxyde métallique, cendre d'incinération...etc.). Certains déchets sont aussi dits spéciaux lorsque leur production importante sur un même site entraîne des effets préjudiciables pour le milieu naturel (mâchefers des centrales thermiques, phosphogypse [sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4$ ], ainsi que certains déchets provenant des laboratoires de recherches universitaires et hospitaliers...etc.).
- ❖ **Les déchets dangereux** : issus de la famille des déchets spéciaux, ils contiennent des quantités de substances toxiques potentiellement plus importantes et présentent de ce fait beaucoup plus de risques pour le milieu naturel (poussières d'aciéries, rejets organiques complexes, bains de traitement de surface contenant soit du chrome, cyanure

ou une forte acidité, les matériaux souillés par les P.C.B (polychlorobiphényles), les déchets de C.F.C (chlorofluorocarbures) et mercuriels [4].

### **I.3.3 Selon l'origine :**

Pour les besoins de ce travail, on a opté pour une classification comprenant seulement deux (02) grandes classes de déchets solides on se basant sur la source de déchets : Déchets industriels et Déchets urbains.

- ❖ **Les déchets industriels** : hormis les résidus assimilables aux ordures ménagères, tant par leur nature que par leur volume modeste, on distingue dans cette classe :
  - Les déchets inertes provenant de chantiers de construction, transformation des combustibles et de l'énergie (gravats, cendres, ...etc.), métallurgie (scories, laitiers, mâchefers, ...etc.).
  - Les déchets des industries agricoles et alimentaires – Les déchets pouvant contenir des substances toxiques par des industries variables (ex. : ateliers artisanaux, galvanoplastie, chromage, miroiterie, etc.).
  - Les déchets radioactifs issus du transport et de la destruction des déchets industriels posent des problèmes particuliers dont la solution - consentie ou imposée - devra être à la charge des industries polluantes avec si besoin une aide appropriée des gouvernements.
- ❖ **Les déchets urbains** : à partir de la notion « d'ordure ménagère », vocable par lequel on a longtemps désigner les résidus des ménages correspondants, de par leur origine et leur nature, à une certaine limitation en quantité et en dimension, on a été conduit du fait de l'évolution du niveau de vie répercuté par les caractéristiques quantitatives et qualitatives des déchets, à passer à la notion plus générale de résidus ou déchets urbains.

### **1.3.4 Selon le comportement et les effets sur l'environnement :**

A ce titre on distingue :

- ❖ **Les déchets inertes** : pouvant être différenciés suivant leur caractère plus ou moins encombrant, en débris plus ou moins volumineux jusqu'aux carcasses d'automobiles, chars, avions, bus, etc. (Remarque : Le caractère inerte des déchets n'est pas absolue car ils peuvent dissimuler d'autres pollutions d'origines diverses ou être eux-mêmes source de danger).
- ❖ **Les déchets fermentescibles** : principalement constitués par la matière organique, animale ou végétale à différents stades de fermentation aérobies ou anaérobies.

- ❖ **Les déchets toxiques** : poisons chimiques ou radioactifs qui sont générés soit par des industries, soit par des laboratoires ou tout simplement par des particuliers qui se débarrassent avec leurs ordures de certains résidus qui devraient être récupérés séparément (ex : flacons de médicaments, seringues, piles et autres gadgets électroniques ...etc.) .

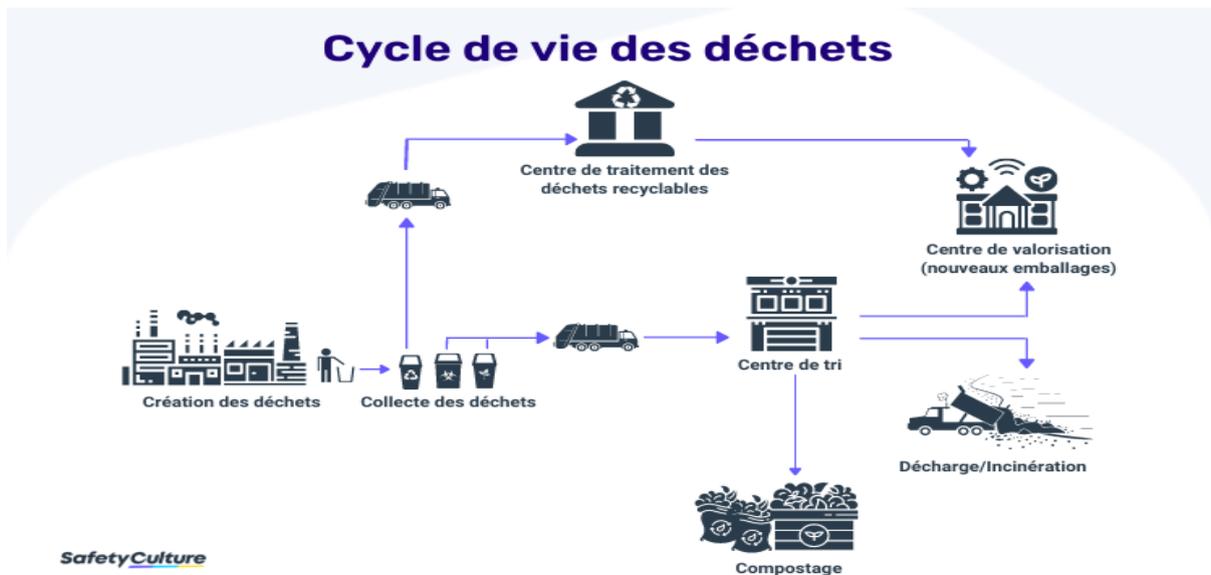
### **I.3.5 Selon le mode d'enlèvement des déchets :**

On distingue quatre catégories :

- ❖ Les déchets constitués par des éléments de faible dimension (ordures ménagères, ordures de marché, déchets artisanaux et commerciaux assimilables aux ordures ménagères.
- ❖ Les déchets hospitaliers qui sans de regrettables exceptions, font l'objet de collecte séparée.
- ❖ Les déchets encombrant appelés aussi « monstre » constitués par des objets volumineux qui ont été réformés et mis au rébus.
- ❖ Les souillures qui proviennent du nettoyage et du balayage des voies publiques (feuilles, branchages, déchets des plages, ...etc.) [5].

### **I.4 Système de gestion des déchets :**

Un système de gestion des déchets ou d'élimination des déchets est un processus rationalisé que les organisations utilisent pour éliminer, réduire, réutiliser et prévenir les déchets. C'est aussi une approche où les entreprises mettent en œuvre des stratégies globales pour gérer efficacement les déchets depuis leur origine jusqu'à leur élimination finale. Les méthodes possibles d'élimination des déchets sont le recyclage, le compostage, l'incinération, les décharges, la bioremédiation, la valorisation énergétique et la minimisation des déchets.



**Figure I- 1:** *Cycle de vie des déchets.*

Quant à la gestion des déchets, ce sont les mesures utilisées pour gérer les déchets tout au long de leur cycle de vie, de la génération des déchets à leur élimination ou leur valorisation [6].

## I.5 Production des déchets :

### I.5.1 Production de déchets dans le monde :

Partout dans le monde, les taux de production de déchets augmentent. En 2020, on estimait que le monde produisait 2,24 milliards de tonnes de déchets solides, soit une empreinte de 0,79 kilogramme par personne et par jour. Avec une croissance démographique et une urbanisation rapide, la production annuelle de déchets devrait augmenter de 73 % par rapport aux niveaux de 2020 pour atteindre 3,88 milliards de tonnes en 2050.

Dans l'ensemble, il existe une corrélation positive entre la production de déchets et le niveau de revenu. La production quotidienne de déchets par habitant dans les pays à revenu élevé devrait augmenter de 19 % d'ici 2050, par rapport aux pays à revenu faible et intermédiaire où elle devrait augmenter d'environ 40 % ou plus. La production de déchets diminue initialement aux niveaux de revenu les plus bas, puis augmente à un rythme plus rapide pour les changements de revenu supplémentaires aux niveaux de revenu faibles qu'aux niveaux de revenu élevés. La quantité totale de déchets générés dans les pays à faible revenu devrait plus que tripler d'ici 2050. La région de l'Asie de l'Est et du Pacifique génère la plupart des déchets mondiaux, à 23 %, et la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord est produisant le moins en termes absolus, à 6 %. Cependant, les régions à la croissance la plus rapide sont l'Afrique

subsaharienne, l'Asie du Sud, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, où, d'ici 2050, la production totale de déchets devrait plus que tripler, doubler et doubler respectivement. Dans ces régions, plus de la moitié des déchets sont actuellement déversés à ciel ouvert, et les trajectoires de croissance des déchets auront de vastes implications pour l'environnement, la santé et la prospérité, nécessitant donc une action urgente.

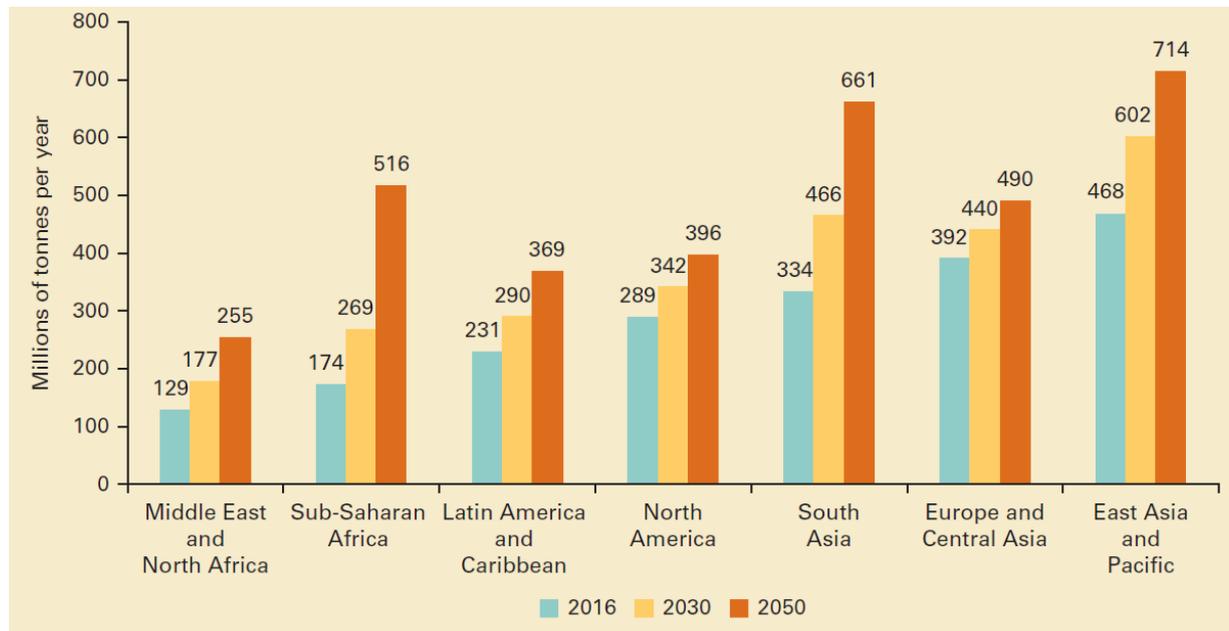


Figure I- 2: Production de déchets projetés, par région (millions de tonnes/an).

La collecte des déchets est une étape essentielle de la gestion des déchets, mais les taux varient largement en fonction des niveaux de revenu, les pays à revenu intermédiaire supérieur et élevé assurant une collecte des déchets quasi universels. Les pays à faible revenu collectent environ 48 % des déchets dans les villes, mais cette proportion chute considérablement à 26 % en dehors des zones urbaines. Dans toutes les régions, l'Afrique subsaharienne collecte environ 44 % des déchets, tandis que l'Europe, l'Asie centrale et l'Amérique du Nord collectent au moins 90 % des déchets [7].

### I.5.2 Production et gestion de déchets en Algérie :

En Algérie Six wilayas : Alger, Béjaïa, Skikda, Annaba, Tlemcen et Oran, produisent à elles seules 283 000t/an de déchets spéciaux et détiennent 1,9 million de tonnes en stock soit 95% du stock détenu au niveau national. La région Est, avec les deux wilayas industrielles, et leurs industries pétrochimiques, sidérurgiques El -Hadjar, et le complexe mercure de Azzaba, génèrent annuellement, à elles seules 45 % des déchets spéciaux. La région Centre quant à elle génère 77 000 t/an de déchets spéciaux et stocke 378 000t. Les substances dites toxiques,

peuvent après pénétration dans l'organisme, affecter l'un ou l'autre organe, parfois entraîner la mort de l'individu (plomb, mercure etc.). Cette atteinte à la santé peut être aiguë ou chronique, c'est à dire survenir après un laps de temps plus ou moins long avec des risques cutanés : le contact de certaines substances avec la peau (irritantes, allergènes, corrosives), peut affecter celle-ci de façon plus ou moins grave.

En Algérie, les déchets spécifiques potentiellement polluants pouvant contenir des éléments toxiques en quantités variables et présenter de ce fait des risques pour l'environnement s'ils ne sont pas traités ou stockés correctement. A cet effet il faut souligner que l'incinération brûle les ordures : c'est un moyen particulièrement commode d'élimination des résidus urbains. Les déchets des ménages sont un combustible relativement médiocre : ils brûlent assez mal car ils dégagent des fumées et des odeurs ; il faut prendre des précautions pour éviter la pollution atmosphérique, La température idéale de combustion est de 900 °C En-dessous de 900°C, tout ne brûle pas, et on peut sentir des odeurs désagréables. Au-delà de 900°C, le matériel utilisé s'abîme rapidement. La chaleur de la combustion peut être récupérée, soit pour du chauffage, soit pour produire de l'électricité. Dans cette optique, il y a lieu de noter que la civilisation moderne produit des masses colossales de déchets solides de diverses origines (domestique, industrielle, hospitalière, agricole) et si, bien souvent les déchets ne sont gênants que du fait de leur caractère encombrant et inesthétique, ils peuvent également être toxiques et causer de graves pollutions. Chaque type de déchet appelle des traitements et une gestion spécifique, appropriés au risque qu'il présente. En effet, les déchets radioactifs doivent présenter des caractéristiques précises pour être entreposés ou stocker. Ils sont donc traités (stabilisation des produits, réduction des volumes), puis conditionnés (selon leurs caractéristiques radioactives : niveau et type de rayonnement émis, période ; physiques : solides, liquides ou mixtes ; chimique) Le but de toute gestion saine des déchets est la préservation de la santé des populations et de l'environnement dans lequel elles vivent ; il est nécessaire de minimiser la quantité de refus et de faire en sorte que les rejets soient inoffensifs pour le milieu naturel. La caractérisation des déchets permet justement d'évaluer, au préalable, leur potentiel risque pour ce milieu et de choisir le mode de traitement optimal pour ces refus [8].

## **I.6 Cadre législatif sur la gestion des déchets**

L'Algérie a adopté plusieurs lois et décrets dans le domaine de l'environnement. En ce qui concerne la gestion des déchets, on trouve :

- Le décret n°84-378 du 1984 relatif aux conditions de nettoyage d'enlèvement et de traitement des déchets solides urbains faisabilité
- Loi n°01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n°02-02 du 05 février 2002, relative à la protection et la valorisation du littoral.
- Loi n°03-10 du 19 juillet 2003, relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret exécutif n° 02-175 portant sur la création de l'Agence Nationale des déchets.
- Décret exécutif n° 04-410 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations.
- Décret exécutif n° 07-205 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.
- Décret exécutif n° 02-372 relatif aux déchets d'emballage.
- Décret exécutif n°04-199 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages [9].

## I.7 Définition de la valorisation

La valorisation des déchets est parfois appelée revalorisation des déchets ou encore recovery en anglais. La loi du 13 juillet 1992 définit la valorisation comme « *le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie* ».

La valorisation donne de la valeur aux déchets et s'oppose en cela à l'élimination. Il existe trois différents types de valorisation : la **valorisation matière** qui consiste à utiliser la matière du déchet pour un nouveau processus de production ; la **valorisation organique** qui repose sur le compostage et la méthanisation ; la **valorisation énergétique** qui est faite via l'incinération de déchets et permet de créer de la chaleur qui est utilisée pour alimenter les systèmes de chauffage et d'électricité.

**I.7.1 La valorisation de la matière**

On distingue différentes formes de valorisation des matières liées aux conditions économiques, sociales et culturelles. Ces formes sont : le réemploi comme la réutilisation des bouteilles en verre, des emballages, etc. ; le recyclage qui permet d'obtenir de nouveaux produits en intégrant ces matières premières et secondaires dans un nouveau cycle de production. La valorisation de la matière englobe donc : le recyclage et la récupération des déchets. Une grande partie du secteur informel est basée sur cette activité avec la récupération de carcasse de véhicules, de plastiques et de métal.

***I.7.1.1 Le recyclage***

Ce procédé peut être défini comme la réutilisation d'un déchet, c'est un moyen de transformer des substances ou des matières en de nouvelles. Le but du recyclage est de limiter la consommation des ressources utilisées lors de la fabrication d'objets neufs. Cette méthode de traitement des déchets permet de réduire les volumes des déchets ainsi que leur pollution, c'est une manière de préserver les ressources naturelles en réutilisant les matières premières déjà existantes.

La réutilisation, une forme de recyclage, est une opération de traitement des déchets qui consiste à utiliser de nouveau des substances ou des matières, les déchets réutilisés peuvent l'être dans une activité différente de celle d'origine. La réutilisation peut être une opération de réparation ou de nettoyage pour valoriser le produit devenu un déchet, ce produit est à nouveau préparé pour pouvoir être utilisé sans autre opération de pré-traitement. C'est une intervention simple qui permet la réutilisation de la matière ou de l'objet peu importe la nature de ce dernier et l'usage pour lequel il a été créé à l'origine.

**I.7.2 La valorisation organique**

La valorisation organique est une sorte de valorisation qui concerne les déchets biodégradables (fermentescibles). Elle est considérée comme une valorisation matière, car de la matière est produite par dégradation [10].

Dans le milieu naturel, cette dégradation de la matière organique peut se faire par deux voies différentes : en conditions aérobies, c'est-à-dire en présence d'oxygène, pour former un amendement organique appelé humus ou compost. Il s'agit alors de compostage, qui se fait naturellement dans les litières forestières. Ce type de valorisation est pratiqué depuis des siècles par les jardiniers et les agriculteurs. En conditions anaérobies, c'est-à-dire en absence

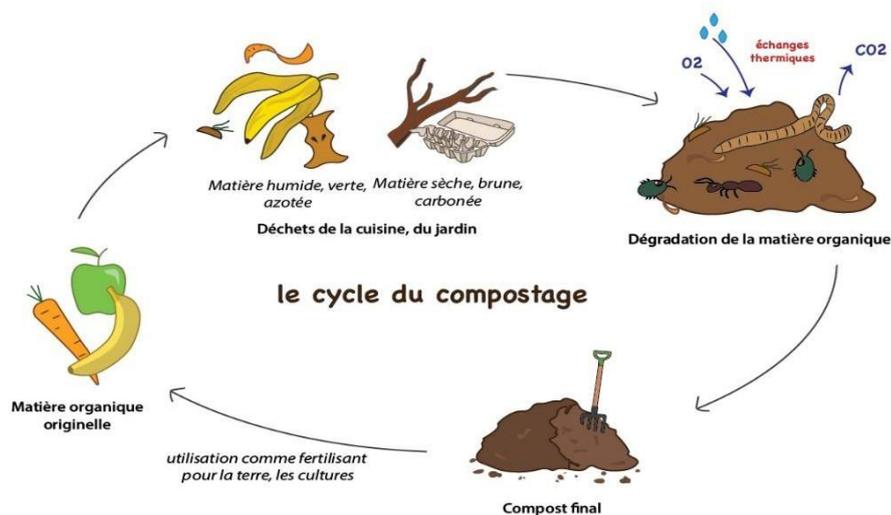
d'oxygène pour produire du gaz. Il s'agit de la méthanisation qui se déroule dans le milieu naturel, elle peut avoir aussi lieu spontanément au fond des eaux stagnantes [11].

### I.7.2 .1 le compostage

Le compostage est un procédé biologique aérobie de dégradation et de valorisation de matière organique en un produit stabilisé et hygiénistes disposant des caractéristiques d'un terreau enrichi en composés humiques [12].

Cette décomposition de la fraction organique fermentescible des déchets s'opère en présence d'air et par des micro-organismes aérobies (bactéries, champignons...) dans des conditions contrôlées : d'air, de température et d'humidité [13].

Le compostage est une pratique consistant à fabriquer du compost à partir de divers déchets végétaux [14].



**Figure I- 3:** Le cycle de compost de déchets organiques.

Le processus de compostage est réalisé en deux étapes successives :

- **La fermentation aérobie**

La fermentation aérobie de la matière organique est réalisée par une succession de consortiums microbiologiques qui s'accroissent en fonction de la température du taux de composés organiques fermentescibles. Il est possible de distinguer plusieurs phases de transformation au cours de la fermentation aérobie en fonction de la température et du temps [15].

Une première phase de latence correspondant à la mise en place de la biomasse est rapidement suivie d'une phase mésophile où la matière organique la plus facilement biodégradable est consommée, cette réaction biologique est exothermique et conduisant donc à une production de chaleur. S'établit alors une phase thermophile où l'activité bactérienne peut assimiler les molécules organiques les moins dégradables comme la cellulose ou la lignine. La stabilité du milieu correspond à un équilibre entre la production interne et la dissipation externe de chaleur. Ainsi, le ralentissement de l'activité microbiologique par épuisement du gisement de nutriments entraîne une diminution de la production de chaleur et se traduit par une phase de refroidissement des andains. L'activité biologique intense, combinée aux températures élevées, permet d'obtenir une stabilisation de la matière organique une absence d'odeurs nauséabondes, caractéristiques des fermentations mal maîtrisées

### ***1.7.2.2 Méthanisation***

La méthanisation est un processus de décomposition de matières pourrissables (putrescibles) par des bactéries qui agissent en l'absence d'air. On nomme ce processus de décomposition « fermentation anaérobie ».

Ce procédé permet de générer une énergie renouvelable, du biogaz qui comporte entre autres du méthane ainsi que du compost (un « digestat » utilisé comme fertilisant). Le biogaz peut être transformé en chaleur, en électricité et en carburant pour véhicules. Le phénomène de méthanisation se produit naturellement dans les gaz des marais, lieu de décomposition de matières végétales et animales où l'on peut observer la formation des bulles à la surface de l'eau [16].

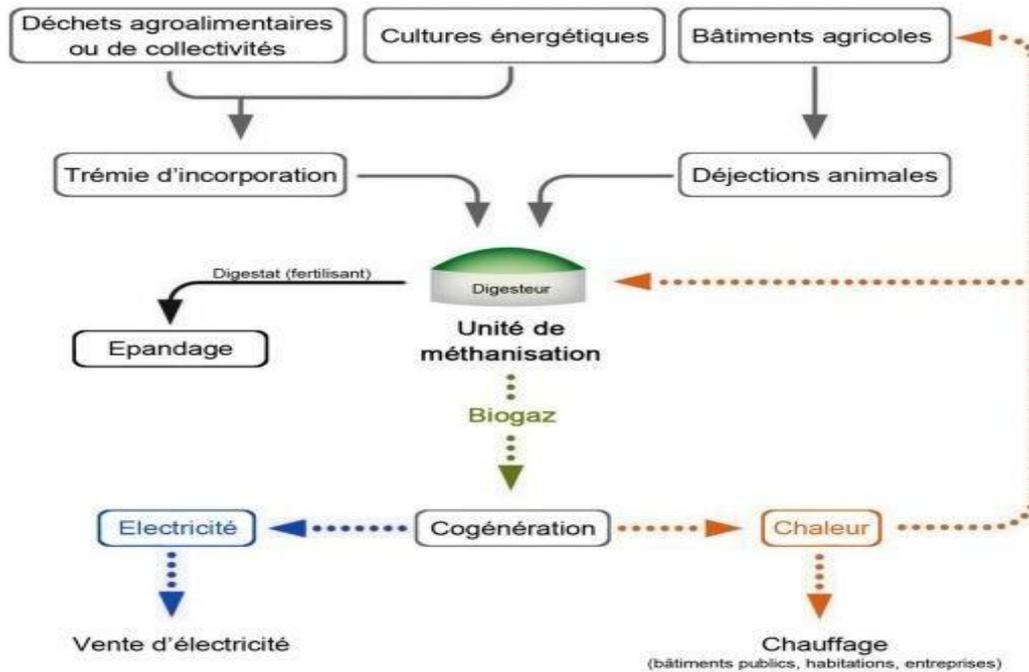


Figure I- 4: Processus de méthanisation

### I.7.3 Valorisation énergétique

Ce type de valorisation est envisageable dans le cadre de la production de l'énergie. La valorisation consiste à utiliser les calories contenues dans les déchets, en les brûlant et en récupérant l'énergie ainsi produite pour chauffer des immeubles ou produire de l'électricité par exemple. Cette forme de valorisation consiste à brûler les déchets ménagers hétérogènes dans des fours aménagés à cet effet. La valorisation énergétique est un mode d'exploitation des déchets par traitement thermique ; elle a pour objectif de récupérer une partie de leur contenu énergétique. Cette combustion peut avoir lieu dans plusieurs types d'installations : les incinérateurs à déchets ménagers, les cimenteries, les chaudières (pour le bois essentiellement) [17].

La valorisation énergétique de la biomasse peut produire trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre :

- De la chaleur.
- De l'électricité.
- Une force motrice de déplacement.

## **I.8 Production d'hydrogène**

L'hydrogène est une source d'énergie secondaire. Il stocke et transporte l'énergie produite à partir d'autres ressources (énergies fossiles, eau et biomasse).

Étant donné que l'hydrogène n'existe généralement pas librement dans la nature et qu'il est produit à partir d'autres sources d'énergie, il est connu comme un vecteur énergétique. Il s'agit d'un carburant à combustion propre et, lorsqu'il est combiné à l'oxygène dans une pile à combustible, l'hydrogène produit de la chaleur et de l'électricité avec uniquement de la vapeur d'eau comme sous-produit.

L'hydrogène peut être fabriqué directement à partir de combustibles fossiles ou de la biomasse, ou il peut être produit en faisant passer de l'électricité dans l'eau, en brisant l'eau en ses composants constitutifs d'hydrogène et d'oxygène. Certains envisagent une future "économie de l'hydrogène", où l'hydrogène est produit à partir de diverses sources d'énergie, stocké pour une utilisation ultérieure, acheminé là où il est nécessaire, puis converti proprement en chaleur et en électricité.

Aujourd'hui, la majeure partie de la production d'hydrogène se fait par reformage à la vapeur de gaz naturel. Mais le gaz naturel est déjà un bon combustible et il se fait rapidement plus rare et plus cher. C'est aussi un combustible fossile, de sorte que le dioxyde de carbone libéré lors du processus de reformage ajoute à l'effet de serre. L'hydrogène a une énergie très élevée pour son poids, mais une énergie très faible pour son volume, de nouvelles technologies sont donc nécessaires pour le stocker et le transporter. Et la technologie des piles à combustible en est encore à ses débuts, nécessitant des améliorations en termes d'efficacité et de durabilité.

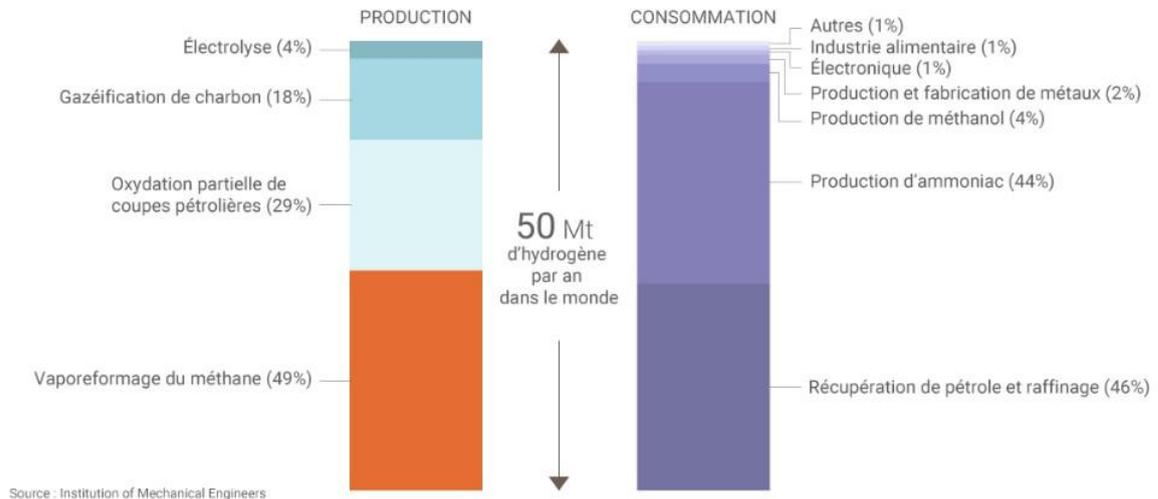
## **I.9 Modes de production d'hydrogène :**

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- La matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois.
- L'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.).
- Le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à

l'énergie thermique tel le procédé thermochimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important [18].

### Hydrogène Production et consommation dans le monde



**Figure I- 5:** Hydrogène production et consommation dans le monde. Près de 96% de la production mondiale d'hydrogène est encore issue d'énergies fossiles.

#### Les différentes techniques de production d'hydrogène :

- a. **Reformage des combustibles fossiles à la vapeur d'eau (ou vaporeformage) :** procédé de référence, le plus économique (mais son prix de revient reste bien plus élevé que celui du gaz naturel). Le vaporeformage du gaz naturel est la méthode la plus courante. Elle casse la molécule de méthane ( $\text{CH}_4$ ), principal composant du gaz naturel, qui possède 4 atomes d'hydrogène, avec de la vapeur d'eau à  $900^\circ\text{C}$ . Deux réactions successives permettent de produire de l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Ce procédé génère du dioxyde de carbone qui pourrait être capté et stocké dans le futur. Le vaporeformage du biogaz est également possible.
- b. **Electrolyse de l'eau :** procédé qui nécessite de l'électricité (rentable si la production d'électricité présente elle-même un coût peu élevé). Ce procédé correspond à la réaction inverse de celle se produisant dans une pile à combustible. Il permet de produire un hydrogène très « propre » (si l'électricité est produite en utilisant des sources renouvelables) mais n'est pas encore viable économiquement (2 à 3 fois plus coûteux que le procédé de vaporeformage). Le rendement de cette technique est de 40% sur toute la chaîne mais peut atteindre 80% en récupérant la chaleur.

c. **Gazéification et pyrolyse de biomasse (en particulier de charbon de bois) :** procédé en cours de recherche et développement qui permet par exemple d'obtenir de l'hydrogène par transformation chimique du bois à très haute température (entre 1 200°C et 1 500°C). On obtient un mélange de gaz contenant de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et du monoxyde de carbone (CO). Après purification de ce mélange, on obtient de l'hydrogène.

**d. Fermentation**

Dans les systèmes basés sur la fermentation, les micro-organismes, tels que les bactéries, décomposent la matière organique pour produire de l'hydrogène. La matière organique peut être des sucres raffinés, des sources de biomasse brute telles que les tiges de maïs et même des eaux usées. Parce qu'aucune lumière n'est requise, ces méthodes sont parfois appelées méthodes de "fermentation sombre". Dans la fermentation directe de l'hydrogène, les microbes produisent eux-mêmes l'hydrogène. Ces microbes peuvent décomposer des molécules complexes par de nombreuses voies différentes, et les sous-produits de certaines voies peuvent être combinés par des enzymes pour produire de l'hydrogène. Les chercheurs étudient comment faire en sorte que les systèmes de fermentation produisent de l'hydrogène plus rapidement (en améliorant le taux) et produisent plus d'hydrogène à partir de la même quantité de matière organique (en augmentant le rendement) [19].

On distingue plusieurs types de réactions de fermentation par la nature des produits de la réaction :

➤ *Fermentation éthylique*

Dans le cas de la fermentation éthylique (ou alcoolique), la réaction dégage de l'éthanol :



Le glucose, l'adénosine diphosphate (ADP) et le phosphate inorganique produisent de l'éthanol, du dioxyde de carbone et de l'adénosine triphosphate (ATP).

➤ *Fermentation lactique*

La fermentation lactique ou fermentation homolactique produit de l'acide lactique. Cette réaction se déroule dans le muscle au cours d'un effort intense pendant lequel l'apport

en dioxygène est trop lent par rapport à la demande en énergie. Ce type de fermentation concerne aussi la transformation du lait en yaourt



Le glucose, l'adénosine diphosphate (ADP) et le phosphore produisent de l'acide lactique et de l'adénosine triphosphate (ATP) [20].

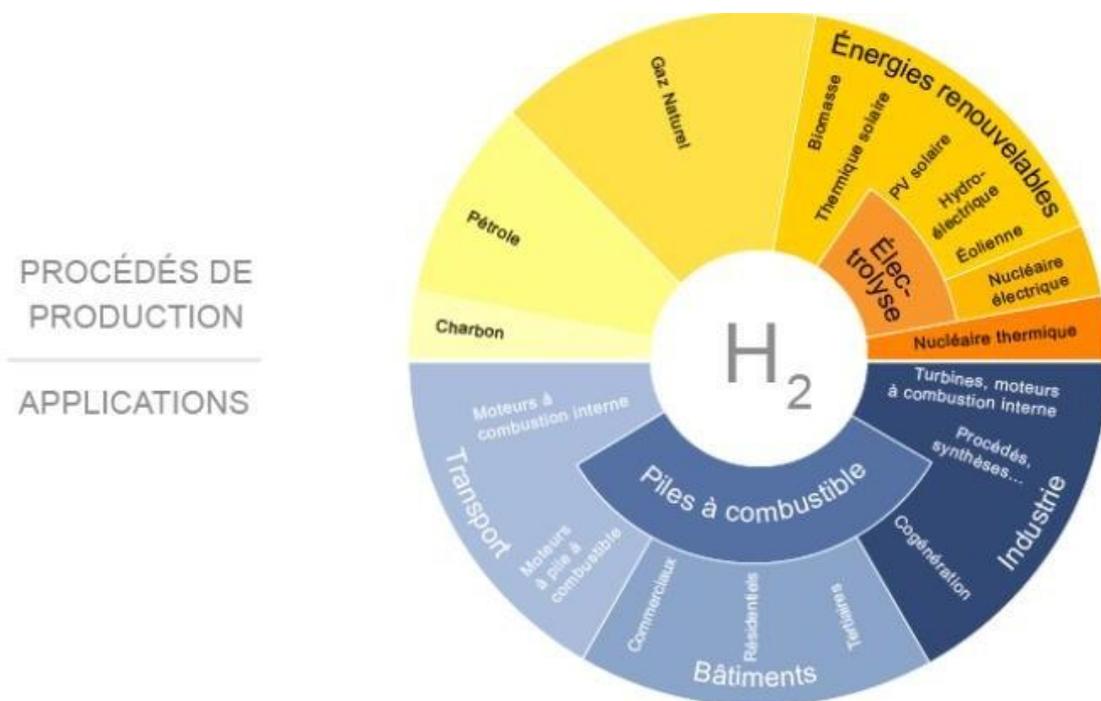


Figure I- 6: La chaîne hydrogène

### I.10 Avantages et Inconvénients de l'hydrogène

- Les avantages de l'hydrogène
  - Ni polluant ni toxique
  - Sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau c'est le plus léger des gaz , grande diffusion dans l'air
  - Selon son mode de production réduction des émissions en particulier de CO2
  - Molécule réductrice se combine avec O2 pour donner de l'eau et de l'énergie
  - Renforcer l'indépendance énergétique des pays consommateurs de pétrole

- Les inconvénients de l'hydrogène
  - Pas présent à l'état naturel.
  - Légèreté densité énergétique volumique moins favorable au stockage et au transport sous forme gazeuse que pour le gaz naturel.
  - Limite d'inflammabilité et de détonation avec l'air plus large que pour le gaz naturel.
  - Energie minimale à fournir pour enflammer l'hydrogène est 10 fois inférieure à celle des hydrocarbures classiques.
  - Son image dans le public n'est pas bonne [il est considéré comme un gaz dangereux] et son acceptabilité n'est donc pas encore acquise.

### **I.11 Valorisation des déchets en Algérie**

En Algérie, jusqu'à la fin d'année 2001, il y avait d'entrée l'ingénierie et les instruments juridiques à la pratique de la gestion des déchets dans le secteur d'environnement. Actuellement, la situation socio-économique en Algérie comme celle des pays en développement sont encore en train de travailler sur l'élimination progressive des décharges ouvertes et à établir les décharges contrôlées. Cela a été confirmé par la déclaration du ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement [21], ce qui indique que l'Algérie a installé 124 centres d'enfouissement techniques (CET) ou installations de stockage des déchets sur le territoire national. La politique de gestion des déchets s'inscrit dans la Stratégie Nationale Environnementale (SNE), ainsi que dans le Plan National d'Actions Environnementales et du Développement Durable (PNAE-DD) qui s'est concrétisée par la promulgation de la loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, traitant des aspects inhérents à la prise en charge des déchets, et dont les principes sont: [22]

- La prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets à la source.
- L'organisation du tri, de la collecte, du transport et du traitement des déchets.
- La valorisation des déchets par leur réemploi et leur recyclage.
- Le traitement écologiquement rationnel des déchets.
- L'information et la sensibilisation des citoyens sur les risques présentés par les déchets et leurs impacts sur la santé et l'environnement.
- l'institution d'outils de gestion : Programme National de Gestion Intégrée des Déchets solides Ménagers (PROGDEM) et Plan National de Gestion des Déchets Spéciaux (PNAGDES).

Cependant, la gestion des déchets urbains en Algérie est loin d'être efficiente. Les collectivités locales éprouvent encore beaucoup de difficultés dans la collecte, le transport et le traitement de ces déchets, malgré les efforts déployés.

Cependant il existe quelques stations et entreprises impliqués dans le traitement des déchets en Algérie, nous citons comme titre d'exemple :

- o NETCOM qui est un établissement de nettoyage et de collecte des ordures ménagères à Alger.

- o RASKALAT est une entreprise de récupération/recyclage de métaux ferreux et non ferreux basée à Bouinane, Wilaya de Blida.

- o CET HAMICI qui est un centre d'enfouissement technique situé au niveau de mehalma dans la wilaya de Boumerdes.

- o EPWG CET, (EPIC) : Etablissement Public de wilaya de Gestion des Centre d'Enfouissement Technique –Constantine.

## **I.12 Conclusion et positionnement de la problématique**

En raison de l'importance de l'énergie dans la croissance mondiale, l'énergie fossile a de tout temps était la source principale, son utilisation excessive a suscité l'inquiétude quant à sa durabilité, à ce titre les recherches se sont penchées sur d'autres sources d'énergies pour palier au risque d'une pénurie de l'énergie fossile.

L'hydrogène est le biocarburant le plus approprié pour ses caractéristiques dans la préservation de l'environnement car sans émissions de Carbone et il ne se produit que de l'eau propre avec un contenu énergétique plus élevée.

Après plusieurs applications de méthodes dans l'industrie chimique et biochimique, il ressort que la fermentation est la voie biologique la plus efficace pour produire du bio hydrogène et bio butanol. La récupération d'énergie est élevée car ils sont tous les deux produits d'un seul processus. Ce procédé offre des possibilités de valorisation des déchets en utilisant différents déchets comme matière première.

Plusieurs paramètres tels que la température, l'espace libre de la cuve du réacteur (Headspace), les nutriments du milieu, la supplémentation en acide butyrique ont un impact critique sur la formation de bio hydrogène et de bio butanol. L'effet de l'ajout de différentes concentrations d'acide butyrique et l'espace libre de la cuve du réacteur sont ceux qui sont moins explorés et

expérimentés par rapport à d'autres paramètres tels que le pH, la température, la taille, etc. Selon l'espèce microbienne, la valeur optimale de chaque paramètre sera différente.

La sélection et la surveillance des paramètres qui influencent la production de bio hydrogène et bio butanol jouent un rôle essentiel dans l'optimisation du processus de fermentation.

L'utilisation de l'intelligence artificielle (IA) telle que les réseaux de neurones artificiels (RNA) a suscité un grand intérêt en tant que modèle hautement simplifié qui imite les structures des réseaux de neurones biologiques. Son excellente capacité d'approximation dans le cas des processus non-linéaire, sa capacité à gérer des données de grande dimension, son efficacité de calcul, etc., ont conduit à l'application réussie des modèles basés sur les RNA dans la modélisation de phénomènes chimiques, biologiques et physiques tel que la fermentation.

---

# *Chapitre II*

## *Réseaux de Neurones Artificiels*

---

## II.1 Introduction

L'un des défis de l'homme aujourd'hui est de copier la nature et de reproduire des modes de raisonnement et de comportement qui lui sont propres. Les réseaux de neurones, nés de cette envie, ils constituent une famille de fonctions non linéaires paramétrées, utilisées dans de nombreux domaines (physique, chimie, biologie, finance, etc.), notamment pour la modélisation de processus et la synthèse de lois de commandes. Ce cours décrit une technique intelligente nouvellement introduite dans le monde de l'automatique. Il s'agit principalement des réseaux de neurones artificiels et les différentes structures qui leur sont associées ainsi que nous abordons par la suite l'identification et le contrôle de processus par les réseaux de neurones pour la synthèse de lois de commandes.

## II.2 Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de MM. Mac Culloch et Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurones interconnectés (figure I.1). Ils ont connu des débuts prometteurs vers la fin des années 50, mais le manque d'approfondissement de la théorie a gelé ces travaux jusqu'aux années 80.

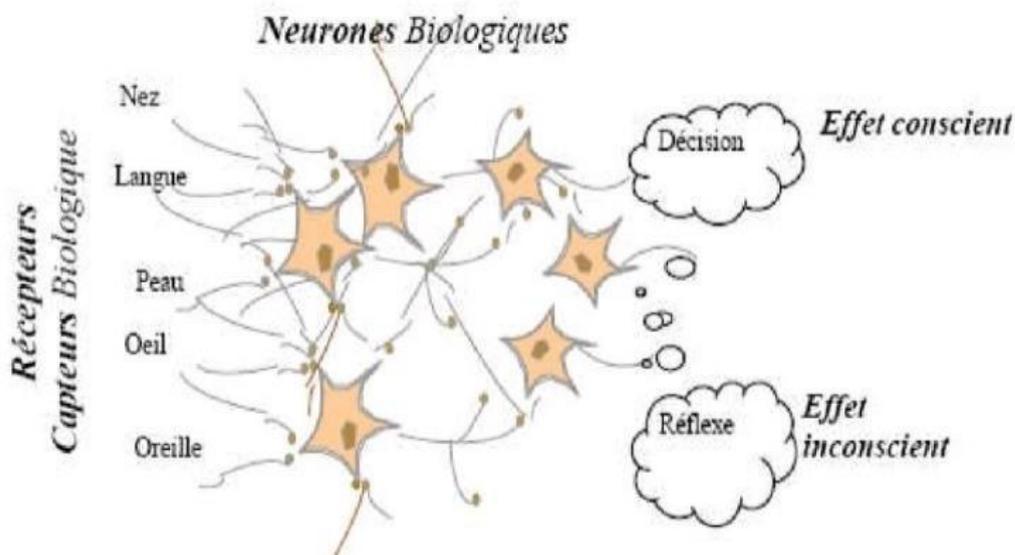


Figure II- 1: Structure d'un réseau de neurones biologiques.

Les réseaux de neurones forment une famille de fonctions non linéaires, permettant de construire, par apprentissage, une très large classe de modèles et de contrôleurs. Un réseau de neurones est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, recevant des signaux de l'extérieur par ses entrées, et délivrant des signaux de sortie, qui sont en fait les activités de certains neurones.

### II.3 Définition

Un réseau de neurones artificiels ou réseau neuronal artificiel, est un système dont la conception est à l'origine schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques. Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de créer des classifications rapides (réseaux de Kohonen en particulier), et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle auxquelles ils fournissent un mécanisme perceptif indépendant des idées propres de l'implémenteur, et des informations d'entrée au raisonnement logique formel (Deep Learning). En modélisation des circuits biologiques, ils permettent de tester quelques hypothèses fonctionnelles issues de la neurophysiologie, ou encore les conséquences de ces hypothèses pour les comparer au réel.

### II.4 Neurone biologique

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites. Celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique. C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En fait, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'Angstroms ( $10^{-9}$  m) entre l'axone du neurone afférent et les dendrites (on dit une dendrite) du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée la synapse (figure 2.2). [23]

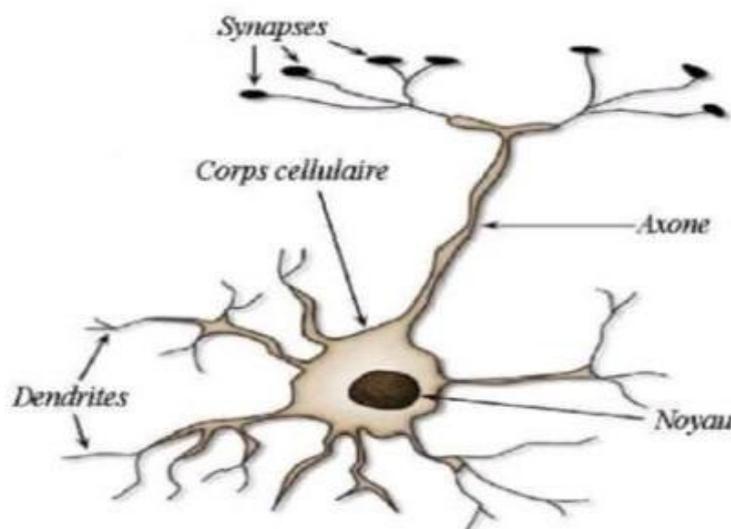


Figure II- 2: simplifié d'un neurone biologique

Les réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks – ANN) constituent une approche fondamentalement nouvelle dans le traitement de l'information. Ce sont des systèmes parallèles, adaptatifs et distribués dont le fonctionnement imite celui des réseaux de neurones biologiques tout en reproduisant leurs caractéristiques de base :

1. La connaissance est acquise par le réseau à travers un processus d'apprentissage.

2. Les connexions entre neurones, appelées poids synaptiques, sont utilisées pour le stockage de la connaissance. Du point de vue structurel, un réseau de neurones est d'un certain nombre d'unités de traitement simples appelées neurones formels ou artificiels. Ces derniers sont connectés entre eux de façon à produire la réponse correspondant aux entrées reçues par le réseau. Plusieurs modèles de neurones artificiels ont été développés, s'inspirant du principe de fonctionnement du neurone biologique qui assure essentiellement les fonctions suivantes :

- Réception des signaux provenant des neurones voisins.
- Intégration de ces signaux.
- Génération d'une réponse.
- Transmission de celle-ci à d'autres neurones.

## **II.5 Neurone artificiel**

Le neurone artificiel est une modélisation simplifiée du neurone biologique, c'est un processeur élémentaire qui reçoit un nombre d'entrées en provenance des autres neurones ou de l'extérieure. A chacune de ses entrées est associé un poids représentant la force de connexion [23] [24].

En général, un neurone artificiel est un élément de traitement possédant  $n$  entrées  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie  $y_j$  le résultat d'une fonction d'activation  $f$  de la somme pondérée.

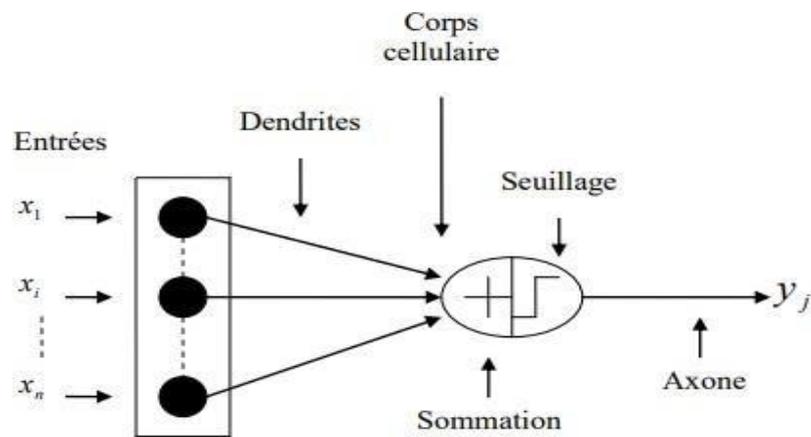


Figure II- 3: le neurone artificiel.

Tableau II- 1: Analogie entre neurone biologique et neurone artificiel.

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrites	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

### II.6 Fonction d'activation :

Les neurones artificiels effectuent des opérations mathématiques sur la sortie du signal à l'aide de fonctions d'activation linéaires ou non linéaires. Le rôle de la fonction d'activation est d'introduire des non-linéarités dans l'RNA et d'éviter la paralysie par des neurones divergents en contraignant leurs valeurs. Le choix de la fonction d'activation dépend de la spécification du problème à résoudre. Certaines fonctions d'activation couramment utilisées sont résumées dans le tableau.2.2 [25].

Tableau II- 2: Fonctions d'activation couramment utilisées.

Fonction d'activation	Equation	Plage d'entrée et de sortie	Représentation graphique
<b>Linéaire</b>	$f(x) = x$ <p>(2.1)</p>	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0,1]$	
<b>Log-sigmoïde</b>	$f(x) = \frac{1}{1 + e^x}$ <p>(2.2)</p>	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0,1]$	
<b>Tangente hyperbolique</b>	$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$ <p>(2.3)</p>	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [-1, 1]$	
<b>Limite stricte</b>	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{if } x \geq 0 \end{cases}$ <p>(2.4)</p>	$R_{input} = [-\infty, +\infty]$ $R_{output} = [0, 1]$	

## II.7 Architecture des Réseau de neurones

Dans un réseau, chaque sous-groupe fait un traitement indépendant des autres et transmet le résultat de son analyse au sous-groupe suivant. L'information fournie au réseau va donc se propager couche par couche, de la couche d'entrée vers la couche de sortie, en passant par une ou plusieurs couches intermédiaires. Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et de la couche précédente. Chaque couche est indépendante et peut être organisée comme suit :

- **Une couche d'entrée** : Elle est constituée de l'ensemble des variables d'entrée.
- **Une couche de sortie** : Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche qui fournit la sortie principale.
- **Une ou plusieurs couches cachées** : Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles définissent l'activité interne du réseau. En général, les fonctions d'activations sont non linéaires au niveau de ces couches [26].

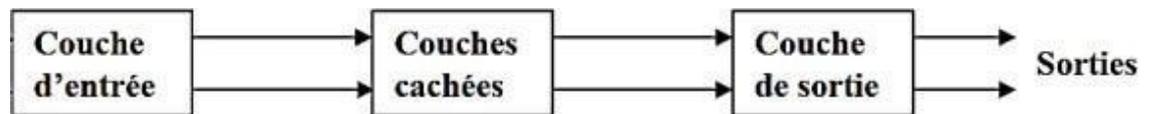


Figure II- 4: Composition d'un réseau de neurones artificiels.

Selon la structure de connexions des neurones et le type de la fonction d'activation, on peut distinguer principalement que les RNAs peuvent être classés en deux groupes, les réseaux feed-forward et les réseaux récurrents ou à retour d'informations [27].

### II.7.1 Réseaux Feed-forward

Dans ce modèle, les signaux ne voyagent que dans une seule direction, vers la couche de sortie. Les réseaux Feed-forward ont une couche d'entrée et une seule couche de sortie avec zéro ou plusieurs couches cachées. Ils sont largement utilisés dans la reconnaissance de formes.

#### a. Perceptron simple (mono couche)

L'exemple classique pour ce type de réseau est le perceptron monocouche, inventé par Rosenblatt. Il ne dispose que de deux couches (voir la figure 2.5) :

- Une couche d'entrée qui s'appelle la rétine et qui est une aire sensorielle.
- Une couche de sortie qui donne la réponse correspondante à la simulation présentée à l'entrée [28].

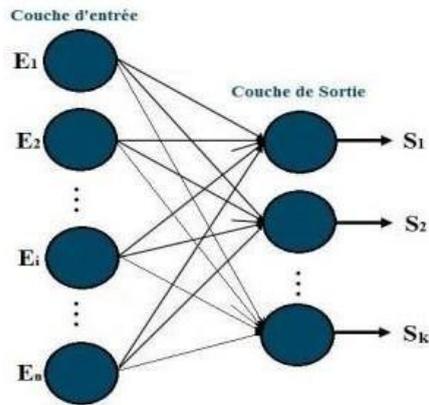


Figure II- 5: Architecture d'un perceptron monocouche.

$E_1$  : Entrée 1 de la couche d'entrée.

$E_i$  : Entrée i de la couche d'entrée.

$E_n$  : Entrée n de la couche d'entrée.

$S_1$  : Première sortie du réseau.

$S$  : Sortie k du réseau (k étant le nombre de sortie).

**b. Réseaux de neurones multicouches (MLP)**

Un réseau de neurones multicouches est une extension du célèbre Perceptron, avec une ou plusieurs couches intermédiaires appelées "couche cachées". Ce sont les réseaux de neurone les plus connus. Un tel réseau est présenté par un ensemble de neurones interconnectés entre eux de telle sorte que l'information circule des entrées vers les sorties [29].

La valeur de la sortie s'obtient en propageant les calculs de gauche vers la droite, avec éventuellement des connexions directes.

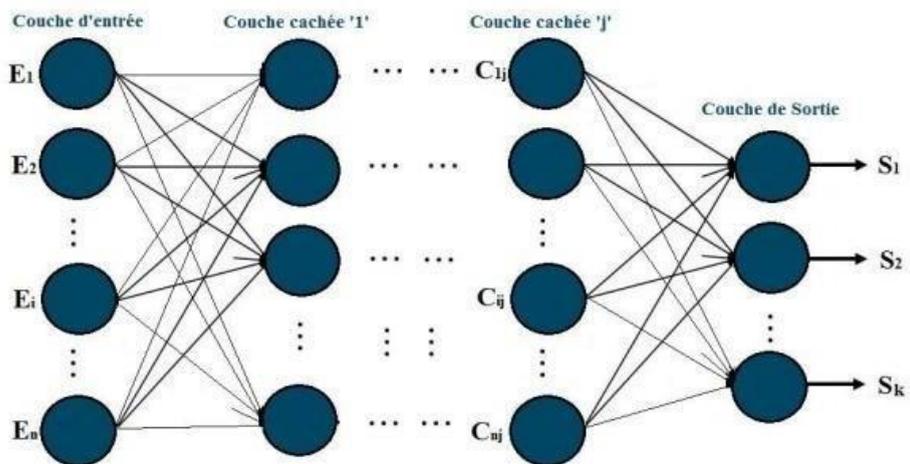


Figure II- 6: Architecture du perceptron multicouche (MLP).

$E_1$  : Entrée 1 de la couche d'entrée.

$E_i$  : Entrée  $i$  de la couche d'entrée.

$E_n$  : Dernière entrée de la couche d'entrée.

$C_{1j}$  : Premier neurone de la couche cachée  $j$ .

$C_{ij}$  : Neurone  $i$  de la couche cachée  $j$ .

$C_{nj}$  : Dernier neurone de la couche cachée  $j$  ( $m$  : nombre de neurones dans la couche cachée  $j$ ).

$S_1$  : Première sortie du réseau.

$S$  : Sortie  $k$  du réseau ( $k$  étant le nombre de sortie).

### c. Réseaux de neurones à fonction de base radiale

Un réseau RBF comporte trois couches de neurones, une couche d'entrée, une couche cachée directement liée à la couche d'entrée par des connexions non pondérées, et une couche de sortie liée à la couche cachée par des connexions pondérées. Soit un réseau de  $n$  entrées et une sortie, si  $nc$  est le nombre de nœuds de la couche cachée. Le réseau RBF présente les avantages d'une conception simple, d'une bonne généralisation et d'une tolérance élevée aux bruits d'entrée et à la capacité d'apprentissage en ligne. Figure 2.8 montre un exemple de l'architecture du réseau RBF. Les MLP et RBF sont les deux types de réseaux de neurones feed-forward les plus couramment utilisés [30].

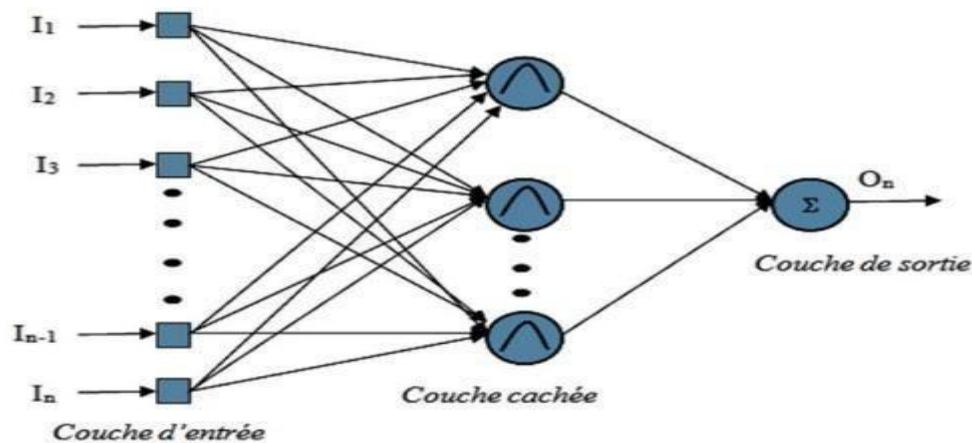


Figure II- 7: Structure d'un réseau de neurones de type RBF.

### II.7.2 Réseaux de rétroaction

Dans ce modèle, les réseaux récurrents ou interactifs utilisent leur état interne pour traiter la séquence d'entrées. Dans ceux-ci, les signaux peuvent voyager dans les deux sens à travers les boucles (couche(s) cachée(s) du réseau. Ils sont généralement utilisés dans les séries chronologiques et les tâches séquentielles [31].

## II.8 L'apprentissage des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones possèdent une grande capacité à apprendre (par exemple à reconnaître une image, une lettre, un son ...). Mais cette connaissance n'est pas acquise dès le départ. La plupart des réseaux de neurones apprennent par l'entraînement à l'aide d'un nombre des fichiers exemplaires. Ils ont donc une capacité à classer, à généraliser, et à mémoriser par un processus d'apprentissage. L'apprentissage est l'étape la plus importante dans le fonctionnement d'un réseau de neurones, c'est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimulus qu'il reçoit de son environnement.

Ainsi, le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements des paramètres surviennent. Il existe plusieurs types d'apprentissage, nous présentons les deux les plus importants et les plus utilisés ;

- **L'apprentissage supervisé** : Dans ce type, une information précise sur la sortie désirée est disponible. Le réseau apprend par présentation de pair d'entrée/sortie. Durant l'apprentissage, les valeurs de sorties désirées sont comparées à celles produites par le réseau. L'erreur résultante est utilisée pour l'ajustement des poids des connexions. La règle du delta en méthode rétropropagation telle qu'elle est utilisée dans les réseaux multicouches que nous détaillerons dans le chapitre suivant.
- **L'apprentissage non-supervisé** : Dans cet apprentissage, aucune information sur la sortie désirée du réseau n'est disponible. Ainsi, le réseau manipule des données qui lui sont présentées en entrée et cherche à extraire quelques propriétés qui formeront les sorties du réseau. L'extraction de ces propriétés dépend de la règle d'apprentissage utilisée dans le réseau [32].

### - Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage des réseaux de neurones, consiste à adapter les poids synaptiques de telle manière que l'erreur entre la sortie du réseau et la sortie désirée soit aussi petite que possible. La plupart des algorithmes d'apprentissage des réseaux de neurones est basée sur les méthodes du gradient.

## II.9 Utilisations des réseaux de neurones

- Pour la classification d'espèces animales par espèce étant donnée une analyse ADN.
- Reconnaissance de motif ; par exemple pour la reconnaissance optique de caractères (OCR), et notamment par les banques pour vérifier le montant des chèques, par la Poste pour trier le courrier en fonction du code postal, etc. ; ou bien encore pour le déplacement automatisé de robots mobiles autonomes.
- Approximation d'une fonction inconnue.
- Modélisation accélérée d'une fonction connue mais très complexe à calculer avec exactitude ; par exemple certaines fonctions d'inversions utilisées pour décoder les signaux de télédétection émis par les satellites et les transformer en données sur la surface de la mer [33].

## II.10 Les types des réseaux de neurones

- L'ensemble des poids des liaisons synaptiques détermine le fonctionnement du réseau de neurones.
- Les motifs sont présentés à un sous-ensemble du réseau de neurones : la couche d'entrée.
- Lorsqu'un motif est appliqué à un réseau, celui-ci cherche à atteindre un état stable.
- Lorsqu'il est atteint, les valeurs d'activation des neurones de sortie constituent le résultat.
- Les neurones qui ne font ni partie de la couche d'entrée ni de la couche de sortie sont dits neurones cachés.
- Les types de réseau de neurones diffèrent par plusieurs paramètres : la topologie des connexions entre les neurones ;
  - ✓ La fonction d'agrégation utilisée (somme pondérée, distance pseudo-euclidienne...).
  - ✓ La fonction de seuillage utilisée (sigmoïde, échelon, fonction linéaire, fonction de Gauss...).
  - ✓ L'algorithme d'apprentissage (rétropropagation du gradient, cascade corrélation). D'autres paramètres, spécifiques à certains types de réseaux de neurones, tels que la méthode de relaxation pour les réseaux de neurones (réseaux de Hopfield par exemple) qui ne sont pas à propagation simple (perceptron multicouche par exemple) [34].

**- Avantages et inconvénients des réseaux de neurones****a ) Avantages des réseaux de neurones**

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe.
- Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par" rétropropagation des erreurs. L'apprentissage (ou construction du modèle) est automatique.
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données.
- Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en mathématiques, informatique statistique requise.
- Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données.
- Pour l'utilisateur novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multivariées.

**b) Inconvénients des réseaux de neurones**

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche(s) cachée(s).
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence.
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation).
- La connaissance acquise par un réseau de neurones est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur [35].

**II.11 Conclusion**

Les réseaux d'ARN peuvent être utilisés pour analyser et prédire les performances de la production. Grâce à leur capacité à capturer et à traiter une grande quantité de données. En général, les résultats de ces travaux actuels pourraient montrer le rôle critique du modèle RNA dans la prédiction de la production d'hydrogène et butanol, ainsi que la prédiction de la meilleure condition dans la corrélation de base d'entrées et sorties. Les modèles RNA ont été en mesure de prédire les caractéristiques de performance de la production simultanées du bio hydrogène et bio butanol avec une précision supérieure à 94 %.

---

# *Chapitre III*

*Prédiction de la production d'hydrogène et de butanol*

---

### III.1 Introduction

Ce chapitre présente le développement des modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels (RNA), qui sont capables de prédire la production d'hydrogène et butanol par le procédé de la fermentation, Les modèles proposés ont été évalués au moyen de leurs indicateurs de performance statistiques, coefficient de détermination (R) et l'erreur moyenne (MSE) pour démontrer l'efficacité des approches proposées.

### III.2 Matériel et méthodes

#### III.2.1 Collecte des données

Pour développer les modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels pour la prédiction et optimisation de la production d'hydrogène par le procédé de la fermentation, les données expérimentales ont été collectés à partir du travail publié par YADAV S. et al 2020, Ou il a utilisé la bactérie **saccharoperbutylaceticum** en analysent l'influence des paramètres de contrôle (Température, Espace libre de la cuve de réacteur, Catalyseur) sur la production simultanée d'hydrogène et butanol. L'objectif de ces tests était de choisir la meilleure proportion de la production du bio hydrogène et bio butanol à partir par le procédé de fermentation. La sélection du meilleur modèle est base sur l'évaluation des performances de la production du bio hydrogène et bio butanol.[36]

#### III.2.2 Normalisation des données

La normalisation des données est une étape préalable à effectuer avant toute analyse de base de données. Une normalisation adéquate des variables d'entrée et de sortie est obligatoire pour obtenir des résultats précis. Ainsi, toutes les données sélectionnées ont été mises à l'échelle dans la plage de [0-1] en fonction des valeurs minimales et maximales de chaque catégorie en utilisant l'équation (3.1) pour les adapter à la fonction d'activation dans la couche cachée et la couche de sortie du RNA.

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (3.1)$$

$X'$ : Valeur normalisée .

$X_{min}$  : Valeurs minimales de X .

$X_{max}$  : Valeurs maximales de X .

Tableau III- 1: Données d'hydrogène non normalisées.

Température (C )	Headspace (V/V)	Acide butyrique (g/L)	Production d'hydrogène (L/L)
37	60	7,3	5,1
39	70	8	2,3
37	60	9	6,9
37	43,1	9	6
40,3	60	9	1,2
35	70	10	4,3
39	50	8	2,1
39	70	8	2,3
37	60	9	6,9
37	60	9	6,8
37	60	7,3	5,1
37	60	10,7	4,2
33,6	60	9	6
35	50	10	3,7
33,6	60	9	5,9
37	60	9	6,9
39	50	8	2,2
37	76,8	9	6,5
39	70	10	2,4
37	60	9	6,9
37	60	9	6,8
35	50	8	4,7
37	60	9	6,9
35	50	8	4,6
39	70	10	2,5
39	50	10	1,8
37	60	9	6,9
37	60	9	6,8
37	60	9	6,8
37	60	9	6,9
37	76,8	9	6,5
37	60	9	6,9
35	70	8	5,3
35	70	8	5,4
40,3	60	9	1,2
35	50	10	3,7
39	50	10	1,9
37	60	10,7	4,2
35	70	10	4,3

Tableau III- 2: Données de butanol non normalisés.

Température (C)	Headspace (V/V)	Acide butyrique (g/L)	Production Butanol (g/L)
30,5	60	9	15,7
30,5	60	9	15,6
30,5	60	7,3	14,3
30,5	43,1	9	14,8
33,5	50	8	13,2
30,5	60	9	15,6
35,5	60	9	15,1
27,5	50	8	13,9
33,5	50	8	13,2
30,5	60	9	15,7
27,5	50	10	10,7
33,5	50	10	10,8
27,5	70	10	10,8
30,5	60	10,7	11
30,5	60	9	15,7
30,5	76,8	9	15
30,5	60	9	15,7
27,5	70	10	10,8
30,5	60	9	15,7
30,5	60	9	15,6
27,5	50	8	13,8
33,5	70	10	10,9
30,5	43,1	9	14,8
30,5	60	9	15,7
30,5	60	9	15,7
27,5	50	10	10,7
25,5	60	9	9,6
30	60	10,7	11
27,5	70	8	13,9
25,5	60	9	9,6
30,5	60	9	15,7
30,5	60	7,3	14,3
35,5	60	9	15,1
33,5	70	8	13,4
27,5	70	8	13,9
30,5	76,8	9	15
33,5	70	10	10,9
33,5	50	10	10,8
33,5	70	8	13,4

Tableau III- 3: Données d'hydrogène normalisées.

Température (C)	Head space ( V/V)	Acide butyrique (g/L)	Hydrogène (L/L)
0,50746269	0,50148368	0	0,68421053
0,80597015	0,79821958	0,20588235	0,19298246
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,50746269	0	0,5	0,84210526
1	0,50148368	0,5	0
0,20895522	0,79821958	0,79411765	0,54385965
0,80597015	0,20474777	0,20588235	0,15789474
0,80597015	0,79821958	0,20588235	0,19298246
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,50746269	0,50148368	0,5	0,98245614
0,50746269	0,50148368	0	0,68421053
0,50746269	0,50148368	1	0,52631579
0	0,50148368	0,5	0,84210526
0,20895522	0,20474777	0,79411765	0,43859649
0	0,50148368	0,5	0,8245614
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,80597015	0,20474777	0,20588235	0,1754386
0,50746269	1	0,5	0,92982456
0,80597015	0,79821958	0,79411765	0,21052632
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,50746269	0,50148368	0,5	0,98245614
0,20895522	0,20474777	0,20588235	0,61403509
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,20895522	0,20474777	0,20588235	0,59649123
0,80597015	0,79821958	0,79411765	0,22807018
0,80597015	0,20474777	0,79411765	0,10526316
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,50746269	0,50148368	0,5	0,98245614
0,50746269	0,50148368	0,5	0,98245614
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,50746269	1	0,5	0,92982456
0,50746269	0,50148368	0,5	1
0,20895522	0,79821958	0,20588235	0,71929825
0,20895522	0,79821958	0,20588235	0,73684211
1	0,50148368	0,5	0
0,20895522	0,20474777	0,79411765	0,43859649
0,80597015	0,20474777	0,79411765	0,12280702
0,50746269	0,50148368	1	0,52631579
0,20895522	0,79821958	0,79411765	0,54385965
0,50746269	0	0,5	0,84210526

Tableau III- 4: Données de butanol normalisées.

Température(C)	Headspace (V/V)	Acide butyrique(g/L)	Production du butanol (g/L)
0,5	0,50148368	0,5	1
0,5	0,50148368	0,5	0,98360656
0,5	0,50148368	0	0,7704918
0,5	0	0,5	0,85245902
0,8	0,20474777	0,20588235	0,59016393
0,5	0,50148368	0,5	0,98360656
1	0,50148368	0,5	0,90163934
0,2	0,20474777	0,20588235	0,70491803
0,8	0,20474777	0,20588235	0,59016393
0,5	0,50148368	0,5	1
0,2	0,20474777	0,79411765	0,18032787
0,8	0,20474777	0,79411765	0,19672131
0,2	0,79821958	0,79411765	0,19672131
0,5	0,50148368	1	0,2295082
0,5	0,50148368	0,5	1
0,5	1	0,5	0,8852459
0,5	0,50148368	0,5	1
0,2	0,79821958	0,79411765	0,19672131
0,5	0,50148368	0,5	1
0,5	0,50148368	0,5	0,98360656
0,2	0,20474777	0,20588235	0,68852459
0,8	0,79821958	0,79411765	0,21311475
0,5	0	0,5	0,85245902
0,5	0,50148368	0,5	1
0,5	0,50148368	0,5	1
0,2	0,20474777	0,79411765	0,18032787
0	0,50148368	0,5	0
0,45	0,50148368	1	0,2295082
0,2	0,79821958	0,20588235	0,70491803
0	0,50148368	0,5	0
0,5	0,50148368	0,5	1
0,5	0,50148368	0	0,7704918
1	0,50148368	0,5	0,90163934
0,8	0,79821958	0,20588235	0,62295082
0,2	0,79821958	0,20588235	0,70491803
0,5	1	0,5	0,8852459
0,8	0,79821958	0,79411765	0,21311475
0,8	0,20474777	0,79411765	0,19672131
0,8	0,79821958	0,20588235	0,62295082

**III.2.3 Développement des modèles :**

Deux modèles indépendants ont été développés sous Matlab à l'aide de l'outil « NN Toolbox », le premier est utilisé pour prédire le rendement de la production d'hydrogène par le procédé de fermentation, et le deuxième est utilisé pour prédire la production du bio butanol. La température, Head space et le catalyseur ont été considérés comme paramètres d'entrée pour les deux modèles.

L'ensemble de données expérimentales collectées a été divisé en trois ensembles, le premier ensemble (70%) est utilisé pour entraîner le modèle, le second ensemble (15%) est utilisé pour la validation, et le dernier ensemble (15%) qui est indépendant de l'ensemble de données d'entraînement, est utilisé pour tester le modèle.

Les performances des RNA dépendent de plusieurs paramètres, notamment le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche cachée, la fonction d'activation et l'algorithme d'entraînement. Un petit nombre de neurones peut ne pas conduire à une bonne approximation et en même temps, des structures compliquées avec un trop grand nombre de neurones et plusieurs couches cachées prendront du temps, pourraient ne pas présenter une meilleure approximation, et provoquer un sur ajustement. Par conséquent, la précision des RNA dépend du choix important des paramètres susmentionnés.

Pour déterminer le nombre optimal de couches cachées, le nombre optimal de neurones dans chaque couche cachée, et la fonction d'activation optimale, pour une meilleure prédiction des paramètres de fonctionnement et de caractéristiques d'émissions, la méthode « Essais et erreur » a été utilisée.

Pour les deux modèles, le nombre de neurones est varié de 03 à 11 neurones, une seule couche cachée, et les fonctions d'activations testées pour la couche Cachée sont Log-sigmoïde et Tan-sigmoïde. La fonction d'activation utilisée pour la couche de sortie est la fonction linéaire Pure-line. L'algorithme « Back-propagation » a été utilisé pour entraîner les deux modèles. Et l'algorithme d'apprentissage « Levenberg Marquadt » a été utilisé pour construire la structure des réseaux.

### III.2.4 Analyses statistiques :

Pour mesurer les performances et valider les modèles développés, le coefficient de détermination  $R^2$  et la moyenne des carrés des erreurs MSE sont utilisés, conformément à l'Eq. (3.2) et Eq. (3.3).

$$MSE_{err}^f = \frac{\sum (E_i - P_i)^2}{N \sum E_i^2} \quad (3.2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{R})^2} \quad (3.3)$$

$E_i$  : Valeur expérimentale.

$P_i$  : Valeur prédite.

$\bar{R}$  : Moyenne des données observées.

N : Nombre de données.

Le MSE indique la précision des modèles et est considéré comme un critère d'ajustement important dans le cas où le but du modèle est la prédiction. Il montre à quel point les points de données expérimentaux sont proches des valeurs prédites. Plus les valeurs de MSE sont faibles, meilleur est l'ajustement. Concernant le coefficient de détermination,  $R^2$  est utilisé pour évaluer l'ajustement des modèles en déterminant la dispersion des données le long de la droite de régression ajustée.

## III.3 Résultats et discussion :

### III.3.1 Architecture des modèles développés :

Les résultats des essais menés par la méthode Essais et Erreurs (Trial and Error) pour la détermination de l'architecture optimale des RNA pour la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène et bio butanol par la fermentation, sont illustrés dans les tableaux 3.5 et 3.6, respectivement.

Tableau III- 5: Résultats des essais pour le premier modèle.

Nombre de neurones	Nombre de couches caches	Fonction d'activation	MSE	Nombre d'époques	R
3	1	Logsimoid	0.039497	4	0.84831
5	1	Logsimoid	0.033603	6	0.96035
7	1	Logsimoid	0.056128	2	0.79716
9	1	Logsimoid	0.04193	11	0.8682
11	1	Logsimoid	0.0042085	7	0.93658
3	1	Tansigmoid	0.0083329	4	0.92366
5	1	Tansigmoid	0.00036568	7	0.99647
7	1	Tansigmoid	0.09177	2	0.85975
9	1	Tansigmoid	0.078783	6	0.93776
11	1	Tansigmoid	0.00013586	8	0.99881

Tableau III- 6: Résultats des essais pour le deuxième modèle.

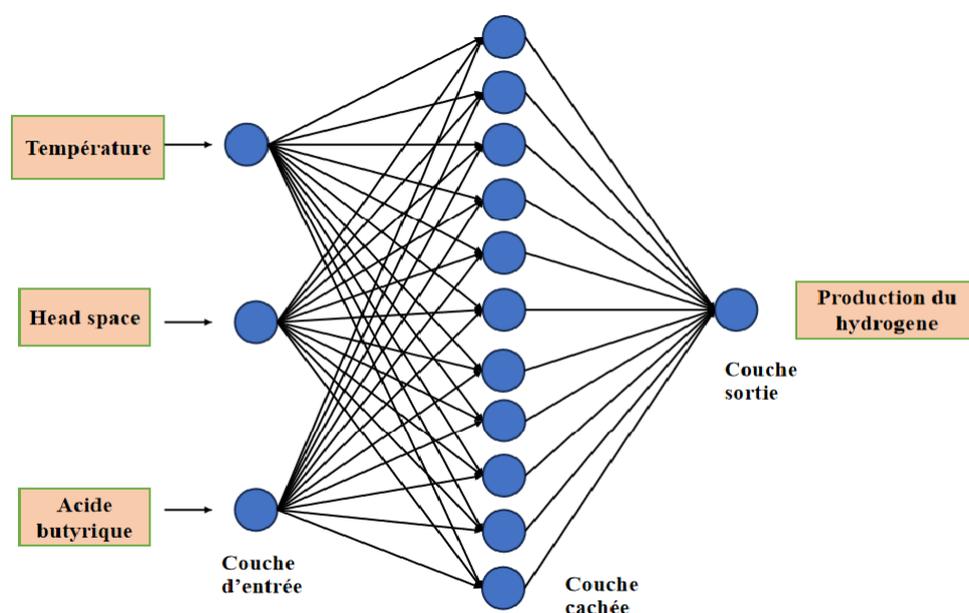
Nombre de neurones	Nombre de couches caches	Fonction d'activation	MSE	Nombre d'époques	R
3	1	Logsimoine	0.048438	5	0.64629
5	1	Logsimoine	0.026721	7	0.96362
7	1	Logsimoine	0.02442	21	0.95464
9	1	Logsimoine	0.029047	26	0.95321
11	1	Logsimoine	0.015383	12	0.95659
3	1	Tansigmoid	0.02013	20	0.95656
5	1	Tansigmoid	0.25226	1	0.48745
7	1	Tansigmoid	0.053936	43	0.95502
9	1	Tansigmoid	0.025537	4	0.94488
11	1	Tansigmoid	0.00060808	6	0.99977

Selon les valeurs des indicateurs de performance MSE et  $R^2$ , l'architecture optimale du réseau de neurones artificiels qui présente une prédiction précise du rendement de la production du bio hydrogène se compose d'une seule couche cachée, qui comprend 11 neurones avec une fonction d'activation Tan-sigmoïde. De même, l'architecture optimale qui donne la meilleure prédiction

de la production du bio butanol, consiste en une seule couche cachée, qui comprend 11 neurones avec une fonction d'activation Tan-sigmoïde. Les paramètres détaillés de ces topologies sont présentés dans le tableau 3.7 et illustrés dans les figures 3.1 et 3.2, respectivement.

**Tableau III- 7:** Paramètres détaillés des deux modèles.

Paramètres	RNA (hydrogène)	RNA (butanol)
Nombre de couches cachées	1	1
Nombre de neurones dans les couches cachées	11	11
Fonction d'activation	Log-sigmoïde	Tan-sigmoïde
Algorithme d'entraînement	Trainlm	Trainlm
Nombre de données d'entraînement	28	28
Nombre de données de validation	6	6
Nombre de données de test	6	6
Performance goal	$10^{-40}$	$10^{-40}$
Nombre d'époques	8	6



**Figure III- 1:** Architecture du modèle RNA pour la prédiction de la production du bio hydrogène.

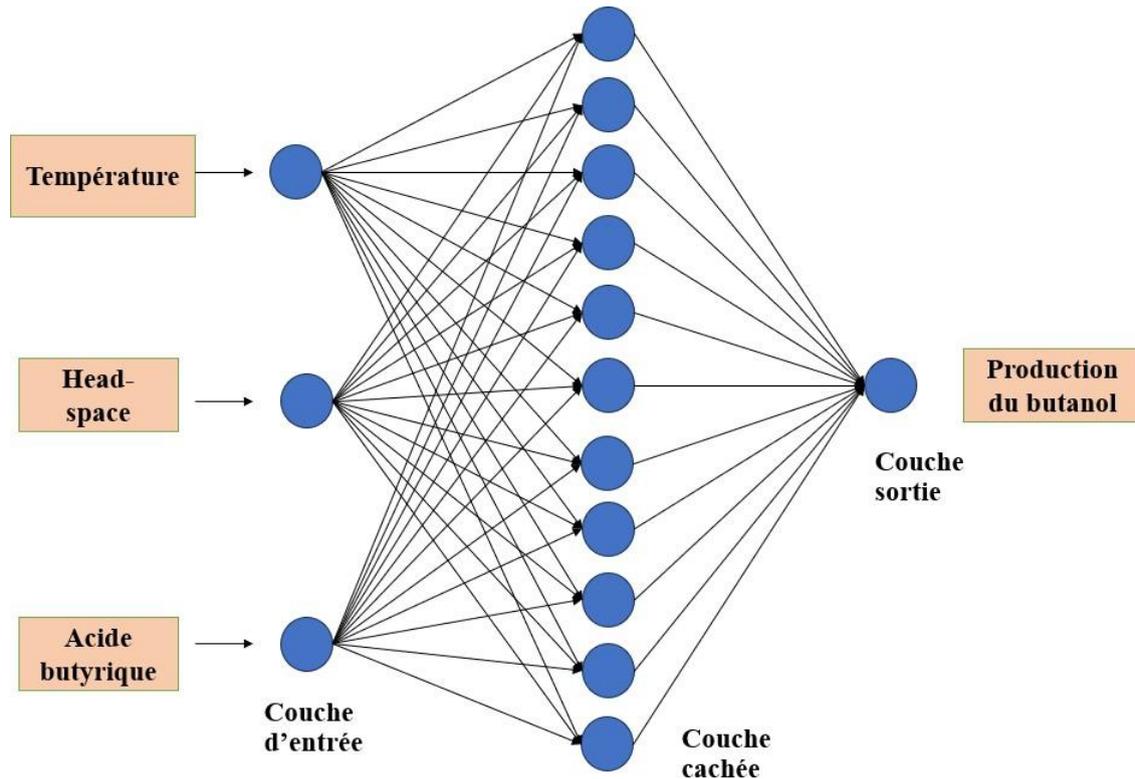


Figure III- 2: Architecture du modèle RNA pour la prédiction de la production du bio butanol.

### III.3.2. Résultats de la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène et bio butanol :

Pour atteindre l'objectif de performance souhaité de  $10^{-40}$ , l'entraînement a été effectué plusieurs fois avec différentes époques. Les changements d'erreur quadratique moyennent (MSE) avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage des RNA, pour la prédiction du rendement de production d'hydrogène et butanol sont présentés sur les figures 3.3 et 3.4, respectivement. Comme le montrent les figures, la valeur du MSE a diminué et est restée constante lorsque les époques ont atteint 7 avec une valeur de  $5.8512 \cdot 10^{-5}$  pour la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène, alors qu'elle est restée constante à l'époque numéro 10 pour la prédiction de la production du bio butanol, avec une valeur de  $3.0794 \cdot 10^{-5}$ . Ces époques sont utilisées pour figer les modèles.

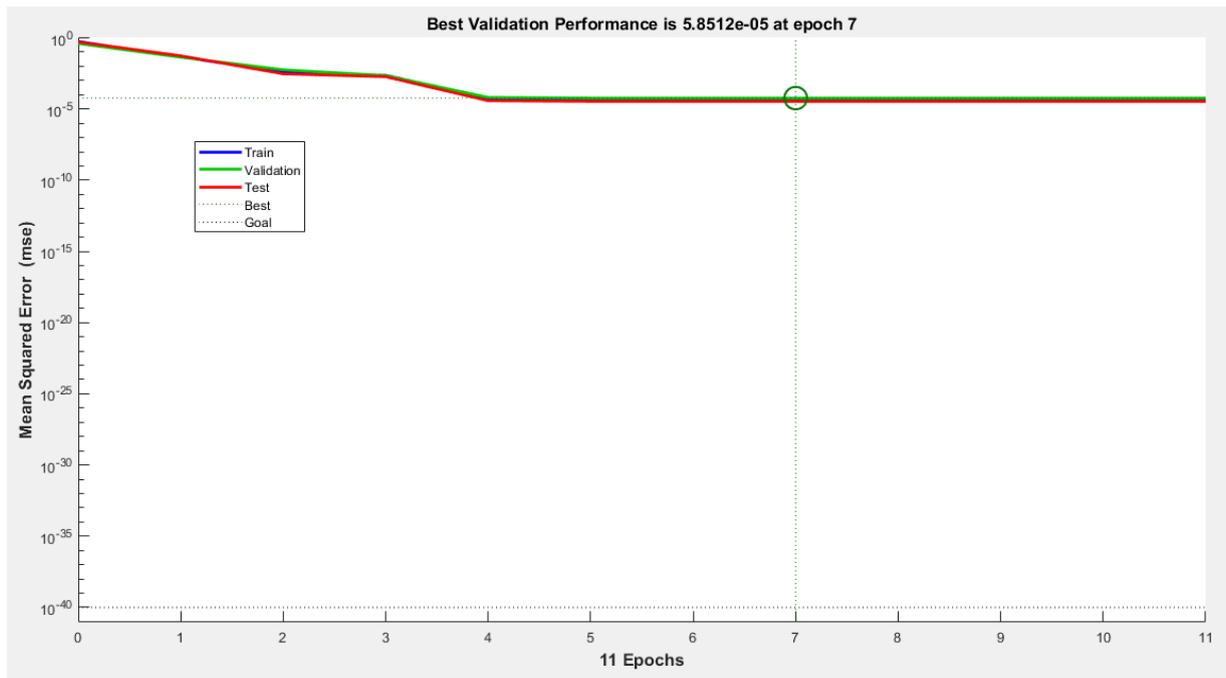


Figure III- 3: Changements de l'erreur quadratique moyenne avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : prédiction de la production d'hydrogène.

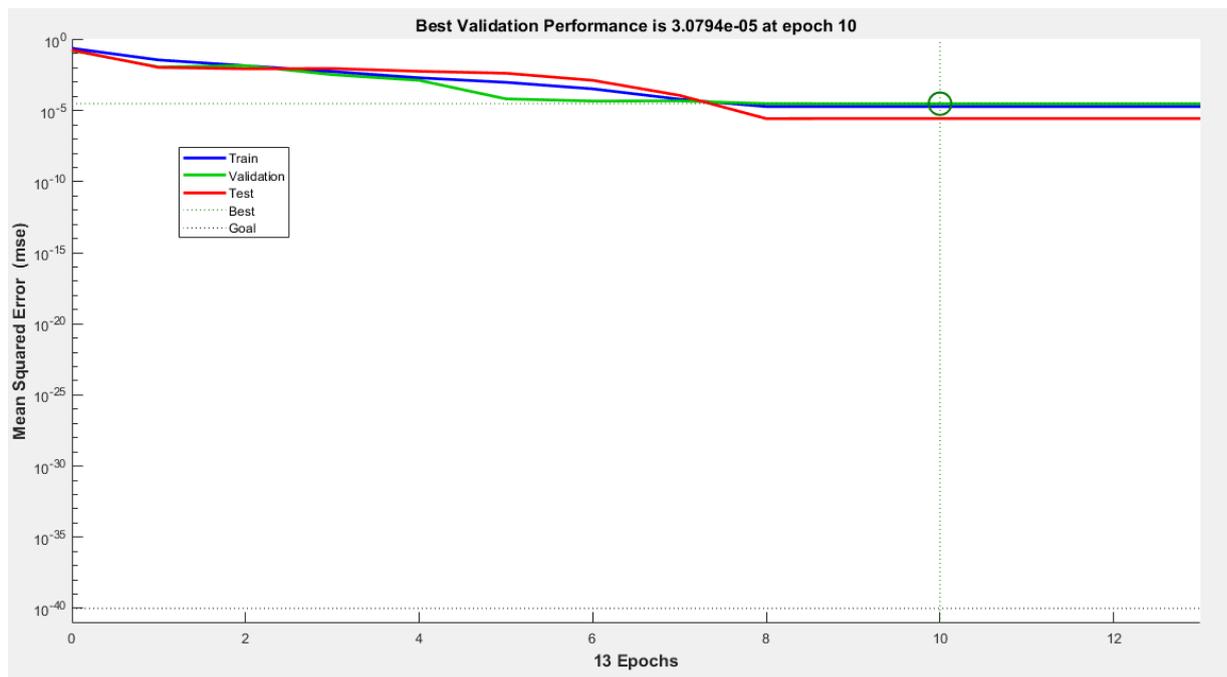


Figure III- 4: Changements de l'erreur quadratique moyenne avec le nombre d'époques au cours du processus d'apprentissage : Prédiction de la production du bio butanol.

Figure 3.6 et Figure 3.7 présentent les courbes de régression des valeurs du rendement de la production d'hydrogène et butanol expérimentaux par rapport aux valeurs prédites pendant le processus d'entraînement, de validation, de test et de tout l'ensemble de données, respectivement. Les valeurs des  $R^2$  sont présentées dans le Tableau 3.4.

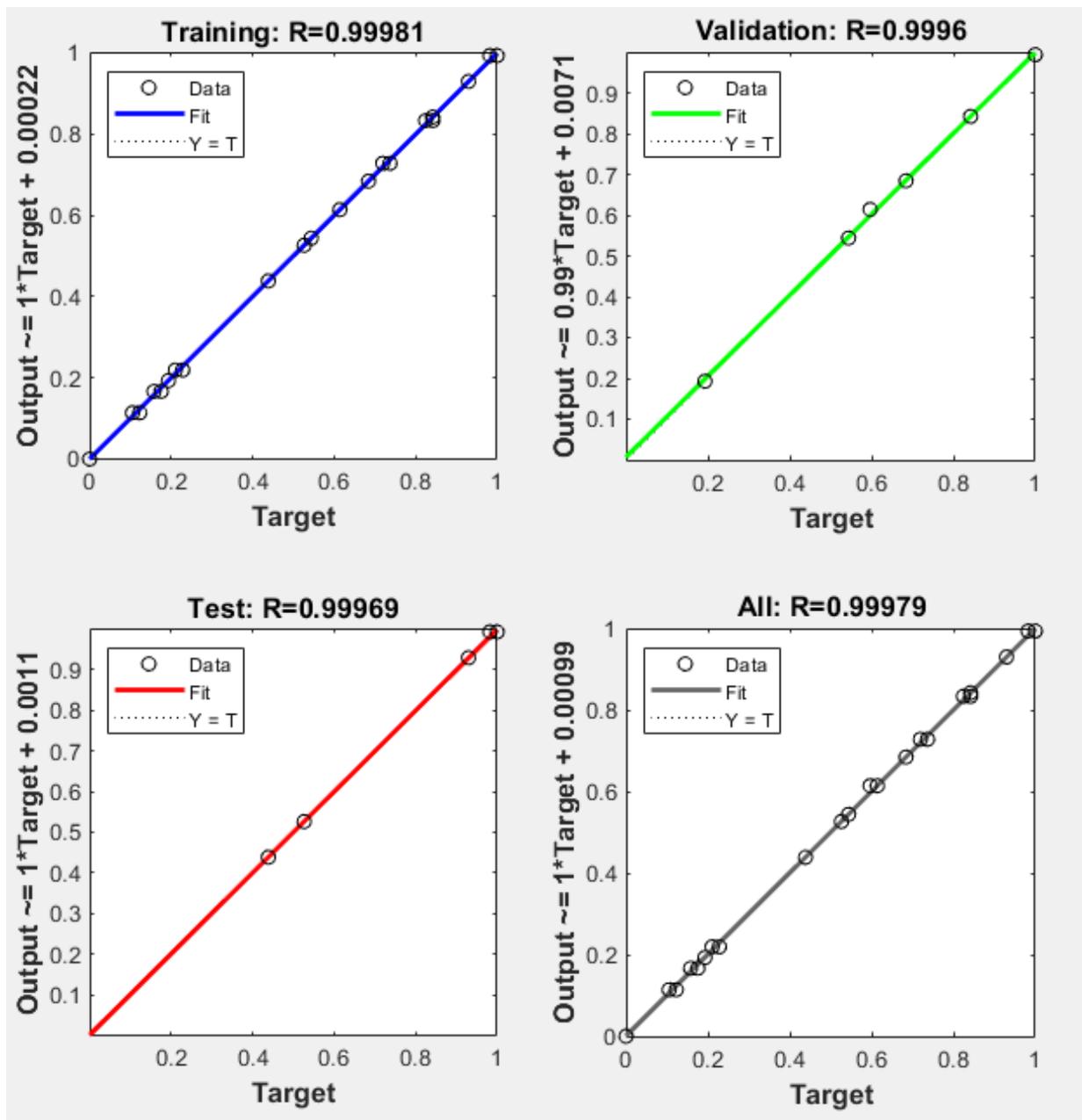
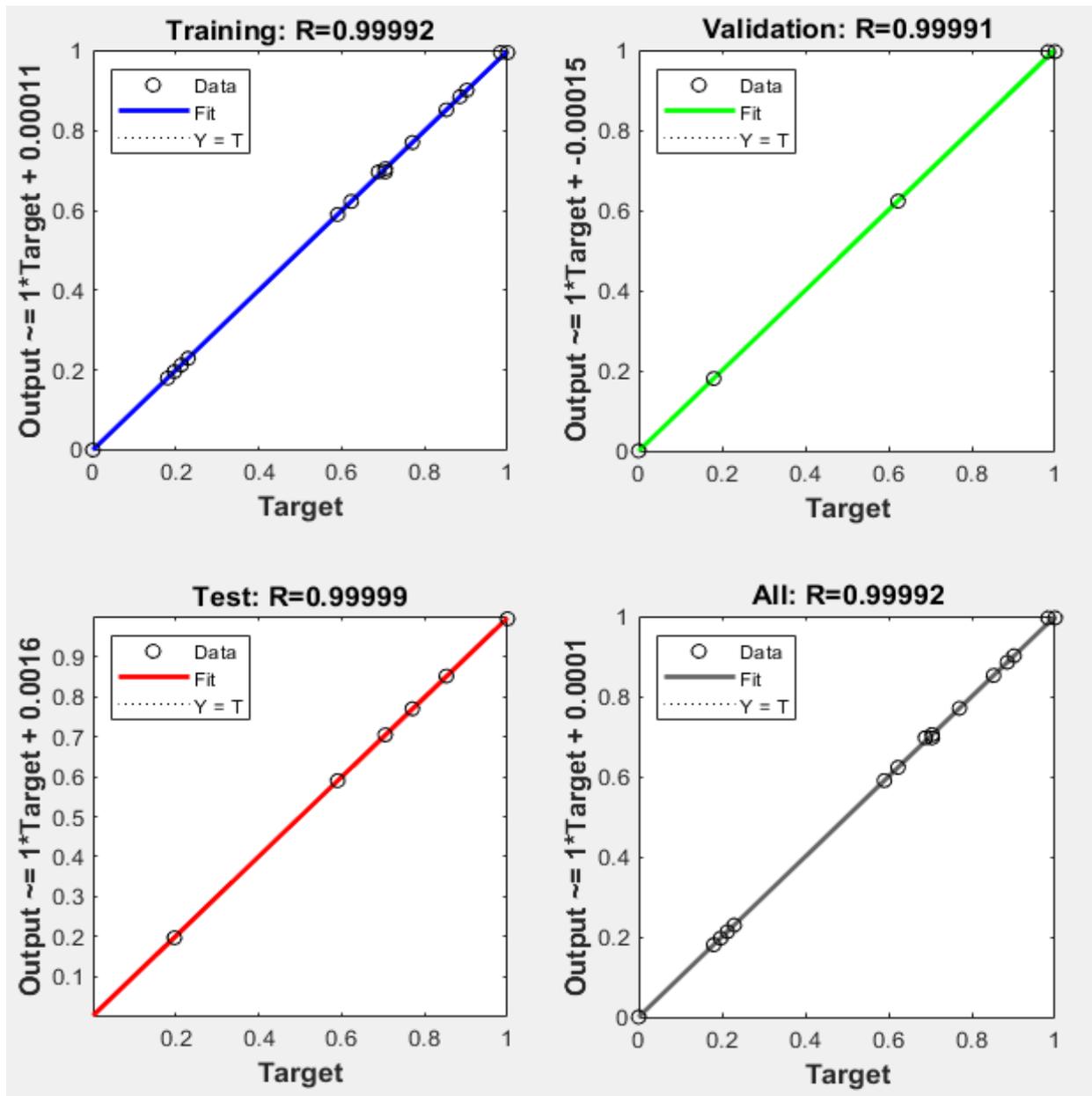


Figure III- 5: Graphiques de régression du RNA pour la prédiction du rendement de la production d'hydrogène.



**Figure III- 6:** Graphiques de régression du RNA pour la prédiction de la production du bio butanol.

Les valeurs expérimentales du rendement de la production du bio hydrogène et bio butanol sont indiqués par T (cible), tandis que les valeurs prédites du rendement de la production d'hydrogène et butanol sont indiqués par Y (sortie). La régression linéaire entre T et Y est l'ajustement linéaire et sa forme idéale serait  $Y = T$ . Comme il est observé sur les figures, les données dispersées sont très proches de la ligne  $Y = T$  inclinée à  $45^\circ$  et montrent une forte corrélation entre les valeurs expérimentales et prédites normalisées. Seules quelques données sont dispersées loin de la ligne d'ajustement. Cela pourrait être lié au bruit des données expérimentales qui provoque l'apparition d'erreurs de prédiction. D'après les valeurs de  $R^2$  présentées dans le tableau 3.4, on peut observer que toutes les valeurs de  $R^2$  pour le processus

d'entraînement, de validation et de test sont supérieures à 0,99 pour les deux modèles. L'ensemble de données a montré une valeur de  $R^2$  maximales de 0.99881. Pour la prédiction du rendement de la production d'hydrogène, et une valeur de  $R^2$  de 0.99977 pour la prédiction du rendement de la production du butanol. Les valeurs de  $R^2$  indiquent que 99,94 % de la variation totale a été identifiée et expliquée par les modèles RNA, et correspond aux données expérimentales. La proximité des valeurs  $R^2$  à 1 désignent l'efficacité et la précision de prédiction élevée des modèles développés. Il reflète que ces modèles donnent des performances adaptées et adéquates.

**Tableau III- 8:** Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de l'hydrogène.

Production d'hydrogène (L/L)	Modèle
5,1	5,1
2,3	2,3
6,9	6,8625
6	6
1,2	1,2
4,3	4,3
2,1	2,15
2,3	2,3
6,9	6,8625
6,8	6,8625
5,1	5,1
4,2	4,2
6	5,95
3,7	3,7
5,9	5,95
6,9	6,8625
2,2	2,15
6,5	6,5
2,4	2,45
6,9	6,8625
6,8	6,8625
4,7	4,7
6,9	6,8625
4,6	4,7

2,5	2,45
1,8	1,85
6,9	6,8625
6,8	6,8625
6,8	6,8625
6,9	6,8625
6,5	6,5
6,9	6,8625
5,3	5,35
5,4	5,35
1,2	1,2
3,7	3,7
1,9	1,85
4,2	4,2
4,3	4,3

**Tableau III- 9:** Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de butanol

<b>Production du butanol (g/L)</b>	<b>Modèle</b>
15,7	15,675
15,6	15,675
14,3	14,3
14,8	14,8
13,2	13,2
15,6	15,675
15,1	15,1
13,9	13,85
13,2	13,2
15,7	15,675
10,7	10,7
10,8	10,8
10,8	10,8
11	11
15,7	15,675
15	15
15,7	15,675
10,8	10,8
15,7	15,675
15,6	15,675
13,8	13,85
10,9	10,9
14,8	14,8
15,7	15,675
15,7	15,675
10,7	10,7
9,6	9,6
11	11
13,9	13,9
9,6	9,6
15,7	15,675
14,3	14,3
15,1	15,1

13,4	13,4
13,9	13,9
15	15
10,9	10,9
10,8	10,8
13,4	13,4

### **III.4 Conclusion :**

Les résultats des modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels révèlent que cette approche est robuste avec une capacité prédictive élevée pour la prédiction du rendement de la production du bio hydrogène et bio butanol à partir des déchets par le procédé de la fermentation, en raison de sa vitesse et de sa capacité d'apprentissage.

---

# Conclusion générale

---

### **Conclusion générale**

En conclusion, la transition vers des sources d'énergie alternatives est devenue cruciale en raison de l'importance de l'énergie dans la croissance mondiale et des préoccupations croissantes concernant la durabilité de l'énergie fossile. L'hydrogène se présente comme un biocarburant approprié en raison de ses caractéristiques environnementales, notamment l'absence d'émissions de carbone et la production d'eau propre, ainsi que son contenu énergétique élevé. La fermentation a été identifiée comme la voie biologique la plus efficace pour produire du bio hydrogène et du bio butanol, offrant ainsi une opportunité de valoriser différents déchets comme matière première. L'utilisation de l'intelligence artificielle, notamment des réseaux de neurones artificiels, présente un intérêt croissant dans la modélisation de phénomènes chimiques, biologiques et physiques, y compris la fermentation.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au développement d'un model numérique en utilisant la méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) afin de prédire la production d'hydrogène et de butanol. Plusieurs paramètres tels que la température, l'espace libre de la cuve du réacteur, et la supplémentation en acide butyrique ont été prisent comme paramètre d'entrées et production du bio hydrogène et bio butanol comme paramètre de sortie. Les modèles développés contiennent une seule couche cachée et 11 neurones pour la prédiction de la production du bio hydrogène et bio butanol.

Les résultats ont montré une très bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites, l'analyse des performances a montré que la précision des modelés est élevée, l'ensemble de données a présenté une valeur de  $R^2$  maximale de 0.99881 pour la prédiction de la production du bio hydrogène, et une valeur de  $R^2$  de 0.99977 pour la prédiction de la production du bio butanol. Les valeurs de  $R^2$  indiquent que 99.93 de la variation totale a été identifiée et expliquée par les modèles RNA, et correspond aux données expérimentales.

La proximité des valeurs  $R^2$  à 1 désignent l'efficacité et la précision de prédiction élevée des modèles développés. Il reflète que ces modèles donnent des performances adaptées et adéquates. Ces résultats révèlent que l'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels est robuste avec une capacité prédictive élevée pour la prédiction de la production du bio hydrogène et bio butanol, en raison de sa vitesse et de sa capacité.

En perspective, nous proposons d'enrichir notre base de données en ajoutant plus de paramètres qui en un effet sur la production de l'hydrogène, Nous proposons d'aller vers (l'optimisation pour déterminer le volume d'hydrogène).

---

# Référence bibliographie

---

## Référence Bibliographique

---

### Références

- [1] BILLÉ, Raphaël. *La Gestion intégrée du Littoral se décrète-t-elle?: une analyse stratégique de la mise en œuvre, entre approche programme et cadre normatif*. 2004. Thèse de doctorat. Paris, ENGREF.
- [2] BILLET, Philippe. Les métamorphoses juridiques du déchet. *Raison présente*, 2021, no 4, p. 29-37.
- [3] LAMOURI, Salah Eddine, MERABET, Haidar, et KHOUBZI, Inas. Contribution à une élaboration d'un plan de gestion des déchets solides ménagers et assimilés pour la ville d'El Oued. 2021.
- [4] HAMZAOU, Sabri. *Gestion et impact des déchets solides urbains sur l'environnement, et tarf commune*. 2011. Thèse de doctorat. Annaba.
- [5] THAKUR, Vijay Kumar (ed.). *Green composites from natural resources*. CRC Press, 2013.
- [6] DETEMPLE, Marie, ABOUBACAR, Salou, ABOUBACAR, Adam Elhadj, *et al.* Innovations et gestion des déchets médicaux: le cas du nouvel hôpital de référence de Niamey, Niger. *Sante Publique*, 2021, vol. 33, no 5, p. 729-739.
- [7] RUSHBROOK, Philip et PUGH, Michael. *Solid waste landfills in middle and lower-income countries: a technical guide to planning, design, and operation*. The World Bank, 1999.
- [8] DAMIEN, Alain. *Guide du traitement des déchets*. Paris : Dunod, 2004.
- [11] DAHMANE, Sanaâ. *Evaluation de la gestion des déchets ménagers et assimilés de la ville d'Oran*. 2012. Thèse de doctorat. USTO.
- [12] LUPTON, Sylvie. *Économie des déchets: une approche institutionnaliste*. De Boeck, 2011.
- [13] KABOUR, Leila, *et al.* Enquête à l'étude de la gestion et traitement des déchets hospitaliers dans le secteur sanitaire de la wilaya de Tissemsilt:(Cas de l'hôpital de la commune de Tissemsilt), 2003,
- [14] LE BOZEC, A. Le service d'élimination des ordures ménagères: coûts, organisation, gestion. *Analyse systémique et économique du recyclage des ordures*. Paris: L'Harmattan/CEMAGREF, 1994.

## ***Référence Bibliographie***

---

- [15] ABDELKRIM, AMEL, RABHI, KHADIDJA, TAHRI, Ahmed, *et al.* *Optimisation De Temps De Rétention Hydraulique Pour La Digestion Anaérobie Des Déchets Ménagers De La Ville D'Adrar*. 2021. Thèse de doctorat. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR.
- [16] Dupriez. N, Leener. P, Jardin et verger d'Afrique. Edition, Terre et vie, Belgique , pp354.
- [17] GUERMOUD, Noredine et ADDOU, Ahmed. Etude et caractérisation des déchets ménagers de la ville de Mostaganem (Ouest-Algérie). *Environnement, Ingénierie & Développement*, 2014.
- [18] HUMEAU, Philippe et LE CLOIREC, Pierre. *Emissions Gazeuses et Traitement de l'air en Compostage*. Ed. Techniques Ingénieur, 2010.
- [19] AUGISEAU, Vincent et BARLES, Sabine. Bilan de Flux de Matières de la Région Ile-de-France en 2015. *Rapport de recherche pour le Conseil régional d'Île-de-France*, 2018.
- [20] FRÉDÉRIC, Marie-Claire. Ni cru ni cuit: histoire et civilisation de l'aliment fermenté. (*No Title*), 2014.
- [21] CHENG, Hefa, ZHANG, Yanguo, MENG, Aihong, *et al.* Municipal solid waste fueled power generation in China: a case study of waste-to-energy in Changchun city. *Environmental science & technology*, 2007, vol. 41, no 21, p. 7509-7515.
- [22] BOUDJEMAA, D. 124 Centre d'enfouissement technique en Algérie. Ministre de l'Aménagement du territoire et de l'environnement. *Journal of djazairiess*, 23/03/2015. <https://www.djazairiess.com/akhbarelyoum>, 2015, vol. 136957.
- [23] KEHILA, Y. Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie. *Réseau régional d'échange d'informations et d'expertise dans le secteur des déchets dans les pays du Mashreq et du Maghreb*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 46p, 2014.
- [24] DJAFOUR, Ahmed. *Etude d'un système de production d'hydrogène solaire*. 2013. Thèse de doctorat. Université de Ouargla-Kasdi Merbah.
- [25] REDDI, K., MINTZ, M., ELGOWAINY, A., *et al.* Building a hydrogen infrastructure in the United States. In : *Compendium of hydrogen energy*. Woodhead Publishing, 2016. p. 293-319.

## ***Référence Bibliographie***

---

- [26] HAYKIN, Simon. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR, 1998.
- [27] DREYFUS, G., MARTINEZ, J. M., SAMUELIDES, M., *et al.* Réseaux de neurones, méthodologie et applications, édité by G. Dreyfus, Eyrolles, Paris, 2002.
- [28] OUKACINE, Nacima. *Utilisation des réseaux de neurones pour la reconstitution de défauts en évaluation non destructive*. 2012. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri..
- [29] MELKI, Rima. Apprentissage des réseaux de neurones MLP par une méthode hybride à base d'une métaheuristique. 2019.
- [30] SZLÁVIK, Zoltán et SZIRÁNYI, Tamás. Face identification with CNN-UM. In : *Proc. ECCTD*. 2003.
- [31] DJAAOUI Sabrine. Optimisation des réseaux de neurones par PSO. 2015.
- [32] HASANZADEHSHOOILI, Hadi, LAKIROUHANI, Ali, et MEDZVIECKAS, Jurgis. Superiority of artificial neural networks over statistical methods in prediction of the optimal length of rock bolts. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2012, vol. 18, no 5, p. 655-661.
- [33] ABDI, H. Précis de Connexionnisme, Intelligence Artificielle et Intelligence Naturelle, Paris: Presse Universitaires de France in J. P Rossi, J. F Le Ny, J. F (Eds.), 1993.
- [34] KALAKH, Mina. *Modélisation avec les réseaux de neurones d'un canal UWB dans un environnement minier souterrain*. 2013. Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue.
- [35] CHEKROUN, S. Commande neuro-floue sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasée. *Mémoire de Magister, ENSET d'Oran*, 2009.
- [36] YADAV, Santoshnambi, SINGH, Vaishali, MAHATA, Chandan, *et al.* Optimization for simultaneous enhancement of biobutanol and biohydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no 5, p. 3726-3741.