République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université YAHIA FARES de MEDEA

Faculté de Technologie

THESE DE DOCTORAT LMD

Présentée pour l'obtention du grade de Docteur

En : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des énergies renouvelables

Présentée par

M. BELGROUN ZOUBIR

Thème

Etude, synthèse et modélisation de la réfrigération magnétique pour la liquéfaction de l'hydrogène

Soutenue publiquement, le **03/11/2022**

Le jury composé de :

Qualité	Nom et Prénom	Grade	Université de rattachement
Président	**CHIBA Younes**	**Pr.**	**UYF-Médéa**
Examinateur	**HENINI Noureddine**	**MCA.**	**UYF-Médéa**
Examinateur	**TALEB Rachid**	**Pr.**	**Université Hassiba Benbouali-Chlef**
Examinateur	**GUENOUNOU Abderrezak**	**MCA.**	**Université de Blida 1**
Directeur de thèse	**HATTI Mustapha**	**Directeur de recherche**	**UDES/EPST CDER**
Co-directeur de thèse	**HANINI Salah**	**Pr.**	**UYF-Médéa**

RESUME

Le secteur de l'énergie est confronté à plusieurs contraintes majeures, la décroissance énergétique, l'accroissement de la demande et l'accélération du réchauffement climatique. Le recours à l'hydrogène comme vecteur énergétique, et son utilisation via une pile à combustible, peuvent apporter des réponses adaptées à ces défis. L'hydrogène est un vecteur énergétique, une fois produit, il peut être stocké, transporté et utilisé comme électricité. L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, peut aussi permettre de produire plus efficacement électricité et chaleur, de stocker massivement de l'électricité, de prolonger l'autonomie des véhicules électriques et enfin alimenter des dispositifs à piles à combustible pour alimenter en puissance électrique des sites stratégiques.

L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique est pressentit ces dernières années comme un bon moyen de pallier l'intermittence des énergies renouvelables, appelées à prendre une place déterminante dans le mix énergétique. L'intérêt de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, inépuisable et non polluant, est limité aujourd'hui par ses modes de production, aujourd'hui essentiellement à partir d'énergies fossiles, car l'hydrogène ne se trouve pas à l'état naturel, de même que du point de vue encombrement, dans les conditions normales de température et de pression (CSTP) 1 bar, 20°C, l'hydrogène occupe un volume de 333 litres/kWh et dans les mêmes conditions, l'essence occupe 0,1 litre/kWh.

Les meilleures performances en termes de masse et de volume semblent venir des techniques de stockage cryogénique de l'hydrogène sous forme liquide, mais restent d'importants problèmes à résoudre.

L'objectif principal de la thèse serait de contribuer à la prédiction des performances du système de production du froid magnétique pour la liquéfaction de l'hydrogène moyennant l'intelligence artificielle (réseaux de neurones) comme outil de travail. Cette étude se focalisera sur une approche globale dans laquelle seront étudiés et maîtrisés les différents aspects de cette technologie. Il serait question d'aborder l'étude des différents aspects de la réfrigération magnétique et des matériaux magnétocaloriques, de cerner ses problèmes magnétiques, mécaniques, thermiques et fluidiques, de dégager les paramètres importants caractérisant le pouvoir magnétocalorique, de développer une modélisation de l'effet magnétocalorique, d'en faire des comparaisons, d'essayer d'optimiser les sources de champs, d'évaluer les performances du système magnétocalorique et des échanges thermiques,

d'analyser les résultats pour une application à la production d'hydrogène liquide et d'en tirer des conclusions.

Mots-clés : Hydrogène, Vecteur énergétique, Stockage cryogénique, Effet Magnétocalorique, Intelligence artificielle.

ABSTRACT

The energy sector is facing several major constraints, the energy decline, the increasing demand and accelerating global warming. The use of hydrogen as an energy vector via a fuel cell, can provide appropriate solutions to these challenges. once produced, the Hydrogen can be stored, transported and utilized as electricity.

Hydrogen, as an energy carrier, contribute to a more efficient electricity and heat production , to store electricity on a massive scale, to extend the autonomy of electric vehicles and finally to supply fuel cell devices to provide power electricity strategic sites.

The hydrogen, as an energy carrier, is considered in recent years as a good way to overcome the intermittency of renewable energies, which are expected to play a decisive role in the energy mix. The interest given to the hydrogen as an energy carrier, inexhaustible and non-polluting, is currently limited by its production methods, today essentially from fossil fuels, because it is not found in its natural state, as well as from the size point of view, under normal temperature and pressure conditions (CSTP) 1 bar, 20°C, hydrogen occupies a volume of 333 litres/kWh and under the same conditions, the Gasoline occupies 0.1 litre/kWh.

The best performances in terms of mass and volume come from cryogenic hydrogen storage techniques in liquid form, but there are still important problems to be solved.

The main objective of this thesis would be to contribute to performance of the magnetic cold production system for the liquefaction of hydrogen using artificial intelligence (neural networks) as a working tool prediction. This study will focus on a global approach in which the different aspects of this technology will be studied and mastered.

The study of the different aspects of magnetic refrigeration and magnetocaloric materials has to be carried out, to identify its magnetic, mechanical, thermal and fluidic weaknesses, to define the important parameters characterizing the magnetocaloric power, to develop a modeling of the magnetocaloric effect, to make comparisons, to try to optimize the field

sources, to evaluate the performances of the magnetocaloric system and the heat exchanges, to analyze the results for an application to the production of liquid hydrogen and to draw conclusions.

Keywords: Hydrogen, Energy carrier, Cryogenic storage, Magnetocaloric effect, Artificial intelligence.

ملخص

يواجه قطاع الطاقة العديد من العراقيل و الصعوبات ، تراجع النمو الطاقوي ، زيادة الطلب ، ظاهرة الاحتباس الحراري. يمكن أن يشكل استعمال الهيدروجين كناقل للطاقة ، واستخدامه عبر خلية وقود ، حلا مناسبا لتخطي هذه العراقيل.

الهيدروجين مادة ناقلة للطاقة عند إنتاجه، يمكن تخزينه، نقله، استخدامه ككهرباء. يمكن للهيدروجين ، باعتباره ناقلًا للطاقة ، المساهمة في إنتاج الكهرباء والحرارة بشكل أكثر فعالية ، وكدا تخزين الكهرباء على نطاق واسع ، وضمان استقلالية المركبات الكهربائية لمدة اطول ، وأخيراً تزويد الأجهزة التي تشتغل باستعمال خلايا الوقود لتزويد المواقع الاستراتيجية بالكهرباء.

يُنظر للهيدروجين ، باعتباره مادة ناقلة للطاقة ، في السنوات الأخيرة على أنه وسيلة جيدة لمجابهة نقص اوغياب الطاقات المتجددة ، والتي من المتوقع أن يكون لها دورًا حاسمًا في المزيج الطاقوي. إن الاهتمام بالهيدروجين كناقل للطاقة ، مادة غيرنافدة وغير ملوثة للبيئة ، محدود حاليًا بطرق إنتاجه ، الدي يتم اليوم أساسًا من الوقود الأحفوري ، كون الهيدروجين غير موجود في حالته الطبيعية ، وكذلك من وجهة نظر الحجم ، تحت ظروف درجة الحرارة والضغط العادية (1 CSTP) بار ، 20 درجة مئوية ، يحتل الهيدروجين حجم 333 لترًا / كيلوواط ساعة وفي ظل نفس الظروف ، يحتل البنزين 0.1 لتر / كيلوواط ساعة.

يبدو أن أفضل النتائج من حيث الكتلة والحجم متحصل عليها عن طريق استعمال تقنيات التخزين المبرد للهيدروجين على شكل سائل ، ولكن لا تزال هناك مشاكل مهمة يجب حلها.

الهدف الرئيسي لهده الأطروحة هو المساهمة في التنبؤ بنتائج و فعالية نظام إنتاج التبريد المغناطيسي لتمييع الهيدروجين باستخدام الذكاء الاصطناعي (الشبكات العصبية) كأداة عمل. ستركز هذه الدراسة على نهج عالمي يتم من خلاله دراسة الجوانب المختلفة لهذه التكنولوجيا وإتقانها.

ستتم دراسة الجوانب المختلفة للتبريد المغناطيسي والمواد المغناطيسية الحرارية ، لتحديد سلبياتها المغناطيسية ،الميكانيكية ، الحرارية والموائع ، تحديد المعايير المهمة التي تميز القوة المغناطيسية ، لتطوير نمذجة التأثير المغنطيسي من اجل إجراء مقارنات ومحاولة تحسين المصادر الميدانية وتقييم عمل النظام المغنطيسي والمبادلات الحرارية ،تحليل النتائج من اجل التطبيق لإنتاج الهيدروجين السائل واستخلاص النتائج.

الكلمات المفتاح: الهيدروجين ، ناقل طاقوي ، التخزين عن طريق التبريد ، التأثير المغنطيسي الحراري ، الذكاء الإصطناعي.

Remerciements

Au terme de ce travail, je voudrais remercier toutes les personnes qui ont eu la gentillesse de m'aider et me soutenir.

Je tiens, tout d'abord, à remercier mon directeur de thèse, Monsieur ***Mustapha HATTI****, directeur de recherche à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), qui m'a encadré tout au long de ce travail et m'a fait partager ses brillantes intuitions tout en m'inculquant l'autonomie dans la recherche. Qu'il soit aussi remercié pour sa disponibilité permanente, son souci du détail, ses conseils judicieux et pour les corrections méticuleuses apportées au présent manuscrit.*

Je remercie, également, Monsieur ***Salah HANINI****, Professeur à l'Université YAHIA FARES de MEDEA, qui a accepté de s'associer au présent travail en qualité de Co-directeur de thèse, pour les nombreux conseils et pour avoir su compléter mes lacunes dans le domaine.*

J'exprime ma gratitude envers Madame ***Afef LEBOUC,*** *directeur de recherche au CNRS et responsable de l'équipe de recherche MADEA au sein du laboratoire G2ELab(Grenoble), qui a accepté de me recevoir dans son laboratoire. Je la remercie aussi pour sa générosité scientifique. C'est grâce à elle que j'ai pu concilier connaissances théoriques et recherches expérimentales pendant cette thèse.*

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur ***Younes CHIBA****, Professeur à l'Université YAHIA FARES de MEDEA, qui a accepté de présider le jury de cette thèse. Aussi j'exprime ma gratitude à Monsieur* ***Rachid TALEB****, Professeur à l'Université HASSIBA BENBOUALI de CHLEF, Monsieur* ***Noureddine HENINI,*** *Docteur à l'Université YAHIA FARES de MEDEA et Monsieur* ***Abderrezak GUENOUNOU****, Docteur à l'Université SAAD DAHLEB de BLIDA, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être examinateurs.*

Merci aussi à tous ceux qui m'ont aidé dans ce travail : ***Sébastien FLURY, Hichem BENDJEBBAS, Hafida LEBIK*** *et* ***Abdelaziz SERRAI*** *qui ont eu la gentillesse de m'aider à la rédaction de ce manuscrit ainsi qu'à tous les membres de la division* ***FTEER*** *(Froid et Traitement des Eaux par Energies Renouvelables) de l'UDES et plus particulièrement les membres de l'équipe Distillation et Dessalement des Eaux Saumâtres et de Mer.*

Merci du fond du cœur à mon ami et grand frère ***Mustapha BENDJEBBAS*** *de m'avoir reçu chez lui durant mon séjour de formation à Grenoble et me mettre à l'aise sans oublier les délicieux plats partagés*

Merci à ***Naima BELGROUN****, sans elle rien de tout cela n'aurait été possible.*

Je dédie cette thèse :

A ma Mère

A ma Femme et mes Enfants

Selma, Adlène et Racim

A tous ceux que j'aime

Zoubir

TABLE DES MATIERES

Résumé

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale……1

Chapitre 1. Généralités sur l'hydrogène

I. Introduction…….. 4

I.1 Contexte…….. 4

I.2 Les caractéristiques de l'hydrogène…… 7

I.2.1 Historique …… 7

I.2.2 Pourquoi l'hydrogène ?..... 9

I.2.3 Les méthodes de production de l'hydrogène……... 10

I.2.3.1 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles…… 11

I.2.3.1.2 Production du gaz de synthèse ……..12

I.2.3.1.2.1 Vaporeformage…… 12

I.2.3.1.2.2 Oxydation partielle…….. 13

I.2.3.1.2.3 Reformage autotherme……. 14

I.2.3.1.2.4 Gazéification du charbon……. 14

I.2.3.1.3 Conversion du monoxyde de carbone en hydrogène…… 15

I.2.4. La production de l'hydrogène par procédés biologique……17

I.2.5. Production d'hydrogène alimenté par un générateur photovoltaïque……17

I.3. Les différentes formes de stockage de l'hydrogène…….29

I.3.1. Le stockage gazeux sous pression……..31

I.3.2. Le stockage sous forme liquide……..31

I.3.3. Le stockage solide de l'hydrogène…….32

Chapitre II. La Réfrigération magnétique

II.1.Principe de la réfrigération magnétique……33

II.2.Historique ……34

II.3.Caractérisation de l'Effet Magnétocalorique (EMC)……. 36

II.4. Matériaux à Effet Magnétocalorique et critères de sélection……..37

II.5.Cycles de Réfrigération Magnétique……39

II.5.1. Cycles sans régénération……...41

II.5.2. Cycles avec régénération…… 41

II.6. Etude descriptive d'un cycle AMR…….42

II.7.Dispositifs de réfrigération magnétique……45

II.7.1. Système magnétique de Brown…… 45

II.7.2. Système magnétique de Steyert……46

II.7.3. Système magnétique de Kirol……46

II.7.4. Dispositif magnétique réalisé en Espagne…… 47

II.7.5. Système magnétique Japonais…… 47

II.7.6 Dispositif magnétique du G2Elab……48

Chapitre III. Les outils de travail, Résultats et discussions

III.1. Introduction ……53

III.1. 1.Aperçu sur les modèles trouvés dans la littérature……54

III.2. Résultats de la simulation ……...57

III.3. Analyse des résultats de simulation…….58

III.3.1. Le modèle à base de réseau de neurones……...59

III.3.2. Traitement des données…….59

III.4 Conception du réseau……59

III.4.1.Le choix des entrées / sorties…… …. 60

III.4.2. La procédure d'apprentissage et résultats…… 62

III.4.3. Apprentissage avec rétro-propagation……. 62

III.4.4.Structure Matlab des réseaux ……. 63

III.4.5. Stratégie de détection d'Overfitting…….. 68

III.5.Conclusions…… 70

Conclusion générale…… 71

Références bibliographiques…… 72

Liste des Figures

Figure I.1 : Les sources de production d'hydrogène…… 10

Figure I.2: Les Procédés de production d'hydrogène…… 11

Figure. I.3 : Système photovoltaïque……... 20

Figure. I.4: Circuits model for PV cell……. 21

Figure. I.5 : Méthode Perturb & Observe…… 22

Figure. I.6 : Méthode Incrémentale Conductance…… 23

Figure. I. 7 : L'architecture du neurone formel…….24

Figure. I.8 : Convertisseur Cuk avec MPPT……..26

Figure. I.9 : Convertisseur SEPIC avec MPPT……. 27

Figure. I.10 : Cuk converter avec ANN…… 27

Figure.I.11: Comparison of the Cuk converter and the SEPICE for output voltage……28

Figure. I.12 : Comparaison entre le réseau neuronal artificiel et le P&O pour la tension de sortie…… 28

Figure. I.13 :. Power PV pour deux méthodes Réseau neuronal artificiel et P&O……29

Figure. I.14 : Entrée d'irradiations……. 29

Figure I.15 : Diagramme de phase de l'hydrogène……30

Figure. II.1 : Principe de l'effet magnétocalorique……33

Figure. II.2.: Evolution de l'EMC du Gadolinium à champ constant (2T et 5Ten fonction de la température …… 38

Figure .II.3: Evolution de la chaleur spécifique du Gadolinium en fonction de la température à champ constant (2T et 5Ten fonction de la température ……. 38

Figure. II.4 : Analogie entre un cycle magnétothermique et un cycle conventionnel de réfrigération à compression de vapeur ……. 40

Figure .II.5 : Description du cycle AMR et profils de température associés le long du régénérateur…… 43

Figure. II.6 : Gradient de température dans un lit régénérateur…….43

Figure. II.7: Représentation schématique du système magnétique de Steyert…… 46

Figure. II.8 : Dispositif de réfrigération magnétique à aimants permanents……..47

Figure. II.9 : Système magnétique japonais…….. 48

Figure. II.10 : Démonstrateur linéaire de réfrigération magnétique au G2Elab..51

Figure .II.11 : Principe de fonctionnement du DEMC au G2Elab……51

Figure. II.12 : Dispositif à aimants permanents pour l'étude du cycle AMR……52

Figure.III.1 : Multicouche complètement connecté (Feedforward), pour la résolution de problèmes statiques…… 60.

Figure III.2 : Schéma général du modèle à réseau de neurone…… 62

Figure. III.3 : Profil des températures ambiantes…… 65

Figure III.4 : Profil des températures froides…… 66

Figure. III.5: Profil des températures mesurées…… .66

Figure. III.6: Profil des températures générées…… 67

Figure. III.7: Superposition des températures…… 67

Figure. III.8: Profil des différentes températures issues de la modélisation…… 68

Figure III.9 : Courbe d'erreur de l'apprentissage, de la validation et du test……69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification périodique de Mendeleïev……. 8

Tableau I.2: Réserves mondiales des énergies primaires fossiles (base 2004) (IEA, 2006)…… 12

Tableau I.3 : Densités énergétiques pour différents combustibles……. 31

Introduction générale

Introduction générale

Etant face aux changements climatiques devenues de plus en plus inéluctables et retiennent l'attention des pouvoirs publics du monde entier. D'ores et déjà, on s'aperçoit que peu d'aspects de la vie sociale et économique resteront épargnés : selon toute probabilité, les changements climatiques se répercuteront sur le développement des nations, la protection de l'environnement et la sécurité énergétique et alimentaire. Le changement climatique exige une compréhension de son fonctionnement pour bâtir des politiques de gestion efficaces, car la variabilité climatique contemporaine a engendré des bouleversements des écosystèmes naturels et produit une désarticulation sociale. Il est donc nécessaire de revisiter certains concepts clés.

Les impacts sur l'environnement sont multiples, importants et de plus en plus fréquents : sécheresses, fonte des glaciers et de la glace de mer, élévation du niveau des océans, tempêtes tropicales. Ils affectent l'ensemble de la population mondiale et la biodiversité planétaire. Les activités humaines sont les principales responsables des changements climatiques actuels et de leurs impacts sur l'environnement. En effet, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le réchauffement climatique est bien réel et l'activité humaine en est responsable, par l'émission de gaz à effet de serre. Par ailleurs, au cours du siècle dernier, un réchauffement moyen de la température à la surface de la terre de 0,74 °C a été observé, alors qu'il était prévu que la température moyenne n'augmenterait que de 0,6 °C (GIEC, 2008). Les prévisions pour 2100 sont encore plus alarmantes, avec une augmentation prévue de la température moyenne de 2 à 4,5 °C (GIEC, 2008).

L'industrialisation et la course effrénée des pays producteurs et émergeants à l'exploitation des ressources naturelles fossiles (Charbon, gaz et pétrole) vont sans aucun doute participer la détérioration de l'environnement et de la qualité de la vie.

Dans cette optique, des efforts au niveau international et national ont vu le jour par la ratification des protocoles d'accord afin de réduire la température due aux émissions des gaz à effet de serre et préserver les ressources primaires naturelles pour les générations futures.

Pour pallier aux problèmes de disponibilité des ressources fossiles et répondre aux engagements internationaux, plusieurs configurations et solutions ont été évoquées selon l'endroit et la politique envisagée, il s'agit bien sûr, au recours à l'exploitation des énergies nouvelles et renouvelables.

L'utilisation des énergies renouvelables au niveau mondial ne date pas d'aujourd'hui, une avancée remarquable dans le domaine a suscité les gouvernements à s'intéresser d'avantage et la mettre en priorité dans leurs politiques énergétiques, il est clair que l'augmentation de la population et l'amélioration des conditions de vie impliquent une demande croissante et grandissante en électricité, climatisation, transport…

Au niveau national, on dispose d'un potentiel en énergies renouvelables parmi les plus grands au monde, La transition vers les énergies renouvelables en Algérie devrait être une nécessité et un choix stratégique. Elle permit:

- D'amorcer un développement durable apte à sécuriser l'accès à l'énergie aux populations même celles qui vivent dans les zones rurales et les plus enclavées ;
- De créer des industries, des activités économiques et des emplois verts : directs ou indirects ;
- De participer au mix énergétique et préserver les ressources non renouvelables disponibles.

La prise de conscience est le fruit des efforts menés jusqu'à présent au niveau des institutions universitaires, de recherches et développement, politiques et gouvernementales afin de lever les obstacles pour un déploiement des énergies renouvelables.

Un regain d'intérêt s'est affiché ces derniers temps quant à la diversification des ressources renouvelables existantes, suite aux résultats encourageants obtenus et le retour d'expérience dans le domaine, ne se limitant pas au solaire, éolien, géothermie, …. Mais à d'autres ressources à savoir l'hydrogène comme vecteur énergétique très intéressant.

Pour des usages industriels, l'hydrogène a commencé une nouvelle vie dans le domaine de l'énergie, il trouve d'ores et déjà différentes finalités, que ce soit comme vecteur de stockage ou de valorisation d'énergie renouvelable, ou comme complément au gaz naturel, voire

comme carburant, ainsi que pour une variété d'applications liées à la pile à combustible dans les domaines stationnaires ou mobiles.

La valorisation et le recours à ce vecteur énergétique ne pouvait voir le jour que grâce aux développements des techniques de production, de stockage et des domaines d'applications.

L'originalité de ce travail de thèse réside dans l'utilisation de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones) pour prédire les performances d'un système de production de l'hydrogène par effet magnétocalorique EMC. L'étude expérimentale réalisée au laboratoire de génie électrique de Grenoble- France G2ELab, nous a permit de mener une batterie de mesures pour les injectées dans le réseau élaboré et tiré un modèle du réseau de neurone qui va permettre de reproduire plus au moins les valeurs expérimentales mesurées.

Outre cette introduction générale, ce travail s'organise principalement autour de trois chapitres:

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur l'hydrogène, les différentes techniques de production de l'hydrogène, problème de stockage et ces formes, et nous terminerons par les diverses applications

Dans le deuxième chapitre, notions de base sur la réfrigération magnétique, les prototypes développés, le dispositif expérimental se trouvant au laboratoire G2ELab fera l'objet d'une présentation détaillée, composants, fonctionnement ainsi que les modes opératoires et protocoles réalisés

Le troisième chapitre de la thèse est consacré à l'outil de travail, les réseaux de neurones, historique, définitions et applications, ainsi qu'aux résultats obtenus, discussions et interprétations

Enfin, les perspectives de ce travail seront évoquées en conclusion générale, en vue d'un complément de travaux et d'une exploitation future des données acquises au cours de cette étude.

Chapitre I.

Généralités sur l'hydrogène

I. Introduction

I.1 Contexte :

L'ampleur de la crise mondiale en énergie et les risques environnementaux qui y sont associés ont été largement sous -estimés. Selon les estimations de la Banque mondiale et de l'Organisation des Nations unies (ONU), sur les 7 milliards d'habitants de la planète, 1,3 milliard n'ont toujours pas accès à l'électricité. Près de la moitié, 600 millions, vit en Afrique subsaharienne (soit les deux tiers de la population de ce continent), 300 millions environ en Inde, autant dans d'autres pays d'Asie. La Chine a presque complètement résolu ses problèmes d'électrification (8 millions seulement en sont dépourvus). En Amérique Latine, le chiffre tourne autour de 30 millions. La question du chauffage et de la cuisson des aliments est essentielle dans la mesure où l'usage de fours rudimentaires et de foyers ouverts pollue gravement l'air à l'intérieur des bâtiments, ce qui cause chaque année 2 millions de décès prématurés, notamment de femmes et d'enfants. On estime à 2,8 milliards le nombre de personnes qui utilisent encore du bois, du charbon de bois , de la bouse ou de la houille , très émetteurs de polluants et de CO_2. La situation est encore difficile en Chine (plus de 400 millions), en Afrique subsaharienne (autour de 700 millions), et surtout en Inde (plus de 870 millions). En Amérique Latine, le chiffre serait de 85 millions [1].

L'accès à l'énergie ne se pose plus dans les régions développées, souvent tempérées, où l'on parle aujourd'hui de « précarité énergétique » c'est-à-dire de difficultés liées aux prix de l'énergie, pas à sa disponibilité. Le problème se concentre dans les pays tropicaux et équatoriaux. Dans ces pays, l'électricité est généralement assurée dans les villes, souvent avec de multiples coupures, mais est très aléatoire dans les régions rurales. Or elle est essentielle pour toutes les activités humaines: pour pomper l'eau des nappes souterraines et la recycler, pour faire fonctionner les dispensaires et les écoles, pour éclairer les maisons dans ces zones où la nuit tombe tôt et ainsi permettre les activités artisanales à domicile indispensables à un niveau de vie minimal.

Assurer l'accès universel à l'énergie ne représente pas un coût considérable. Le secrétaire général des Nations unies, Ban Ki Moon, qui a lancé en 2011 l'initiative « Sustainable energy for all », l'a estimé à moins de 50 milliards de dollars par an jusqu'en 2030. C'est certes 5 fois le montant des investissements qui y ont été consacrés en 2010 mais seulement 3 % du total des investissements mondiaux dans le secteur énergétique. Sur cette somme annuelle, seulement 4 ou 5 milliards de dollars seraient nécessaires pour améliorer fortement la question de la cuisson des aliments.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) est cependant moins optimiste, notamment pour l'Afrique. D'ici 2040, la capacité électrique du continent aura quadruplé ; 950 millions d'habitants des pays subsahariens auront acquis l'électricité, mais à cette date il en restera encore… 530 millions qui en seront privés ! C'est que la population du continent africain aura dans le même temps doublé et passera en 2040 à 1,2 milliard d'habitants [2].
Variable dans l'espace, l'accès à l'énergie varie aussi dans le temps. La révolution du téléphone mobile, qui s'est imposée même dans des zones très isolées, implique l'équipement spécifique en points de recharge et en batteries.

À la demande de bien-être minimal, s'ajoute depuis quelques années la demande accrue de mobilité, pour les personnes comme pour les biens. Le développement du parc automobile est directement lié à la richesse économique et est donc sensible dans les pays réellement émergents, pas dans les pays les plus pauvres. Le trafic routier est ainsi très important dans un pays comme le Vietnam, qui s'est fortement industrialisé, et beaucoup plus faible dans le Cambodge voisin, resté plus rural. Le parc mondial a dépassé récemment le milliard de véhicules. Le parc chinois représentait en 2012 quelque 10 % du parc mondial, mais devrait doubler d'ici 2025. La part des parcs européens, américains et japonais (53 % aujourd'hui) ne pèsera plus que 42 % à ce même horizon.

Néanmoins, l'approvisionnement énergétique mondial reste essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et fissile. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques et l'effet de serre, mis en cause dans le réchauffement climatique, associés aux retombées radioactives liées au nucléaire sont des conséquences attendues. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale.

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes [3].
Dernièrement, les instances gouvernementales ont porté un intérêt particulier sur l'efficacité énergétique. Ceci a pour effet de favoriser la recherche et développement dans les secteurs les

plus énergivores en mettant l'accent sur des solutions innovatrices et écologiques pour substituer les technologies conventionnelles [4].

Le recours aux énergies nouvelles et renouvelables à l'échelle mondiale au début du siècle n'est qu'une preuve des efforts fournis pour satisfaire une demande aussi croissante et sans cesse, le manque de cette denrée signe de développement et du confort conduit à des déplacements de la population et au sous développement.

L'économie de l'Algérie se repose presque exclusivement sur les combustibles fossiles (99.2%) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Les énergies renouvelables n'occupent donc qu'une faible part du mix électrique national (0.8%) et leur production est partagée entre filière hydraulique, les filières solaires photovoltaïques et thermodynamique qui ne représentent que 0.1% du bilan [5].

La production fossile a augmenté en moyenne de 6.7% par an sur la période 2002-2012.

L'Algérie amorce cependant aujourd'hui une dynamique verte avec le lancement d'un programme prévoyant l'installation de plus de 22.000 MW étant dédiés à couvrir la demande intérieure en électricité et 10.000 MW destinés à l'exportation. De plus, l'option du nucléaire est toujours d'actualité pour faire face à la demande d'électricité galopante et une première centrale d'une puissance de 1000 MW pourrait voir le jour en 2025. En parallèle, SONELGAZ, qui contrôle 75% des capacités de production du pays, souhaite miser sur le développement des énergies renouvelables.

Le nouveau programme pour le développement des énergies vertes s'appuiera en grande partie sur le secteur solaire pour lequel l'Algérie dispose d'un des meilleurs potentiels au monde [6].

L'Algérie entend ainsi se positionner comme un acteur majeur de la production d'électricité solaire photovoltaïque, mais également thermodynamique, le pays a inauguré en juillet 2011 sa première centrale hybride solaire-gaz d'une capacité de 150 MW, dont 30 MW solaires, dans la région saharienne de Hassi R'mel,

L'énergie éolienne en Algérie a vu le jour par l'implémentation d'une ferme éolienne d'une capacité de 10 MW à Kabertene dans la wilaya d'Adrar [7].

Cette prise de conscience affichée traduit une bonne volonté des pouvoirs publics quant à la diversification des ressources pour un mix énergétique afin de garantir un accès pour tous et valoriser les potentiels naturels dont dispose le pays, la filière solaire, éolienne, biomasse, géothermale, hydraulique et même la filière hydrogène fait partie des secteurs concernés.

Il y a plus d'un siècle, Jules Verne écrivait dans « L'Île mystérieuse » qu'un jour l'eau serait employée comme source de combustible : « L'hydrogène et l'oxygène, qui la constituent,

utilisés isolément ou simultanément, fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisables. » Aujourd'hui, ce qu'on appelle abusivement le « moteur à eau » n'est plus tout à fait un rêve d'écrivain. Grâce au dihydrogène, qui peut être produit à partir de l'eau et qui, en brûlant dans l'air, produit lui-même de l'eau, la réalité est sur le point de rejoindre la fiction. Il est désormais au cœur de recherches internationales. Mais pourquoi tant d'attentes autour du dihydrogène ? Dominé par les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon), notre système énergétique actuel fait planer une double menace sur notre environnement : il expose la planète à l'épuisement de ses réserves naturelles et contribue à l'effet de serre. Si nous voulons un développement durable pour les générations futures, il devient nécessaire de diversifier nos modes de production d'énergie [8].

Considéré comme vecteur énergétique du futur, l'hydrogène semble être la solution miracle pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. Ceci peut être vrai à condition de résoudre tous les problèmes inhérents à son cycle de vie (production, distribution, stockage et utilisations) [9].

Les technologies de l'hydrogène font l'objet de programmes de recherches au CEA depuis la fin des années 1990. Elles contribuent au développement des énergies nouvelles et reposent notamment sur des savoir-faire en termes de matériaux, de procédés hautes températures et hautes pressions, et d'intégration.

I.2 Les caractéristiques de l'hydrogène :

I.2.1 Historique :

1766 : Le Français Louis-Joseph Gay-Lussac et l'Allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume de dioxygène pour deux volumes de dihydrogène.

1766 : Le chimiste britannique Henry Cavendish parvient à isoler une étrange substance gazeuse qui, en brûlant dans l'air, donne de l'eau : le dihydrogène.

1781 : Appelé jusqu'alors "air inflammable", l'hydrogène doit son nom au chimiste français Antoine-Laurent de Lavoisier, qui effectue la synthèse de l'eau.

L'hydrogène premier de la classe, de tous les éléments chimiques, l'hydrogène est le plus léger car il possède la structure atomique la plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron. Il tient donc la première place dans la classification périodique de Mendeleïev.

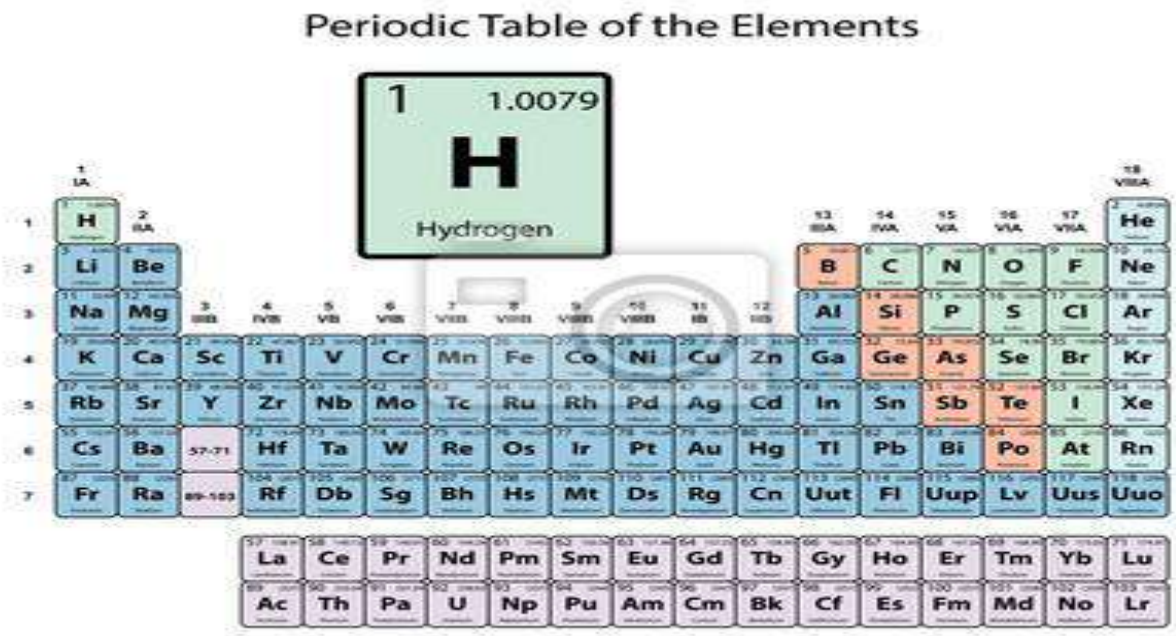


Tableau I.1 : Classification périodique de Mendeleïev.

1839 : L'Anglais William R. Grove découvre le principe de la pile à combustible : il s'agit d'une réaction chimique entre le dihydrogène et le dioxygène avec production simultanée d'électricité, de chaleur et d'eau.

1939-1953 : L'Anglais Francis T. Bacon fait progresser les générateurs chimiques d'électricité, qui permettent la réalisation du premier prototype industriel de puissance.

1960 : À partir de cette date, la Nasa utilise la pile à combustible pour alimenter en électricité ses véhicules spatiaux (capsules Apollo et Gemini).

L'ancêtre de tous les autres éléments. Présents dès les premiers instants de l'Univers, les noyaux d'hydrogène ont fusionné dans les étoiles pour donner naissance à des noyaux plus lourds et plus complexes, qualifiée de petite molécule pleine d'énergie.

La molécule de dihydrogène est constituée de deux atomes d'hydrogène (H2). Sa combustion avec le dioxygène (O2) ne produit que de l'eau (H2O) :

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O. \qquad (I.1)$$

Incolore, inodore, non corrosif, le dihydrogène a l'avantage d'être particulièrement énergétique. La combustion d'1 kg de ce gaz libère environ 3 fois plus d'énergie qu'1 kg d'essence (soit 120 MJ/kg contre 45 MJ/kg pour l'essence).

En revanche, comme ce gaz est très peu dense, il occupe, à masse égale, un volume bien plus grand qu'un autre. Ainsi, pour produire autant d'énergie qu'avec 1 litre d'essence, il faut 4,6 litres de dihydrogène comprimé à 700 bars. Ces volumes importants sont une contrainte pour

le transport et le stockage sous forme gazeuse. Comme de nombreux combustibles, le dihydrogène peut s'enflammer ou exploser au contact de l'air. Il doit donc être utilisé avec précaution. Toutefois la petitesse de ses molécules lui permet de diffuser très rapidement dans l'air (quatre fois plus vite que le gaz naturel), ce qui est un facteur positif pour la sécurité.

Le dihydrogène est présent partout mais disponible nulle part, Bien qu'il soit très abondant à la surface de notre planète - l'eau couvre 70 % du globe terrestre - il n'existe jamais à l'état pur. Le dihydrogène pourrait être utilisé comme source quasi-inépuisable d'énergie… à condition de savoir le produire en quantité suffisante. On trouve également de l'hydrogène dans les hydrocarbures qui, comme leur nom l'indique, sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. Enfin, tout organisme vivant, animal ou végétal, est composé d'hydrogène : la biomasse est donc une autre source potentielle d'hydrogène.

I.2.2 Pourquoi l'hydrogène ?

L'hydrogène, comme vecteur énergétique, peut en principe remplacer toutes les formes d'énergies utilisées aujourd'hui et fournir des services énergétiques à tous les secteurs de l'économie. L'attrait fondamental de l'hydrogène tient à ses avantages écologiques potentiels par rapport aux combustibles fossiles. Sur le lieu d'utilisation, l'hydrogène peut être brûlé de manière à ne dégager aucune émission toxique. Produit sans émettre de dioxyde de carbone ni aucun autre gaz à effet de serre déréglant le climat, l'hydrogène pourrait donc constituer le fondement d'un système énergétique réellement durable : l'économie de l'hydrogène. Pour y voir plus clair sur ce sujet, il est à noter que l'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire, comme l'est par exemple l'électricité. Il est donc nécessaire de posséder des technologies capables de le produire. Il en existe plusieurs, existantes, en cours de développement industriel ou à l'état de recherche, comme celles basées sur les combustibles fossiles, le nucléaire ou encore les énergies renouvelables. Ensuite, vient le stockage et le transport, et enfin l'utilisation finale. Cette dernière peut concerner tant le transport de toute sorte, que les besoins domestiques en chaleur et en électricité. Ainsi, certains parlent à ce sujet d'une éventuelle « civilisation de l'hydrogène ». En outre, le stockage, le transport et l'utilisation terminale de l'hydrogène se font toujours sans émission de gaz à effet de serre.

L'hydrogène est l'un des éléments les plus abondants de la planète. Mais, contrairement aux hydrocarbures, il n'existe pas de gisements permettant de l'extraire directement. En effet, cet élément se trouve dans la nature presque systématiquement combiné avec d'autres atomes : l'oxygène dans le cas de l'eau ou le carbone dans le cas du gaz naturel. Pour le produire, il est donc nécessaire d'avoir une source d'hydrogène à proprement parler (gaz naturel, eau,

biomasse etc.) et une source d'énergie. La source d'hydrogène et la source d'énergie peuvent se confondre, comme dans le cas d'une production à partir de gaz naturel, ou être complètement distinctes, comme dans celui de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau (la source d'énergie est l'électricité et la source d'hydrogène est l'eau). De nos jours, l'hydrogène est produit pour près de 96 % à partir d'énergie fossile **(Figure I.1**) et le gaz naturel est la matière première la plus utilisée.

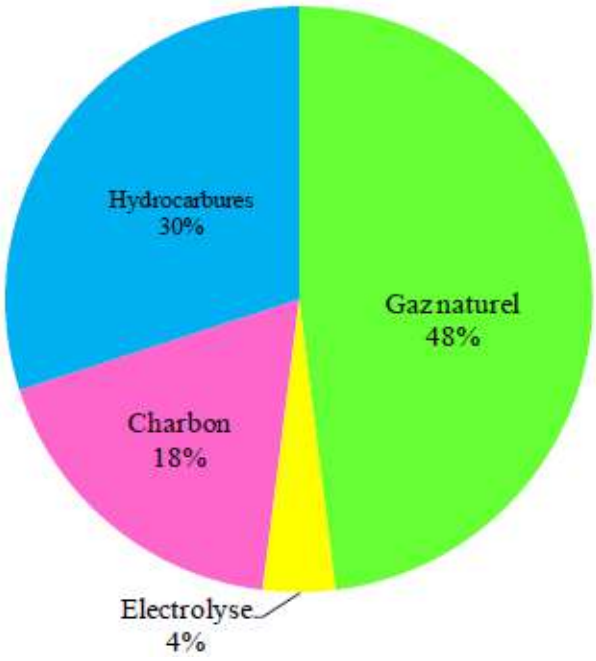


Figure I.1 : Les sources de production d'hydrogène [10]

I.2.3 Les méthodes de production de l'hydrogène :

L'hydrogène peut être produit à partir de plusieurs sources différentes. Toutefois, actuellement, l'hydrogène est produit en majeure partie (97 %) à partir du reformage d'hydrocarbure [17][18] .

Le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, de la quantité exigée et de la pureté souhaitée de l'hydrogène.

Les méthodes de production à partir **des énergies fossiles** sont : [19]

- Le vaporeformage des hydrocarbures;
- Le reformage autotherme;
- L'oxydation partielle des hydrocarbures;
- La gazéification du charbon.

A partir **de la biomasse** sous toutes ses formes (résidus forestiers, agroalimentaires ou déchets organiques,…),

La production d'hydrogène se fait par pyrolyse ou gazéification en donnant un mélange gazeux (H2, CH4, CO2, CO et N2).

- Les méthodes de production de l'hydrogène **à partir de l'eau** se font par:

• Electrolyse;

• Photolyse;

• Procédé thermochimique;

• Thermolyse (décomposition thermique directe);

- La production de l'hydrogène par **voie biologique**.
  - Les procédés directs ;
  - Les procédés indirects.
- La production de l'hydrogène à partir du nucléaire.

Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène de manière économiquement et écologiquement satisfaisante. La production de l'hydrogène à partir des sources renouvelables, en particulier de la biomasse, stimule la curiosité des chercheurs. Ceci est du au fait que ces procédés sont durables à faible émissions des gaz à effet de serre et à faible consommation d'énergie. La figure I.2 illustre les voies les plus connues pour la production d'hydrogène. [10] [11] [12]

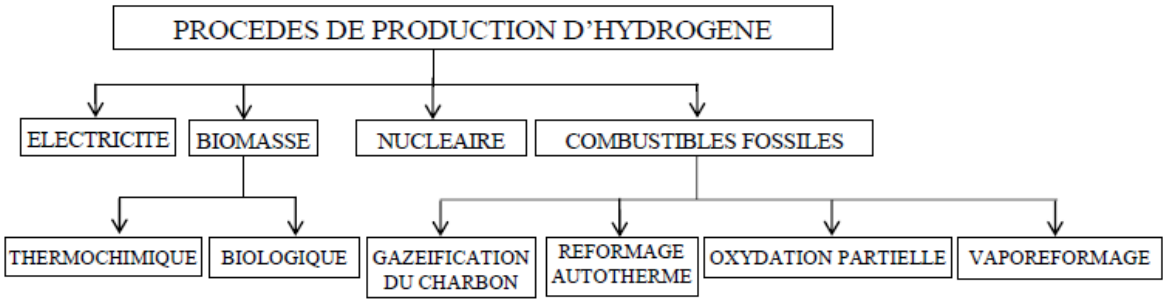


Figure I.2: Les Procédés de production d'hydrogène.

I.2.3.1 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles :

Actuellement 96% de la production mondiale d'hydrogène provient des ressources fossiles [9][10] .En effet, les techniques de conversion de carburants fossiles en vue de produire de l'hydrogène sont aujourd'hui les plus mûres et les plus économiques. Néanmoins, elles ne

pourraient constituer une solution à long terme vu l'aspect abiotique de ces ressources fossiles. Elles pourraient donc seulement constituer une solution à moyen terme.

Le Tableau I.2 présente un état des lieux des réserves des énergies fossiles déterminé en 2004.

Tableau I.2: Réserves mondiales des énergies primaires fossiles (base 2004) (IEA, 2006)

	Réserve mondiale Prouvée (Gtep)	**Consommation annuelle (Gtep)**	**Durées au rythme actuel de la consommation (année)**	**Remarques**
PETROLE	≈140	3,9	≈40 ans	80% des réserves dans les pays OPEP
GAZ NATUREL	≈160	2,4	≈60 ans	
CHARBON	≈600	2,8	≈200 ans	

D'autre part l'utilisation des ressources d'énergie fossile contribue d'une manière très considérable au réchauffement climatique à travers des émissions des gaz à effet de serre (GES). Une augmentation de 70% des émissions des gaz à effet de serre, exprimée en équivalent GtCO2/an, entre 1970 et 2004. [13]

Le dioxyde de carbone d'origine fossile demeure le plus important GES anthropogénique enregistrant une augmentation de 80% entre 1970 et 2004.

On distingue quatre processus au sein des technologies de production d'hydrogène à partir des énergies fossiles à savoir :

Le vaporeformage, l'oxydation partielle, le reformage autotherme et la gazéification du charbon.

Les trois principales étapes mises en jeux lors de la production d'hydrogène à partir des ressources fossiles sont : -Production du gaz de synthèse. -Conversion du monoxyde de carbone en hydrogène (Water Gas Shift). -Purification : obtention d'hydrogène à grande pureté.

I.2.3.1.2 Production du gaz de synthèse :

I.2.3.1.2.1 Vaporeformage :

Le vaporeformage ou reformage à la vapeur consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H2, CO, CO2, CH4 et H2O) par réaction catalytique avec la vapeur d'eau. Cette transformation a lieu à haute température (800 à 1000°C) et à pression modérée (de l'ordre de 5 à 25bar).[14]

Elle peut être suivie par différentes opérations qui conduisent à la production d'hydrogène mais aussi à l'obtention de carburant de synthèse. La charge d'une unité de vaporeformage

peut être du gaz naturel, du méthane voire du naphta. La réaction à mettre en œuvre est la suivante:

Charges légères d'hydrocarbures + Vapeur d'eau ↔ Gaz de synthèse (I.2)

Actuellement la technique de reformage du méthane à la vapeur (RMV), connue également sous le nom Steam Methane Reforming (SMR), est la plus communément utilisée pour produire l'hydrogène en grande quantité. Elle consiste à faire régir du méthane, principal constituant du gaz naturel, avec la vapeur d'eau pour produire un gaz de synthèse (Equations I.3 et I.4). [10][12][15]

Toutefois, pour ne pas empoisonner le système catalytique le gaz naturel doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de reformage. [14][16]

Les réactions ayant lieu au cours du reformage :

$CH4 + H2O \leftrightarrow CO + 3H2$ $\Delta H°298 = 206kJ /mol$ (I.3)

$CO + H2O \leftrightarrow CO2 + H2$ $\Delta H°298 = -41kJ / mol$ (I.4)

Réaction bilan:

$CH4+ 2H2O \leftrightarrow CO2 + 4H2$ $\Delta H°298 = 165kJ/mol$ (I.5)

La réaction globale (Equation I.4) est généralement catalysée par un catalyseur à base de nickel à des températures allant de 900 à 1200K et à des pressions de 5 à 25bars. [14]

I.2.3.1.2.2 Oxydation partielle :

L'oxydation partielle peut être effectuée sur des produits plus ou moins lourds allant du gaz naturel aux résidus lourds, et même au charbon. D'un point de vue économique, le traitement des charges lourdes se justifie quand le surinvestissement consenti est compensé par un coût réduit de la matière première, le coke de pétrole par exemple. A haute température (1200 à 1500°C) et à pression élevée (20 à 90bar ou plus), en présence d'oxygène (air) en tant qu'oxydant, l'oxydation partielle des hydrocarbures conduit (Equation I.5), à l'instar du vaporeformage, à la production de gaz de synthèse. En revanche, la réaction est exothermique et se déroule (en général) sans catalyseur.

Charges d'hydrocarbures + Oxygène (Air) ↔ Gaz de synthèse (I.6)

C'est un procédé de production d'hydrogène maîtrisé. Il se présente sous deux formes, catalytique et non catalytique et la réaction est quasi complète, initiée par un préchauffage des réactifs vers 300°C et réalisée à des températures allant de 1000 à 1400°C. [20]

Le système doit opérer en défaut d'oxygène par rapport à la stœchiométrie de la réaction pour ne pas induire une combustion complète de la charge (formation de H2O et du CO2). L'oxydation partielle du gaz naturel (essentiellement du méthane) est actuellement une technique maîtrisée pour la production d'hydrogène. [21]

La réaction ainsi mise en jeu est donnée par l'équation (I.7) [22]

$CH4 + \alpha (O2 + 3,77N2) \leftrightarrow$ Gaz de synthèse (I.7)

I.2.3.1.2.3 Reformage autotherme :

Le reformage autothermique (ATR) est un procédé de production de gaz de synthèse à partir de l'oxydation partielle d'une charge d'hydrocarbures avec de l'oxygène et de la vapeur sur un lit de reformage catalytique. L'oxydation partielle étant exothermique, il y a dégagement de chaleur qui est utilisée ensuite par le vaporeformage, réaction endothermique.

Charges d'hydrocarbures + Oxygène (Air) + Vapeur d'eau ↔ Gaz de synthèse (I.8)

Dans le cas de reformage autotherme du méthane, la réaction globale mise en jeu est donnée par l'équation (I.9). [22][23].

$CH4 + \alpha (O2 + 3,77\ N2) + \beta\ H2O \leftrightarrow$ Gaz de synthèse (I.9)

Les conditions de travail varient entre 800 et 1000 °C pour la température et 20 à 60 bars pour la pression [24, 30]. De manière pratique, tous les réactifs (dont le méthane) sont mélangés et préchauffés à la température de réaction choisie, avant d'être portés vers le réacteur.

I.2.3.1.2.4 Gazéification du charbon :

Le terme de gazéification couvre la conversion de toute matière carbonée en un produit gazeux ayant un pouvoir calorifique utilisable (essentiellement CO, H_2, CH_4). [2]

La gazéification du charbon comprend une étape initiale de pyrolyse suivie d'une oxydation partielle produisant un gaz de synthèse (ou « syngas ») comprenant principalement du CO et de l'hydrogène en teneurs variables. L'oxydant peut être l'oxygène, l'air ou la vapeur d'eau. Cette technologie a connu un fort développement au cours des années 1945-1955, avant

l'utilisation du gaz naturel, puis les développements ont fluctue en fonction des prix et des disponibilités du pétrole et du gaz.

La gazéification du charbon permet de fournir une grande variété de produits: électricité, produits chimiques, substituant au gaz naturel (SNG), carburants pour le transport, et présente un intérêt non négligeable dans le contexte économique actuel. La production électrique est devenue un marché porteur pour la gazéification qui est perçue comme un moyen d'augmenter l'acceptabilité environnementale du charbon. L'idée d'utiliser le gaz de synthèse dans les turbines n'est pas nouvelle. Des 1950, les problèmes techniques tels que l'augmentation de la température dans les turbines ont été étudies; des prototypes ont été construits aux USA et en Europe, et depuis une dizaine d'années des unités commerciales sont en fonctionnement.

Un intérêt majeur pour l'IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) est apparu en 2003 et s'est concrétisé par le rachat aux USA de la technologie Texaco par GE Energy et en Europe celui de Future Energy par Siemens. La production d'intermédiaires chimiques de base CTC (Coal to Chemicals) est également une voie en plein essor (methanol, dimethylether DME, ammoniac, olefines). Les développements se font aux USA et principalement en Chine. La gazéification de charbon comme substitut au gaz naturel reste limitée (Unité de Dakota - Beula), mais de nombreux projets sont a l'étude vue l'augmentation du prix du gaz naturel. Enfin la liquéfaction indirecte du charbon CTL (Coal To Liquids) pour la production de carburants synthétiques, via la gazéification du charbon puis la synthèse Fischer Tropsch, présente un regain d'intérêt au-delà de l'Afrique du Sud, en Chine mais aussi aux Etats-Unis, même si le bilan économique (et environnemental) de cette filière est nettement moins favorable que celui du GTL (Gas to Liquid). [31]

La production d'hydrogène par gazéification du bois ou le charbon de bois (à base des corps élémentaires essentiels : carbone, hydrogène, oxygène et azote), consiste à récupérer l'élément hydrogène tout en transformant le carbone en CO2 qui représente exactement le CO2 stocké par la biomasse lors de sa croissance. La récupération de l'hydrogène s'obtient à partir de transformations thermochimiques de la biomasse. Ces transformations peuvent se dérouler en une seule étape ou en deux étapes successives indépendantes. [32]

J Son principe repose sur le mélange du charbon avec de l'eau et de l'air à 1000°C et sous haute pression, ce qui permet d'obtenir un gaz contenant en majorité du CO et de l'hydrogène.

I.2.3.1.3 Conversion du monoxyde de carbone en hydrogène :

La réaction de conversion du gaz à l'eau connue sous le nom (Water Gas Shift Reaction):

$CO + H2O \leftrightarrow CO2 + H2$ $\Delta H°298 = -41kJ/mol$ (I.10)

C'est une réaction très développée, ces dernières années, pour la production d'hydrogène pur.

[33]

A vrai dire, cette réaction offre la possibilité de réduire davantage la concentration de CO présent dans le gaz de synthèse (gaz de reformage du méthane) au bénéfice d'une maximisation de la production d'hydrogène pur via la réaction de conversion de CO.

La production d'hydrogène est une transformation exothermique favorisée à basse température (généralement inférieure à 250°C) et en présence d'un excès de vapeur d'eau. Mais, à de tels niveaux thermiques, et surtout aux faibles rapports H_2/CO, les réactions secondaires d'obtention de méthane et de carbone se développent également de façon notable.

Il convient alors d'employer des catalyseurs à la fois actifs et sélectifs afin de limiter leurs effets. En pratique la conversion du monoxyde de carbone se fait en deux étapes avec refroidissement intermédiaire et éventuellement injection d'une nouvelle quantité d'eau à l'entrée du second étage :

- Une première réaction, haute température, évite la production de coke. La réaction de formation du coke est la formation du carbone à partir du monoxyde de carbone connu sous le nom équilibre de Boudouard (équation I.11).

$2CO \leftrightarrow CO_2 + C$ (graphite) $\Delta H°298 = -172,3$ kJ /mol (I.11)

Cette réaction est favorisée par une baisse de température et une augmentation de pression.

- Une deuxième réaction, à bas niveau thermique, permet de pousser la transformation du CO et de réduire sa teneur dans le gaz produit à 0,05-0,1% volume.

La conversion à haute température fait appel à des catalyseurs dont la composition typique du catalyseur a été rapporté comme 74,2% de Fe_2O_3, 10,0% de Cr_2O_3, MgO 0,2% (pourcentage restant attribué aux composants volatils). Le chrome sert à stabiliser l'oxyde de fer. Le fonctionnement des catalyseurs se produit dans la plage de température de 310 ^{o}C à 450 ^{o}C.[34]

Les augmentations de température le long de la longueur du réacteur en raison de l'exothermique nature de la réaction. En tant que telle, la température d'entrée est maintenue à 350 $^{\circ}$ C pour empêcher la température de sortie de dépasser 550 ^{o} C. réacteurs industriels fonctionnent à une gamme de la pression atmosphérique à 82,7 atm.

La conversion basse température : dans ce cas, la composition typique d'un catalyseur a été rapportée comme 32-33% CuO, 34-53% ZnO, 15-33% d'Al_2O_3. L'espèce catalytique active est CuO. La fonction de ZnO est de fournir un support structurel ainsi que de prévenir l'empoisonnement par le soufre du cuivre. Al_2O_3 empêche la dispersion et le retrait pastille. [35] le réacteur de conversion fonctionne à une gamme de température de 200-240 ° C. La limite supérieure de température est due à la sensibilité de cuivre. Ces températures plus basses réduisent également l'apparition de réactions secondaires. Les métaux nobles tels que le platine, supportés sur l'oxyde de cérium, ont également été utilisés.

I.2.4. La production de l'hydrogène par procédés biologique

[ ] Sabah Menia and al. « La production de l'hydrogène par procédés biologique », Oil and Gas science and technology, Revue IFP énergies nouvelles 74, 34 -2019

Les procédés biologiques pour la production d'hydrogène peuvent fonctionner dans des conditions opératoires moins énergivores et plus respectueuses de l'environnement par rapport aux méthodes chimiques conventionnelles. Cette approche est non seulement écologique, mais ouvre aussi de nouvelles voies pour l'exploitation de ressources énergétiques renouvelables illimitées. En outre, ils peuvent également utiliser différents déchets, ce qui facilite le recyclage des déchets. La production d'hydrogène biologique utilisant la biomasse riche en hydrates de carbone comme ressource renouvelable est l'une des différentes méthodes dans lesquelles les processus peuvent se produire via un processus anaérobie et un processus de photosynthèse. Dans cet article, les différents procédés biologiques de production de l'hydrogène sont décrits et comparé.

I.2.5. Production d'hydrogène alimenté par un générateur photovoltaïque :

L'effet magnéto-calorique (MCE) consiste à liquéfier l'hydrogène pour optimiser son stockage, l'hydrogène produit aujourd'hui grâce à l'énergie solaire qui devient une source

importante de production d'électricité. Cependant, le principal problème de la bonne exploitation reste la manière dont il est stocké; l'une des meilleures méthodes de stockage est le système d'hydrogène liquéfié. Le système de génération d'hydrogène se compose simplement d'un module PV connecté à une cellule à hydrogène par un convertisseur CC, ce qui signifie que la meilleure optimisation du système à hydrogène est l'optimisation du système photovoltaïque (PV).

Une dizaine d'études ont été menées sur l'utilisation du stockage dans les énergies renouvelables. Où Khalid et al. [42] a suggéré un système d'énergie renouvelable pour une maison utilisant l'hydrogène comme support de stockage. Kalinci et coll. [43] ont étudié un système énergétique autonome pour une île de Turquie utilisant l'hydrogène comme option de stockage. ezmalinovic et coll. [44] ont discuté du rôle des piles à combustible PEM dans les systèmes PV pour les stations de base éloignées. Ils ont examiné divers scénarios tels que PV / batterie, PV / batterie / diesel, générateur et PV / batterie / pile à combustible PEM [45].

La technologie des cellules d'électrolyse fournit une solution durable pour le stockage d'énergie renouvelable et la production d'hydrogène. Parmi tous les types de systèmes de cellules électrolyseurs, le PEMFC fournit une solution prometteuse pour la production d'hydrogène et d'oxygène et reçoit de plus en plus d'attention en raison de leur efficacité / densité énergétique plus élevée, de leur charge / décharge plus rapide et de leur conception plus compacte [46].

L'énergie solaire est la conversion de la lumière du soleil en électricité, soit directement en utilisant le photovoltaïque (PV), soit indirectement en utilisant l'énergie solaire concentrée. Les systèmes d'énergie solaire concentrés utilisent des lentilles ou des miroirs et des systèmes de suivi pour concentrer une grande zone de lumière du soleil en un petit faisceau. Les cellules photovoltaïques convertissent la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque [47].

Les systèmes solaires photovoltaïques existent dans de nombreuses configurations différentes en ce qui concerne leur relation avec les systèmes onduleurs, les réseaux externes, les piles à combustible, les banques de batteries ou d'autres charges électriques [48].

Indépendamment de la destination finale de l'énergie solaire, cependant, le problème central abordé par MPPT est que l'efficacité du transfert d'énergie de la cellule solaire dépend à la fois de la quantité de lumière solaire tombant sur les panneaux solaires et des caractéristiques électriques de la charge.

À mesure que la quantité de lumière solaire varie, la caractéristique de charge qui donne l'efficacité de transfert de puissance la plus élevée change de sorte que l'efficacité du système soit optimisée lorsque la caractéristique de charge change pour maintenir le transfert de puissance au plus haut rendement. Cette caractéristique de charge est appelée le point de puissance maximale et MPPT est le processus qui consiste à trouver ce point et à y conserver la caractéristique de charge. Les circuits électriques peuvent être conçus pour présenter des charges arbitraires aux cellules photovoltaïques, puis convertir la tension, le courant ou la fréquence en fonction d'autres appareils ou systèmes, et MPPT résout le problème du choix de la meilleure charge à présenter aux cellules afin d'obtenir la puissance la plus utilisable.

Cet article propose la méthode pour suivre le point de puissance maximale (MPP) pour un module PV en utilisant Perturb & Observe (P&O) basé sur un réseau de neurones artificiels (ANN) à une technique d'algorithme d'optimisation à une irradiation et une température variables. Il existe dans la littérature de nombreuses définitions des réseaux de neurones artificiels, quelles que soient les définitions mathématiques, les réseaux de neurones artificiels sont inspirés des réseaux biologiques. Les réseaux de neurones artificiels peuvent être la topologie modifiée de leur propre apprentissage, qui est définie comme la modification des poids synaptiques pour capturer des informations [49].

Le système d'énergie photovoltaïque (PV) basé sur un convertisseur DC-DC est appliqué dans diverses applications pratiques. Il existe plusieurs types différents de convertisseurs DC-DC, de topologies Buck, Boost, Buck-Boost et Cuk, ont été développés et rapportés dans la littérature pour répondre à une variété de demandes spécifiques aux applications. L'un des avantages de ces convertisseurs est leur efficacité énergétique élevée. Les convertisseurs dc-dc d'ordre supérieur, tels que le convertisseur Cuk, ont un avantage significatif par rapport aux autres topologies inverseuses car ils permettent une ondulation basse tension à la fois sur les côtés d'entrée et de sortie du convertisseur [50]. Le concept consiste, en effet, à produire de l'hydrogène à partir de l'effet photovoltaïque, qui sera ensuite liquéfié par effet magnéto-calorique in situ, en se concentrant sur la gestion et la réalisation de dispositifs magnétocaloriques efficaces et embarqués pour des applications basse température et spatiales.

Description du système PV

Des milliers de systèmes PV sont utilisés aujourd'hui pour une variété d'applications, la figure 1 montre le système PV étudié qui comprend le générateur PV, des convertisseurs avec

différents algorithmes MPPT, qu'il sera remplacé plus tard par des algorithmes P&O basés sur ANN.

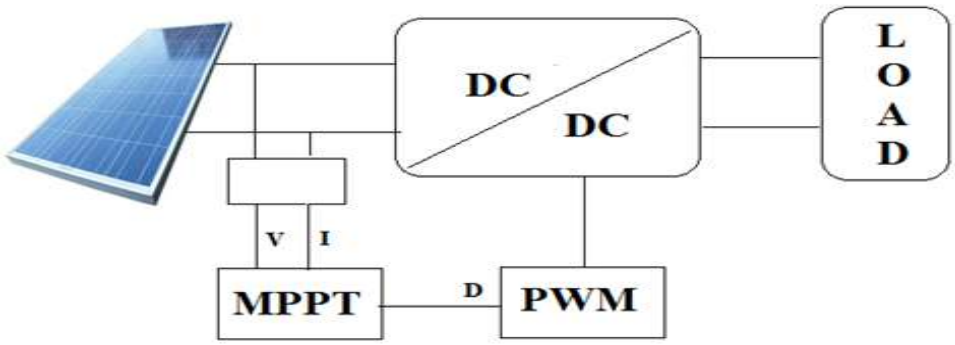


Figure. I.3. Système photovoltaïque.

Modèles photovoltaïques analytiques

Une cellule photovoltaïque idéale consiste en une seule diode connectée en parallèle avec une source de courant généré par la lumière, Iph (figure 2a), où son courant de sortie I peut être écrit [10].

$$I = I_{Ph} - I_S \left[e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right] \qquad (I.12)$$

Où:

Is: saturation cellulaire du courant d'obscurité.

Vt: tension thermique Vt = kTc / q.

k: constante de Boltzmann, = 1,38 • 10-23 J / K.

Tc: température de fonctionnement de la cellule.

q: charge électronique (1,6 • 10-19C).

n: facteur d'idéalité égal à 1,1.

Modèles photovoltaïques non idéaux

Il existe deux types de premier modèle non idéal avec une résistance en série (modèle Rs) est illustré sur la figure 2b et est annoté par l'équation (I.13) du courant de sortie.

$$I = I_{Ph} - I_S \left[e^{\frac{V+IR_S}{nV_t}} - 1 \right] \qquad (I.13)$$

Néanmoins, ce modèle ne représente pas adéquatement le comportement de la cellule, pour cela il existe un autre modèle où les séries Rs, et les résistances parallèles Rsh, sont introduites [51]. La résistance en série est très faible. Il a montré à la figure. 2c et son équation comme :

$$I = I_{Ph} - I_S\left[e^{\frac{V+IR_S}{nV_t}} - 1\right] - \left[\frac{V+IR_s}{R_{sh}}\right] \qquad ($$

Figure. I.4: Circuits model for PV cell

Conception du convertisseur DC-DC

Le convertisseur Cuk contient des inductances en série avec les ports d'entrée et de sortie du convertisseur. Le réseau de commutation connecte en alternance un condensateur aux inductances d'entrée et de sortie. Il peut être modélisé par les équations relatives à la tension / au courant d'entrée et de sortie comme suit [52]:

$$V_{out} = \left[\frac{-DV_{in}}{1-D}\right] \qquad (I.15)$$

$$I_{out} = \left[\frac{(1-D)I_{in}}{D}\right] \qquad (I.16)$$

Avec le convertisseur Cuk, nous pouvons fonctionner avec des dimensions plus petites ou plus grandes que la tension d'entrée. Cependant, il existe un inconvénient en ce qui concerne l'inversion du signe de la tension de sortie vers celui de la tension d'entrée.

Le convertisseur d'inductance primaire asymétrique (SEPIC) peut également augmenter ou diminuer l'amplitude de la tension. Cependant, il n'inverse pas la polarité. Le taux de conversion est:

$$M(D) = \frac{D}{1-D} \qquad (I.17)$$

Méthodes MPPT

Deux des méthodes les plus utilisées pour le suivi du point de puissance maximale sont étudiées ici. Les méthodes sont [53]:

Méthode Perturb & Observe.

Méthode de conductance incrémentale.

Les organigrammes des deux méthodes sont présentés ci-dessous dans les figures I.5 et I. 6.

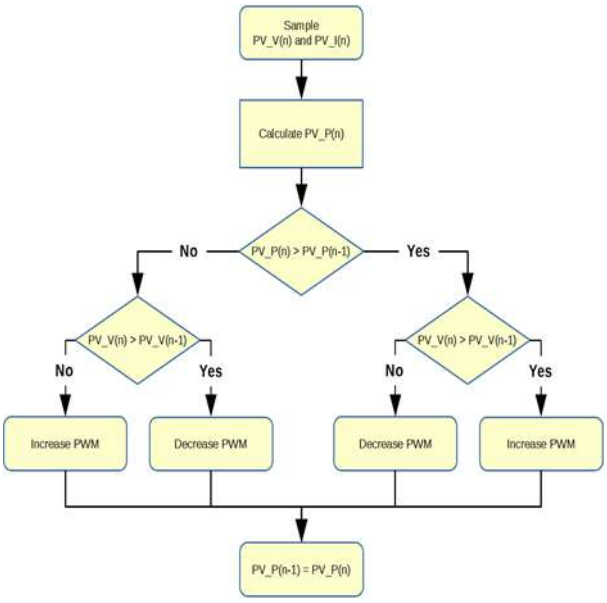


Figure. I.5 : Méthode Perturb & Observe

Le fonctionnement de cet algorithme est le suivant :

Tout d'abord, la tension V (n) et le courant I (n) sont mesurés pour calculer la puissance P (n). Cette valeur P (n) est comparée à la valeur de la puissance obtenue lors de la dernière mesure P (n-1). A l'aide de cet algorithme, la tension de fonctionnement V (n) est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP est atteint, V (n) oscille autour du point de fonctionnement idéal (Vmp).

Mais cela provoque des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation DD. Si la largeur de pas est grande, l'algorithme P&O répondra rapidement aux changements soudains et rapides des conditions de fonctionnement, mais causera des pertes dans des conditions à changement lent et dans des états stables. Si la largeur de la marche est très petite, les pertes dans des états stables ou des conditions à changement lent seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de température ou d'intensité de l'ensoleillement.

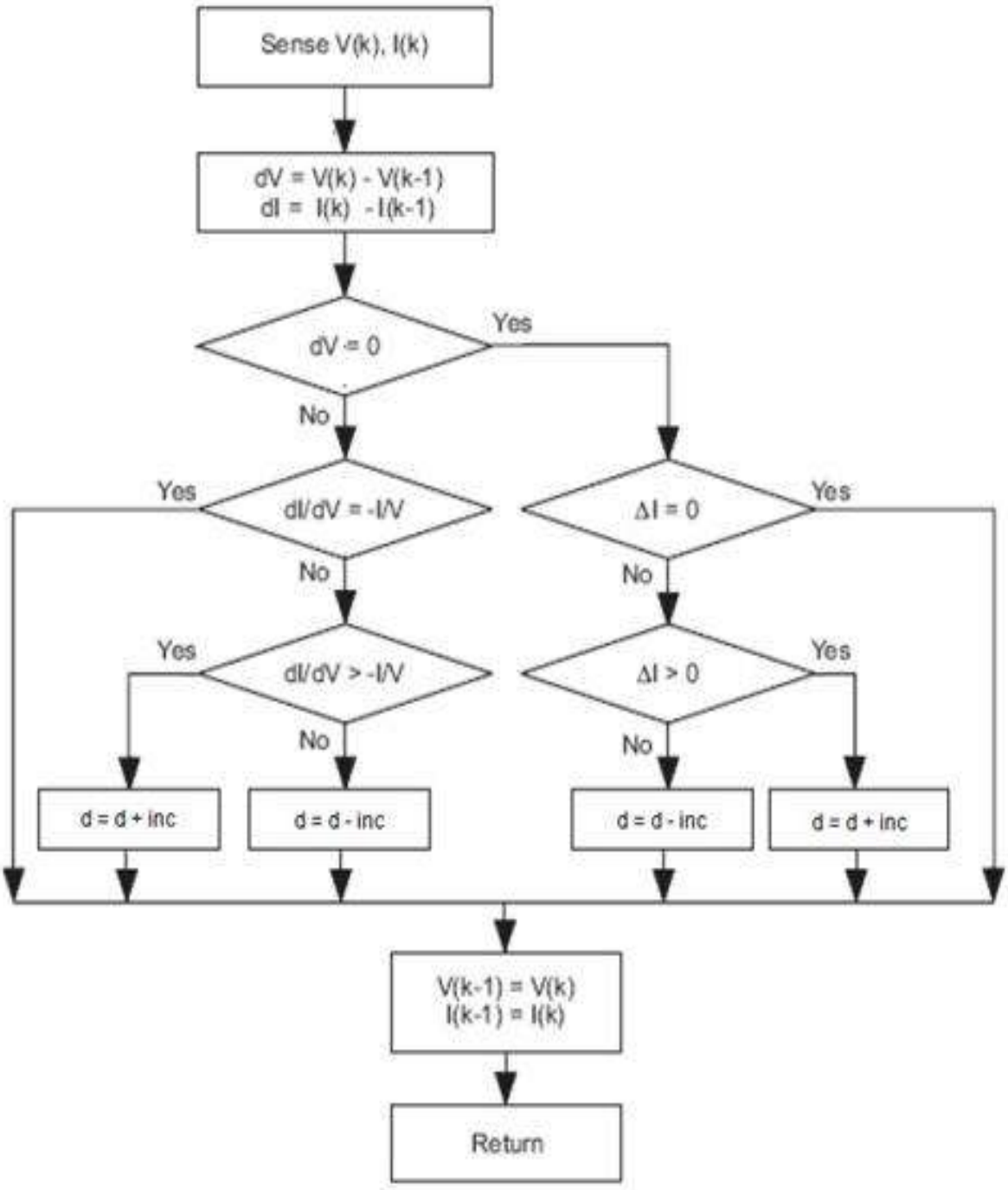


Figure. I.6 : Méthode Incrémentale Conductance.

Cette méthode exploite l'hypothèse selon laquelle le rapport de variation de la conductance de sortie est égal à la conductance de sortie négative Conductance instantanée. Le MPPT régule le signal de commande PWM du convertisseur élévateur CC à CC jusqu'à ce que la condition: (dI / dV) + (I / V) = 0 soit satisfaite.

Dans cette méthode, la puissance de crête du module est supérieure à 98% de sa conductance incrémentale.

Système d'électrolyseur

Un électrolyseur est un appareil électrochimique qui décompose l'eau en hydrogène et oxygène. Le taux de production de H2 dans une cellule d'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons aux électrodes, qui à son tour équivalent au courant électrique dans le circuit, tel qu'exprimé dans l'équation (I.18), et au rapport entre le réel et le La quantité maximale théorique de H2 produite dans l'électrolyseur est connue sous le nom d'efficacité de Faraday, qui est également exprimée en Eq. (I.18) comme, [54].

$$m_{H_2} = \frac{n_F N_{i_e}}{2F} \qquad n_F = 96.5\left(e^{\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2}}\right) \quad \text{(I.18)}$$

Réservoir de stockage d'hydrogène

La dynamique du système de stockage de H2 peut être exprimée dans l'équation (I.19).

$$P_b - P_{bi} = \frac{ZN_{H_2}RT_b}{m_{H_2}V_b} \qquad (I.19)$$

Réseau neuronal artificiel

Un réseau neuronal artificiel (ANN) est un modèle mathématique qui tente de simuler la structure et les fonctionnalités des réseaux neuronaux biologiques. Le bloc de construction de base de chaque réseau de neurones artificiels est un neurone artificiel, c'est-à-dire un modèle mathématique simple (fonction).

Un tel modèle comporte trois ensembles de règles simples : la multiplication, la sommation et l'activation. A l'entrée du neurone artificiel, les entrées sont pondérées, ce qui signifie que chaque valeur d'entrée est multipliée par le poids individuel.

Dans la section centrale du neurone artificiel se trouve une fonction de somme qui additionne toutes les entrées pondérées et les biais. A la sortie du neurone artificiel, la somme des entrées et biais précédemment pondérés passe par la fonction d'activation également appelée fonction de transfert (figure I.7).

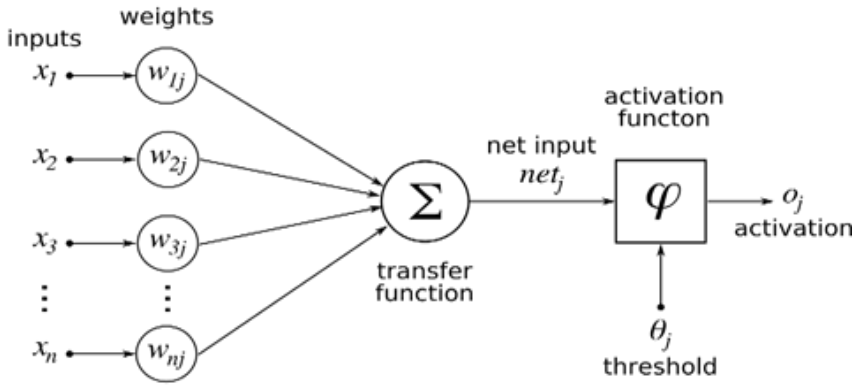


Figure. I. 7 : L'architecture du neurone formel.

Apprentissage des réseaux de neurones

Le réseau neuronal est sélectionné avec trois couches dont une est cachée. La fonction de transfert est utilisée pour les couches cachées et en utilisant la méthode de propagation arrière, le réseau est formé en utilisant les données obtenues, dont la tension de mesure et le courant du panneau PV sont utilisés comme entrée de ANN, la sortie est le cycle de service de l'impulsion modulation de largeur (PWM), et sa modification pour correspondre au point de puissance maximum. Les réseaux de neurones sont également souvent utilisés pour la prévision de séries chronologiques [55].

La topologie de NN se compose de couches avec des neurones. Un exemple d'ANN est présenté à la figure I.7. Le réseau a au moins 3 couches : la couche d'entrée, une couche cachée et la couche de sortie. Un certain nombre de couches cachées varie et dépend de la conception influencée par la résolution du problème. Les neurones entre les couches sont entièrement connectés par des connexions pondérées.

Cela signifie que chaque neurone de la couche inférieure a la connexion avec chaque neurone de la couche supérieure. Le processus de propagation directe du signal à travers NN commence par l'excitation des neurones dans la couche d'entrée. Ensuite, ces excitations sont amenées à la couche suivante. Chaque neurone de la couche suivante procède à la sommation des signaux xi modifiés par le poids de connexion wi pour chaque neurone i de n neurones de la couche précédente montré dans l'équation (I.20) [56].

$$z = \sum_i^n w_i x_i \qquad (\text{I. } 20)$$

La sortie de ce neurone est calculée par sa fonction d'activation sigmoïde présentée dans l'équation (I.21):

$$y = \frac{1}{1+e^{-\lambda z}} \qquad (\text{I. } 21)$$

Où λ est la pente de la fonction sigmoïde. Ces signaux sont propagés à la couche de sortie à travers toutes les couches cachées de la manière présentée et les sorties de NN sont des excitations de neurones de sortie. L'apprentissage du réseau de neurones Feed Forward est traité en mettant à jour les poids de connexion entre les neurones. Il est nécessaire d'apprendre NN en utilisant un ensemble de connaissances de formation.

La mise à jour des poids en fonction de l'ensemble de formation est appelée apprentissage supervisé. L'une des méthodes qui permettent l'adaptation NN sur un ensemble d'apprentissage donné est appelée rétropropagation.

L'algorithme de rétropropagation (BP) est basé sur la méthode de descente de gradient. L'adaptation des poids est traitée par propagation de l'erreur de sortie à travers le réseau des couches supérieures aux couches inférieures. Le but est de minimiser la fonction d'erreur, voir l'équation suivante (I.22):

$$E = \frac{1}{2}\sum_{p=1}^{p}\sum_{j=1}^{M}\left(y_i - d_j\right)_p^2 \qquad (\mathrm{I.22})$$

Où l'erreur entre la sortie réelle du réseau yj et la sortie souhaitée dj est additionnée pour P motifs de l'ensemble d'apprentissage et pour tous les m neurones de sortie dans la couche de sortie. La minimisation des erreurs se fait en adaptant les poids entre les neurones. Le changement de poids se fait par l'équation (I.23):

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \qquad (\mathrm{I.23})$$

Où η est le coefficient d'apprentissage. Ensuite, la dérivation partielle de l'erreur E basée sur le poids de connexion wij est obtenue par l'équation (I.24):

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial w_{ij}} \qquad (I.24)$$

Sur la base des équations (I.20) et (I.21), l'équation précédente est simplifiée par l'équation (I.25) comme suit :

$$\frac{\partial z}{\partial w_{ij}} = \frac{x_i \wedge \partial y}{\partial z} = y(1-y)\lambda \qquad (\mathrm{I.25})$$

Ensuite, le gradient de neurone de l'équation (I.24) est transformé en équation (I.26):

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \delta_j y_j\left(1 - y_j\right)\lambda x_i \qquad (\mathrm{I.26})$$

Où δ j est obtenu à partir de l'équation (I.27) pour la couche de sortie:

$$\delta_j = y_j - d_j \qquad (I.27)$$

Et de l'équation (I.28) pour les résultats de couches cachées

$$\delta_j = \sum_{i=0}^{m} \delta_j y_j (1 - y_j) \lambda w_{ij} \qquad (I.28)$$

Simulation du système PV

Le système PV présenté sur les figures I.5, I.6 et I.7 est évalué par une simulation numérique à l'aide de l'outil MATLAB / Simulink, dans lequel les systèmes PV injectent une charge d'énergie active par deux convertisseurs Cuk et SEPIC avec l'algorithme p de MPPT.

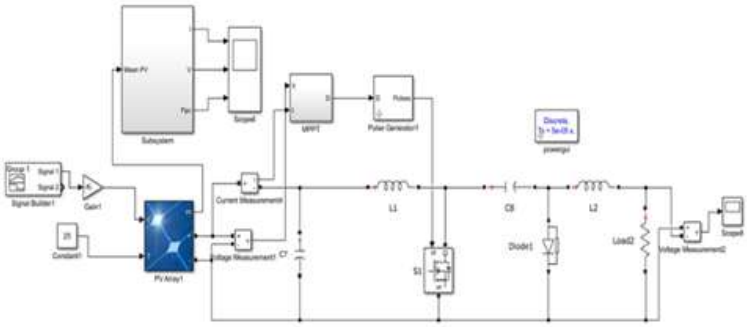


Figure. I.8 : Convertisseur Cuk avec MPPT.

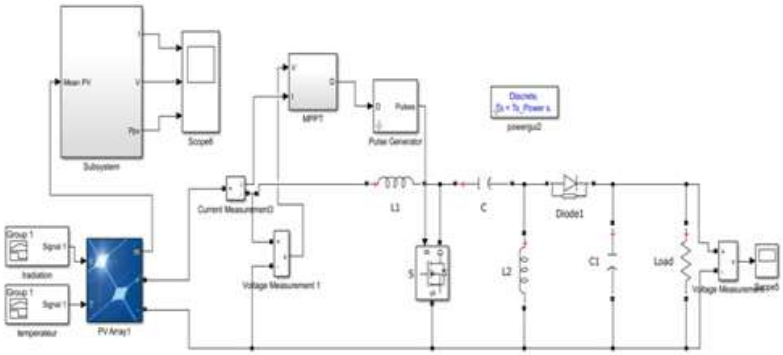


Figure. I.9 : Convertisseur SEPIC avec MPPT.

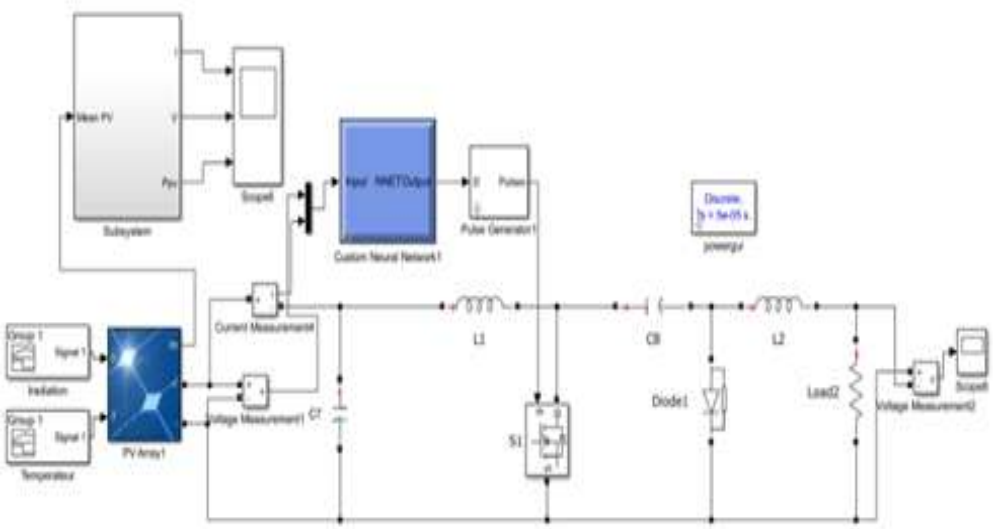


Figure. I.10 : Cuk converter avec ANN

Discussion et commentaires

Dans cette étude, il existe deux types de convertisseurs analysés, développés et simulés à l'aide du MATLAB / Simulink, et ils sont connectés au panneau solaire par le MPPT avec l'algorithme P&O, et ce afin d'identifier le meilleur d'entre eux dans les différents niveaux de irradiation.

Après cela, nous comparerons l'algorithme classique avec le réseau artificiel, qui est l'une des techniques intelligentes. En dernier ressort, nous atteindrons le meilleur système solaire pour une meilleure production d'hydrogène, ce qui nous permet de stocker cette exploitation améliorée de l'énergie solaire.

Comparaison entre le convertisseur Cuk et SEPIC

La figure I.11 montre le résultat d'un modèle de simulation du système PV utilisé dans cette étude, deux types de convertisseur. Là où on note le convertisseur Cuk, il présente des caractéristiques supérieures respectant les performances du champ PV est MPPT.

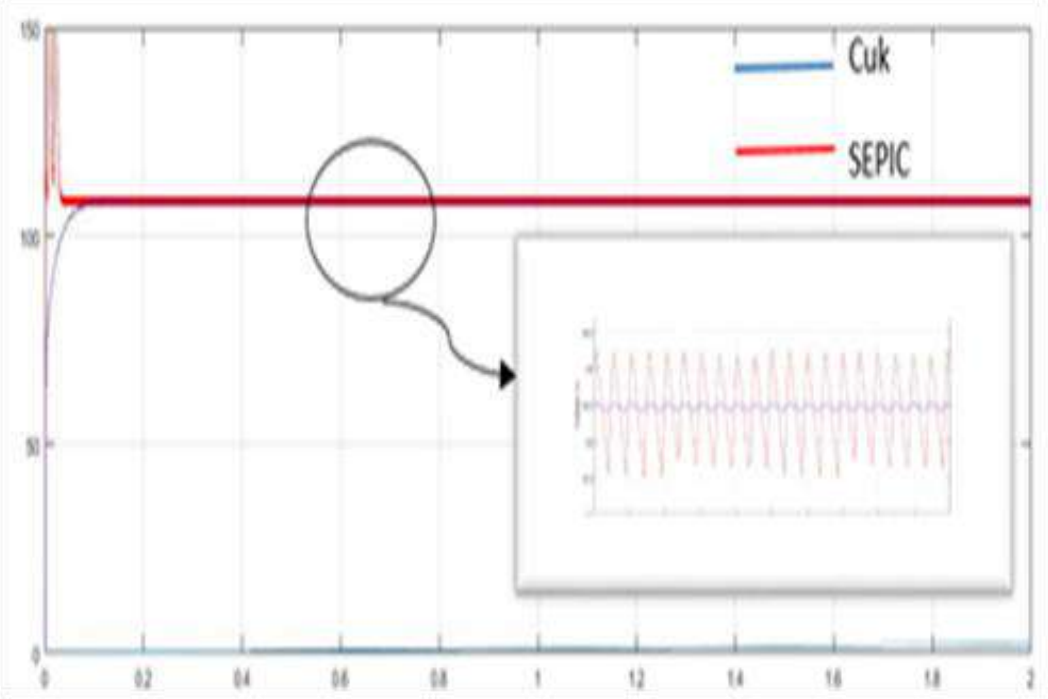


Figure.I.11: Comparison of the Cuk converter and the SEPICE for output voltage

Comparaison entre le contrôle ANN et l'algorithme P&O :

Les figures I.12 à I.14 montrent les résultats de la comparaison entre ANN et P&O. À partir de ces chiffres, nous concluons que la technologie de réseau de neurones artificiels est plus efficace qu'un algorithme P&O, et a une grande vitesse de réponse quels que soient le niveau solaire, la température du panneau et la charge connectée.

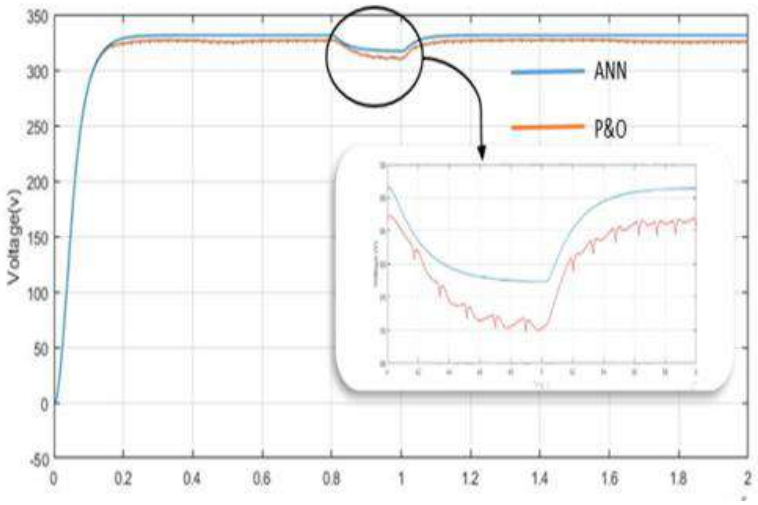


Figure. I.12 : Comparaison entre le réseau neuronal artificiel et le P&O pour la tension. de sortie

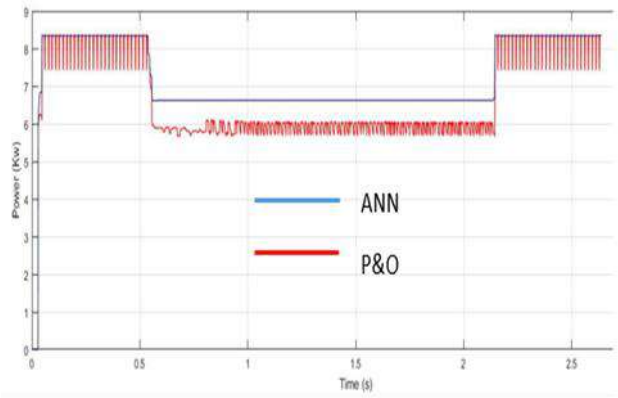


Figure. I.13 : Power PV pour deux méthodes Réseau neuronal artificiel et P&O

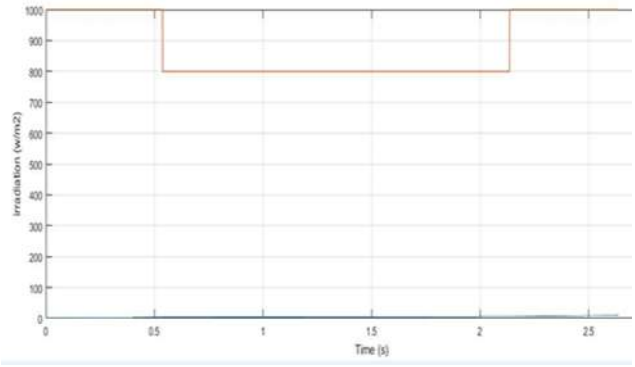


Figure. I.14 : Entrée d'irradiations

Conclusions

Ce chapitre présentait une étude comparative entre deux types de composants du système solaire pour produire de l'hydrogène, pour augmenter l'efficacité du système. Cependant, changé certaines parties du système, pas assez pour améliorer le système. Par conséquent, il a évalué diverses techniques de contrôle connues dans la littérature pour profiter au maximum de l'énergie disponible par un panneau solaire. En outre, pour éviter les inconvénients des méthodes classiques, a été remplacé par la technologie d'intelligence artificielle, qui a donné un excellent résultat en termes de réponse en vitesse et de quantité d'énergie produite, ce qui conduit à augmenter les performances de la production d'hydrogène.

I.3. Les différentes formes de stockage de l'hydrogène :

Pour une autonomie de 400 km, une voiture équipée d'un moteur à combustion interne a besoin de 24 kg d'essence. Avec une pile à combustible, il ne faudrait plus que 4 kg de dihydrogène.

L'hydrogène possède une masse volumique très faible (0.09 kg/m3) à la condition ambiante ce qui implique des volumes de réservoir démesurés. En effet, pour ces 4 kg d'hydrogène, il faudrait un réservoir d'environ 45 m3 dans les conditions normales de température et de pression.[36]. Il est alors intéressant de chercher à augmenter la densité de l'hydrogène afin de le stocker dans des volumes de réservoirs convenables.

Le diagramme de phases de l'hydrogène présenté en Figure I.15 permet de se rendre compte des problèmes liés au stockage de ce dernier.

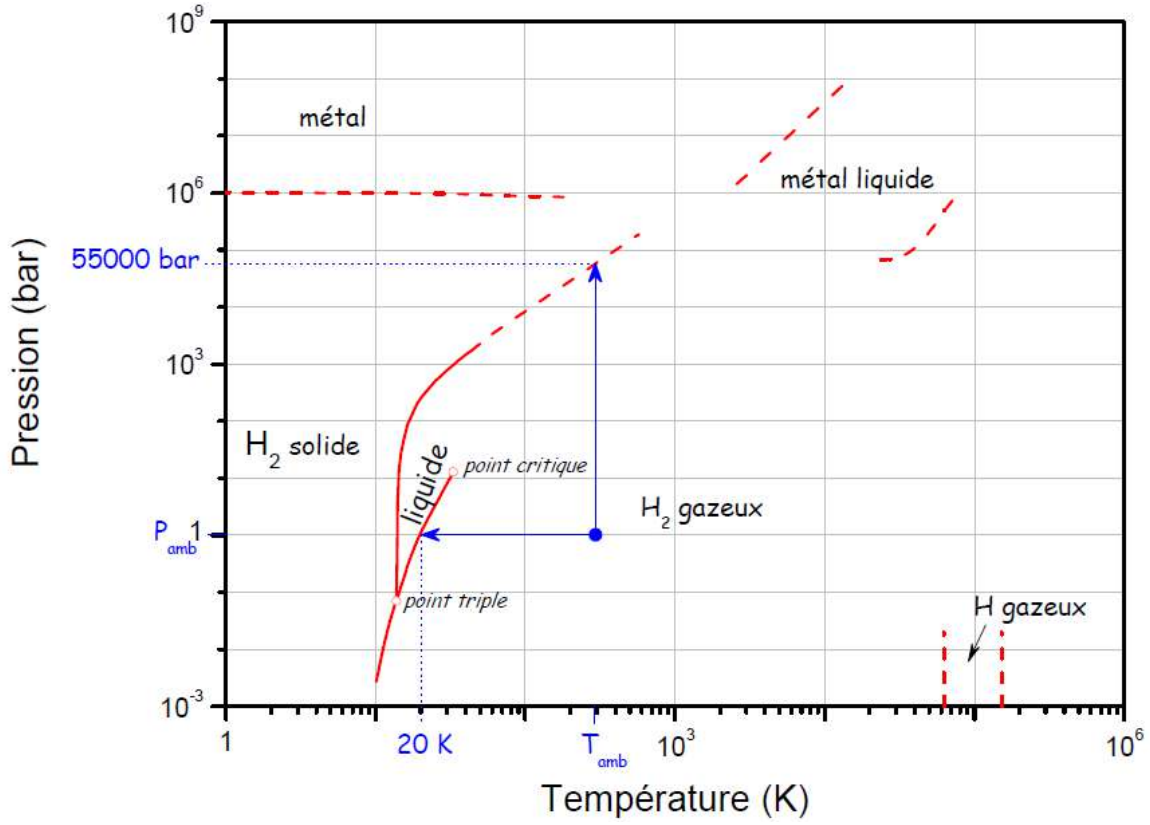


Figure I.15 : Diagramme de phase de l'hydrogène [37]

L'hydrogène peut être stocké sous ces trois formes gaz, liquide et solide et ce en fonction de l'application considérée.

I.3.1. Le stockage gazeux sous pression :

La technique de stockage la plus développée à ce jour est la compression de l'hydrogène à haute pression (allant jusqu'à 700 bars). Les bonbonnes utilisées comme réservoirs sont principalement composées de matériaux composites à base de fibre de carbone

Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de 42 kg/m^3 contre 0.090 kg/m^3 à pression et température normales. À cette pression, on peut stocker 5 kg d'hydrogène dans un réservoir de 125 litres.

L'inconvénient du stockage de l'hydrogène gazeux réside dans sa faible densité volumique énergétique. Ce désavantage vient contre balancer la forte densité massique énergétique que présente l'hydrogène.

Le **Tableau I.3** regroupe les valeurs de densité énergétique de différents combustibles. Les dépenses énergétiques nécessaires pour la compression sont également très importantes, utilisant de 10 à 25 % du contenu énergétique du gaz [38,39].

Combustible	Densité volumique énergétique (kWh/L)	Densité massique énergétique (kWh/kg)
Hydrogène	2 (à 700 bar)	33
Gaz naturel	3 (à 200 bar)	14
Gazole	8	12

Tableau I.3 : Densités énergétiques pour différents combustibles [39].

I.3.2. Le stockage sous forme liquide :

La liquéfaction de l'hydrogène est une autre solution pour le stockage de l'hydrogène,

Comme le montre le diagramme de phases de l'hydrogène de la **Figure 1.15**, le passage de l'état gazeux à l'état liquide nécessite des conditions extrêmes de température (-253°C sous 1 bar de pression). L'avantage de l'hydrogène sous forme liquide est qu'il présente une plus grande capacité volumique. En comparaison avec l'hydrogène comprimé à 700 bars qui présente une capacité volumique de 42 kg/m^3, l'hydrogène liquide possède une capacité massique de 70 kg / m^3 [40] [41].

Le stockage sous forme liquide de l'hydrogène nécessite un réservoir ayant une parfaite étanchéité et isolation thermique et ce qui est très difficile et coûteux à mettre en œuvre.

Ainsi, une faible quantité d'hydrogène s'évapore constamment augmentant la pression au sein du réservoir. Pour éviter tout risque d'explosion, l'hydrogène doit alors être ventilé par une soupape, induisant une perte non négligeable au cours du temps.

Enfin, l'énergie requise pour liquéfier l'hydrogène consomme environ 30% du contenu énergétique du gaz. Cette forme de stockage est utilisée pour des applications très particulières comme la propulsion spatiale.

I.3.3. Le stockage solide de l'hydrogène :

Contrairement à ce que son nom indique, le stockage solide de l'hydrogène ne fait pas intervenir la forme solide de ce dernier. L'hydrogène apparait comme un « invité » chez un « hôte » qui, lui, est sous forme solide.

Le stockage solide de l'hydrogène se caractérise par la séquestration du gaz au sein d'un matériau solide. Cette séquestration peut être de nature chimique ou physique selon le type de matériau.

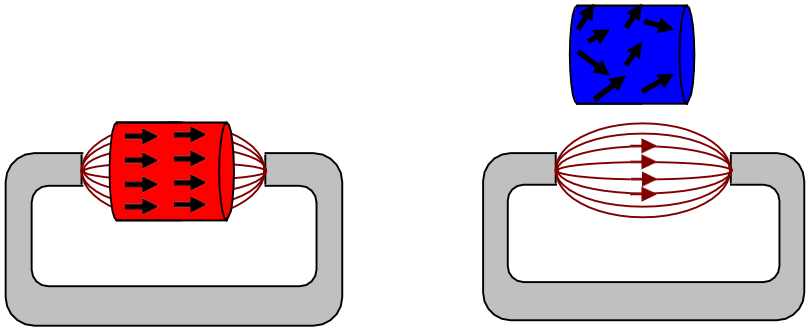
Le stockage par combinaison chimique, dit d'absorption, repose sur la formation d'un hydrure métallique qui résulte de la combinaison chimique réversible par liaisons métalliques de l'hydrogène avec les atomes d'une grande variété de métaux. A l'inverse, le stockage par combinaison physique se caractérise par une augmentation de la densité du gaz à la surface du matériau solide qui est due aux interactions moléculaires entre l'absorbat (gaz) et l'absorbant (solide).

Ce phénomène de surface, qui est totalement réversible, n'est possible qu'avec un solide à grande surface spécifique, c'est-à-dire un matériau à la fois très poreux avec de petits pores (diamètre de pore de l'ordre de nanomètre) et très divisé, sous forme de fine poudre.

Chapitre II.
La réfrigération magnétique

II.1.Principe de la réfrigération magnétique

Le principe de la réfrigération magnétique repose sur l'effet magnétocalorique (EMC). Cette propriété intrinsèque est définie comme étant le réchauffement ou le refroidissement de certains matériaux magnétiques respectivement sous l'application ou la suppression d'un champ magnétique extérieur (Fig. II.1). Cet effet est maximal autour de la température de transition (température de Curie ou température de Néel). En effet, au voisinage de cette température critique, les variations de l'aimantation sont importantes et se traduisent par de fortes évolutions de l'entropie magnétique du matériau, entraînant une modification de sa température.



Echauffement du matériau magnétique sous l'effet du champ magnétique

Refroidissement du matériau magnétique à l'absence du champ magnétique

Figure. II.1 : Principe de l'effet magnétocalorique.

L'Effet Magnétocalorique EMC est la conséquence directe du couplage magnétothermique entre les différentes contributions du matériau magnétocalorique à l'entropie totale S [9] : ces contributions sont d'ordre magnétique S_M, électronique S_E et de réseau S_R.

$$S(T,B) = S_M(T,B) + S_E(T) + S_R(T) \quad \text{(II.1)}$$

Si un matériau magnétocalorique est placé dans un champ magnétique, on assiste généralement à un processus rapide. Pratiquement, aucun échange de chaleur n'aura lieu avec l'environnement. Ainsi, pour ce procédé adiabatique, l'entropie totale *S*, qui est habituellement la somme de l'entropie magnétique, électronique et de réseau, demeure constante, mais l'aimantation augmente. Ceci signifie que l'entropie magnétique S_M, diminue. Donc, les entropies électronique et de réseau S_E et S_R, doivent augmenter.

Dans ce cas, l'effet magnétocalorique généré s'exprime par le changement de température adiabatique :

Si le champ est appliqué isothermiquement, l'EMC résultant sera donné par le changement d'entropie magnétique :

Où, *B* est le champ magnétique appliqué, *T* est la température du matériau et *M(B,T)* est la magnétisation.

II.2.Historique :

Le phénomène d'effet magnétocalorique fut mis en évidence dans le fer par Otto Warburg en 1881 [10] et c'est seulement en 1918 que Weiss et Piccard l'ont expliqué théoriquement et lui ont donné le nom d'effet magnétocalorique [2].
Edison et Tesla, respectivement en 1887 et 1890, ont présenté chacun un générateur électrique basé sur l'effet thermomagnétique utilisant des matériaux dont l'aimantation dépend fortement de la température [11].
La première démonstration expérimentale importante de la réfrigération magnétique a été réalisée par W.F. Giauque qui en 1933, a pu descendre sous la température de 1 K [11].

P. Langevin, P. Weiss et d'autres ont aussi auparavant étudié l'EMC durant leurs recherches. En 1954 Heer, Barnes et Daunt ont construit un réfrigérateur magnétique qui fonctionne en continu et qui produit 7 µW à 0.26 K [1].

En 1966 Van Geuns a proposé un cycle magnétique régénératif analogue au cycle d'Ericsson qui opère entre 4 K et 15 K, les performances théoriques de ce cycle sont de l'ordre de 60% à 70% du cycle de Carnot correspondant [11].
En 1976 Barclay et al. ont construit un réfrigérateur magnétique tournant à régénération,

celui-ci opère entre 4 K et 15 K et produit 0.9 W [11].

Dans la même année Brown fut le premier à appliquer la réfrigération magnétique autour de la température ambiante au ‘‘Lewis Research Centre de la NASA’’. En utilisant le Gadolinium (Gd) comme matériau magnétocalorique, il a atteint 47 K avec un champ magnétique de 7 T [1].

Mais ce n’est réellement qu’au cours de cette dernière décennie que l’intérêt pour lesapplications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante s’est développé. Des études théoriques et expérimentales menées principalement aux USA par Gschneidner, Zimm et Pecharsky ont démontré la validité et l’efficacité du procédé dans la fabrication du froid et, en 1996, Zimm et son groupe de recherche ont développé un réfrigérateur basé sur la réfrigération magnétique active produisant entre 500 et 600 W de puissance froide sous un champ de 5T [1].

Les articles publiés jusque là, peuvent être classifiés principalement en deux catégories. La première comprend les travaux sur la modélisation numérique des différents cycles thermodynamiques. La deuxième catégorie est consacrée au développement de matériaux magnétiques convenables pour les réfrigérateurs magnétiques en vue de substituer les matériaux purs existants par des alliages de meilleures propriétés.

Ce qui a été effectué dans le domaine de l’application de l’effet magnétocalorique pour la liquéfaction des gaz, on trouve le cas cité par [2], qui a annoncé que l’Institut de recherche sur l’hydrogène de l’Université de Québec à Trois-Rivières (Québec) a mené une étude sur un liquéfacteur à gaz basé sur l’EMC. La source du champ est un aimant supraconducteur (B = 5 T); le matériau (Gd) est déposé sur une roue entraînée par un moteur. Le processus d’aimantation et désaimantation ainsi que la circulation alternative d’un fluide caloporteur (Hélium) permet de réaliser un cycle appelé AMRL qui est similaire au cycle AMRR présenté au chapitre 3. La source chaude est à température ambiante (T_H = 300 K) et la source froide est à − 173 °C (T_C = 100 K). Le circuit du gaz à liquéfier passe par l’échangeur froid. La puissance froide est estimée à 500 W.

Dans le même cadre, une étude analytique a été menée par Utaki et al. [12]. Elle porte sur l’évaluation des performances d’un dispositif de liquéfaction d’Hydrogène. Le matériau utilisé est un matériau idéal à effet magnétocalorique constant. En effet, l’hydrogène passe d’un état gazeux (300 K) à un état liquide (22 K) à travers plusieurs étages (de 7 à 9 étages) utilisant divers fluides caloporteurs. Ce nombre d’étages a été réduit à 5 pour un cas et 3 pour un autre par un processus de pré-refroidissement de la charge d’hydrogène respectivement par le GNL jusqu’à 120 K et l’Azote liquide jusqu’à 77 K.

Smaili et al. [13] ont proposé une méthode de simulation numérique pour la prédiction des performances d'un liquéfacteur d'Hydrogène constitué par un étage travaillant entre 25°C et -25°C. Le système utilisé est un lit régénérateur à plaques et la puissance frigorifique maximale obtenue est de l'ordre de 2.5 W pour un champ magnétique de 7 T.

II.3.Caractérisation de l'Effet Magnétocalorique (EMC) :

- **Mesures directes:**

La mesure directe est la méthode la plus évidente pour déterminer l'effet magnétocalorique d'un matériau. Il s'agit de mesurer, grâce à un capteur de température en contact direct avec l'échantillon, l'échauffement de ce dernier lorsqu'on le place dans un champ magnétique [8]. Ce principe nécessite la mise au point des dispositifs plus sophistiqués pour caractériser de manière complète et précise l'EMC notamment pour des mesures à des champs relativement forts (plus de 1 T).

- **Théorie du champ moléculaire:**

Pour calculer l'effet magnétocalorique EMC à l'aide de l'Eq. (2.2), il est nécessaire de connaître la magnétisation *M(B,T)* en fonction de la température et du champ. Selon la mécanique statistique, la grandeur de la magnétisation peut s'exprimer par [14] :

$$M(B,T) = Ng\mu_B JB_J(X) \quad \text{.....(II.4)}$$

Où, $B_J(X)$ est la fonction de Brillouin, elle est donnée par l'équation (II.5).

Celle-ci peut être résolue par itération.

Ici, μ_B est le magnéton de Bohr, g est le facteur de Landé, J est le nombre quantique du moment angulaire total, k est la constante de Boltzmann, et N est le nombre de moments magnétiques par unité de masse.

La chaleur spécifique, elle-même, est exprimé en fonction de l'entropie magnétique S_M, l'entropie du réseau S_R et l'Entropie électronique S_E par :

Pour déterminer l'EMC, il est souvent commode d'évaluer, tout d'abord, chaque contribution de la substance à l'entropie totale (S_M, S_R et S_E).

Selon la théorie du magnétisme, l'entropie magnétique S_M peut s'exprimer par la relation :

où *R* est la constante universelle des gaz.
En utilisant le modèle de Debye relatif à la contribution du mode vibration, l'entropie du réseau S_R peut s'écrire comme :
où T_D est la température de Debye

D'après le modèle statistique de Fermi-Dirac [14], l'entropie électronique S_E peut être formulée par :

$$S_E(T) = \gamma T \quad \text{.....(II.10)}$$

Où γ est le coefficient de capacité calorifique électronique.

Une autre méthode alternative pour calculer le changement de température adiabatique, T_{ad} , au lieu d'utiliser l'équation.(II.2), en considérant la condition de magnétisation (ou démagnétisation) isentropique suivante :

$$S(0,T) = S(B,T + \Delta T_{ad}) \quad \text{.....(II.11)}$$

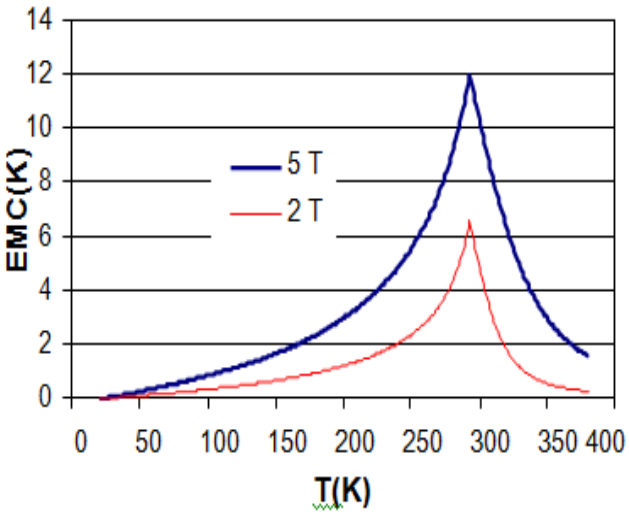
Où, $S(T,B) = S_M + S_E + S_R$ et ΔT_{ad} désigne l'EMC résultant.

II. 4. Matériaux à Effet Magnétocalorique et critères de sélection :

Pour appliquer l'effet magnétocalorique avec une efficacité élevée, des propriétés optimales sont requises pour les aimants et les matériaux magnétocaloriques. De ce fait, il faut prendre en compte diverses familles dotées d'un effet magnétocalorique convenable.

Les seuls corps purs qui possèdent un fort effet magnétocalorique au voisinage de l'ambiante (20°C) sont l'Arsenic et surtout le Gadolinium. C'est pourquoi, ce dernier est souvent utilisé dans les démonstrateurs de « frigo magnétique ». Toutefois son prix élevé et sa mauvaise résistance à la corrosion aqueuse ne permettent pas de concurrencer les systèmes de réfrigération classiques et l'Arsenic, lui, est très toxique. De ce fait, les recherches actuelles sur les matériaux se sont orientés principalement vers la substitution du Gadolinium par deux grandes familles : les alliages à base de Gadolinium et ceux à base de Manganèse tels que Gd5(SixGe1-x)4 et MnFeP1xAsx. Il s'agit de trouver des compositions permettant de disposer d'un EMC conséquent sous un champ magnétique faible, sur un large domaine de température, tout en assurant des coûts de matière première et de mise en œuvre réduits [15].

A l'heure actuelle, certaines substances toxiques dans de tels composés sont en voie d'être remplacées par des éléments plus respectueux de l'environnement. On trouve des discussions sur divers types de matériaux et leurs propriétés distinctes dans des études approfondies. Actuellement, les entropies totales et la puissance frigorifique associée, le changement de température adiabatique et le coût des matériaux sont à l'étude. D'autres propriétés telles que la résistance à la corrosion, les propriétés mécaniques, la conductivité thermique, la résistivité électrique et l'impact sur l'environnement prennent également de l'importance. Aujourd'hui, les meilleurs matériaux abordables existants ont, selon la littérature, un EMC d'environ 2 à 8 K par Tesla [13]. Les figures 2.2 et 2.3 montrent respectivement l'évolution de l'EMC et la chaleur spécifique du Gadolinium en fonction de la température calculés par la théorie du champ moléculaire pour des champs magnétiques de 2T et 5T.



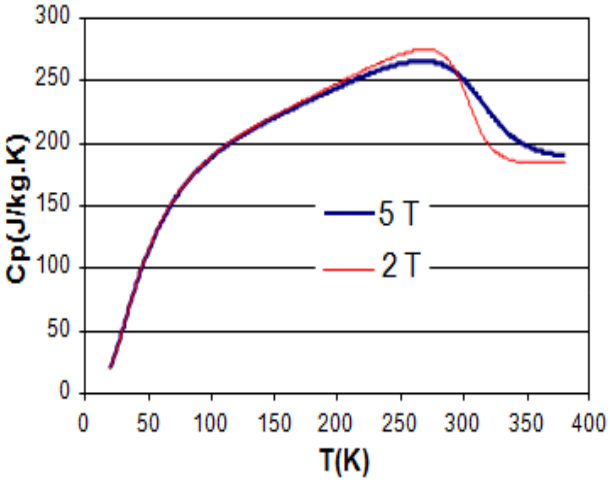


Figure. II.2.: Evolution de l'EMC du Gadolinium à champ constant (2T et 5T

Figure. II.3: Evolution de la chaleur spécifique du Gadolinium en fonction de la température en fonction de la température

Evidement, les matériaux magnétiques les plus attractifs pour la réfrigération magnétique sont ceux qui réunissent au mieux les critères suivants [2] [11] [14]:

- ✓ Une variation d'entropie magnétique ΔS_m élevée sur une plage de température la plus large possible afin de disposer d'une forte puissance frigorifique. Cela se traduit par un moment magnétique élevé et une transition de phase étendue (valeurs élevées de J et g) ;
- ✓ Une variation de température adiabatique ΔT_{ad} élevée (fort effet magnétocalorique). Cela se traduit par une faible chaleur spécifique C_p;
- ✓ En plus de ces caractéristiques magnétiques, les propriétés suivantes sont également souhaitables pour obtenir des réfrigérants plus efficaces:
- ✓ Une température de transition proche de la température de la source froide;

- ✓ Forte chaleur spécifique pour réduire les oscillations en température lors des alternances des débits du fluide;

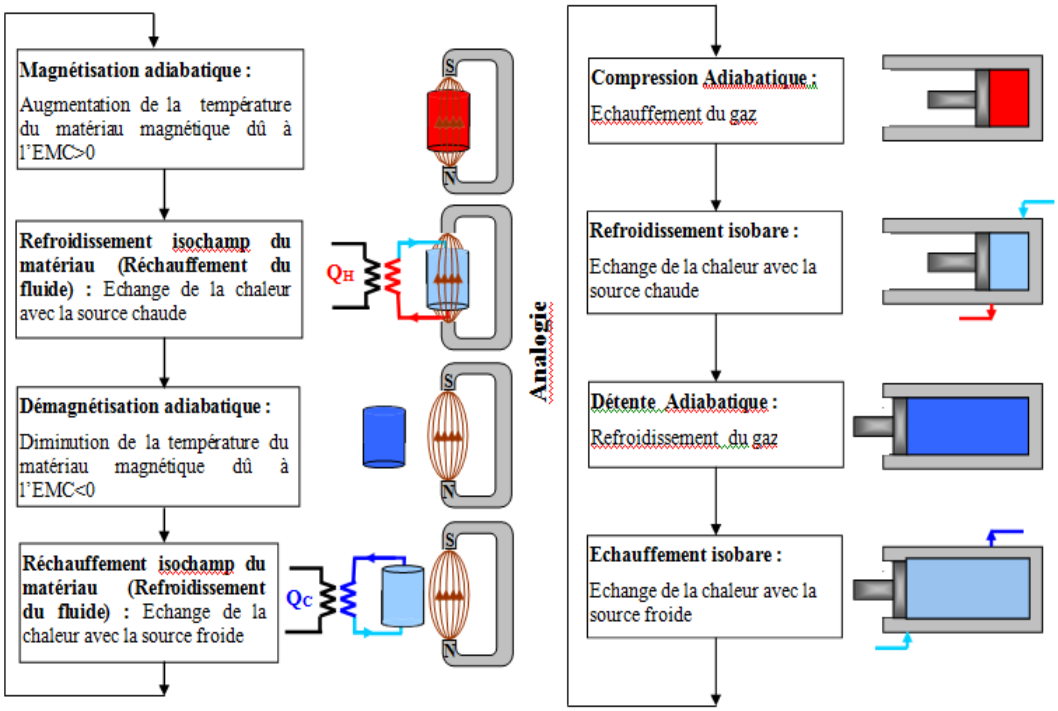
- ✓ Des hystérésis magnétique et thermique minimales permettant d'avoir des fréquences de fonctionnement élevées et donc une grande puissance froide;
- ✓ Une grande résistance électrique pour diminuer les pertes par courant de Foucault;

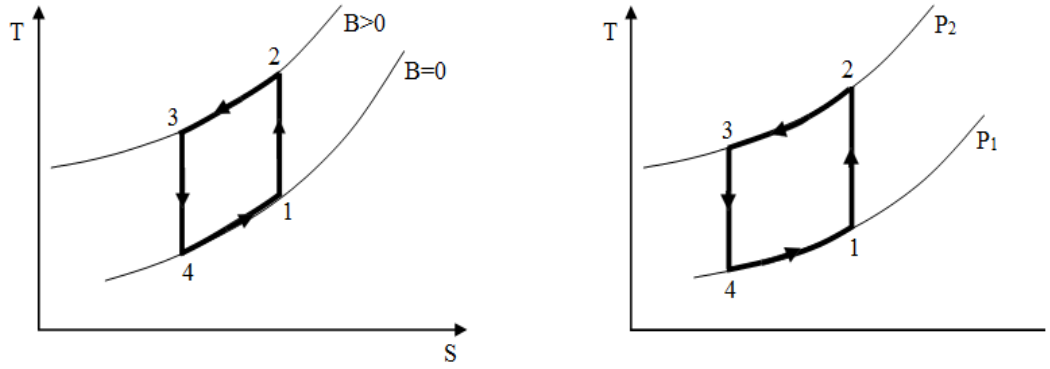
- ✓ Une grande conductivité thermique dans le sens des échanges avec le fluide et faible dans les autres directions afin d'améliorer l'efficacité des échanges et limiter les pertes par diffusion dans le matériau;
- ✓ De bonnes propriétés mécaniques afin de simplifier les processus de fabrication;
- ✓ Un coût d'élaboration et de production faible, nécessaire pour les applications commerciales;
- ✓ Faible porosité afin de limiter le volume mort;

- ✓ Faible rugosité du matériau et faible viscosité du fluide pour réduire les pertes de charges à l'écoulement;
- ✓ Fort coefficient d'échange thermique par convection h_{cv}.

II.5.Cycles de Réfrigération Magnétique :

A priori, l'aimantation adiabatique d'un matériau se traduit par une augmentation de sa température. Réciproquement, une désaimantation permet de le refroidir, et cela de façon quasi réversible. On peut réaliser ainsi magnétiquement l'équivalent d'un cycle thermodynamique classique avec une meilleure efficacité énergétique et sans fluide frigorigène (figure II.4). L'aimantation du matériau est alors équivalente à la compression d'un gaz et sa désaimantation à la détente.





1-2 : Aimantation adiabatique du matériau
2-3 : Refroidissement isochamp
2-3 : Désaimantation adiabatique du matériau
3-4 : Réchauffement isochamp

1-2 : Compression adiabatique du gaz
2-3 : Refroidissement isobare
2-3 : Détente adiabatique du gaz
3-4 : Réchauffement isobare

Figure. II.4 : Analogie entre un cycle magnétothermique et un cycle conventionnel de réfrigération à compression de vapeur

II.5.1. Cycles sans régénération :

Les machines construites et testées fonctionnent soit suivant des modèles à "coup singulier" (c'est-à-dire, magnétisation isotherme puis démagnétisation adiabatique du réfrigérant), soit suivant le cycle de Carnot (i.e. deux évolutions adiabatiques et deux évolutions isothermiques); qui ne nécessitent donc pas de régénération (i.e. échanges de chaleur avec d'autres substances) [14].

II.5.2. Cycles avec régénération :

Afin d'utiliser convenablement l'EMC dans un réfrigérateur magnétique, un cycle thermomagnétique doit être accompli. Deux types sont souvent considérés [14]:

- les cycles à régénération (où à récupération) externe, qui sont analogues à ceux employés dans les cycles conventionnels à gaz (Ericsson, Brayton, Stirling, etc.).
- le cycle à régénération magnétique active (Actif Magnetic Refrigeration : AMR), sans précédent, i.e. le matériau magnétique agit en même temps comme réfrigérant et régénérateur (ou régénérateur actif).

Chaque cycle présente des avantages et des inconvénients pour des conditions d'opération particulières.

II.6. Etude descriptive d'un cycle AMR :

Tout comme pour les réfrigérant classique, la production du froid par l'exploitation directe de l'EMC autour de la température ambiante est limitée par le fait que les matériaux magnétocaloriques existants ne permettent pas d'atteindre des écarts de température élevés, en particulier dans les systèmes à aimants permanents, car les valeurs de l'EMC sont limitées ; de l'ordre de 2 K/T pour des matériaux ferromagnétiques typiques.

Autrement dit, l'inconvénient principal d'un cycle thermomagnétique est que la température du matériau magnétocalorique doit descendre au dessous de la température du système à réfrigérer (source froide). Ceci ne permet donc pas d'atteindre des températures très basses avec un seul cycle et une variation du champ magnétique modérée.

Ce problème technique a été contourné grâce à des cycles magnétothermiques spécifiques, appelés **cycles à régénération**, où les écarts de températures induits par le processus d'aimantation et désaimantation peuvent être amplifiés. Le rôle de régénération est assuré par le matériau réfrigérant qui subit les cycles aimantation / désaimantation ; les échanges de chaleur entre la source chaude et la source froide sont assurés par un fluide caloporteur qui traverse le matériau en circulant alternativement entre les deux sources. Le principe de fonctionnement d'un tel système est montré en figure (II.5) :

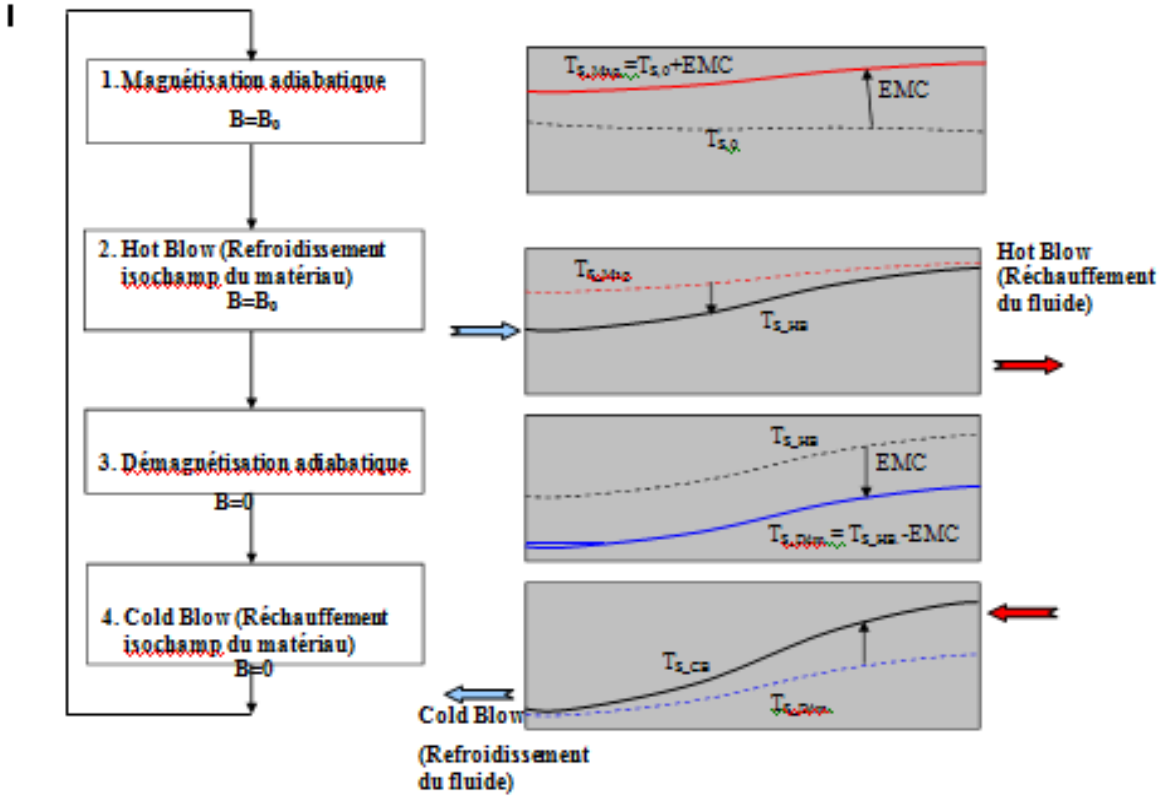


Figure. II.5 : Description du cycle AMR et profils de température associés le long du régénérateur

Le gradient de température ΔT observé (Fig. II.6) sera amplifié en alternant le fluide entre les deux sources de chaleur jusqu'à atteindre le régime établi

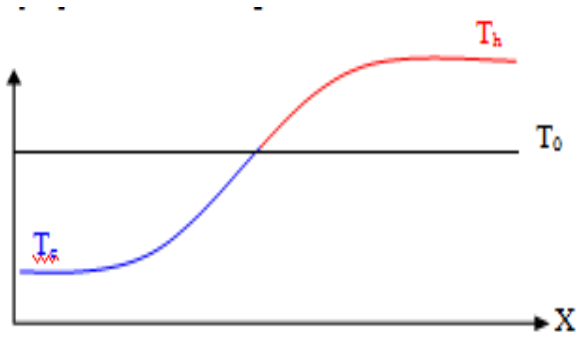


Figure. II.6 : Gradient de température dans un lit régénérateur

Il est à remarquer qu'un système AMR est caractérisé par un fonctionnement périodique. Chaque période (2τ) représente un cycle magnétothermique qui fonctionne d'une manière identique au cycle sans régénération :

1. Magnétisation adiabatique : augmentation de la température du matériau sous l'effet du champ magnétique.

2. Réchauffement du fluide (Hot Blow) : circulation du fluide de la source froide vers la source chaude produisant un échange de chaleur avec le matériau qui se traduit par un refroidissement isochamp du matériau et réchauffement du fluide caloporteur.

Cette chaleur sera cédée à la source chaude à travers l'échangeur chaud.

3. Démagnétisation adiabatique : diminution à nouveau de la température du matériau à la suppression du champ magnétique.

4. Refroidissement du fluide (Cold Blow) : circulation du fluide en sens inverse de la source chaude vers la source froide. Il en résulte un échauffement isochamp du matériau et refroidissement du fluide caloporteur. Ce dernier sera mis en contact thermique avec le fluide à refroidir à travers l'échangeur froid.

Comme illustré en figure II.7, un système de Réfrigération Magnétique Active (AMR) est essentiellement composé des éléments suivants :

- Un élément actif composé d'un matériau à EMC (lit régénérateur) ;
- Une source de champ menée d'un système de déplacement qui permet de magnétiser et démagnétiser le matériau magnétique ;
- Une pompe alternative qui sert à alterner le fluide caloporteur entre la source chaude et la source froide.
- Un échangeur chaud qui permet au fluide caloporteur de rejeter la chaleur vers la source chaude.
- Un échangeur froid qui sert à récupérer de l'énergie thermique de la source froide (système à réfrigérer).

L'application du principe de régénération nécessite un changement du champ magnétique dans le matériau magnétocalorique. Ceci peut être réalisé à l'aide de différents principes :

- Champs magnétiques modifiés en alternance dans des blocs statiques de matériau magnétocalorique par l'application d'électroaimants.

- Mouvement rectiligne du matériau magnétocalorique avec des assemblages d'aimants permanents statiques.
- Mouvement rectiligne d'assemblages d'aimants permanents avec des blocs de matériaux magnétocaloriques statiques.

- Mouvement rotatif de matériaux magnétocaloriques avec des assemblages d'aimants permanents statiques.

- Mouvement rotatif d'assemblages d'aimants permanents avec des blocs de matériaux magnétocaloriques statiques.

II.7.Dispositifs de réfrigération magnétique:

Suite au premier système de réfrigération magnétique construit par Brown en 1976 [16], de nombreux chercheurs de part le monde ont commencé à attacher de l'importance à la réfrigération magnétique autour de la température ambiante et ont développé consécutivement quelques systèmes intéressants.

Parmi les systèmes trouvés dans la littérature, on cite :

II.7.1. Système magnétique de Brown :

Le système de Brown est un système tournant basé sur le cycle thermomagnétique d'Ericsson. Le matériau utilisé est le Gd en forme de plaques de 1 mm d'épaisseur, séparées par des fils d'acier inoxydable traversé verticalement par un fluide composé de 80% d'eau et de 20% d'alcool dans un passage de 1 mm. Sous l'application d'un champ magnétique maximal de 7T généré par un supraconducteur, sans charges et après 50 cycles de régénération, une température de 46°C a été atteinte pour la source chaude et -1°C pour la source froide, soit un ΔT de 47 °C [16].

II.7.2. Système magnétique de Steyert :

C'est un système tournant utilisant un matériau magnétocalorique poreux en forme d'anneau et travaillant selon le cycle de Brayton. Il se déplace alternativement entre deux zones de champ magnétique, zone à faible champ magnétique et zone de fort champ, grâce au mouvement rotatif de la roue.

Lors de son passage dans la zone à faible champ magnétique, le matériau magnétocalorique reçoit de la chaleur du fluide caloporteur et se manifeste inversement, c'est-à-dire cède de la chaleur, lors de son passage dans la zone à fort champ magnétique. De sa part, le fluide caloporteur reçoit et cède de la chaleur respectivement de la source froide (système à refroidir) et au réservoir de la source chaude. La figure II.8 décrit schématiquement le système magnétique de Steyert [17].

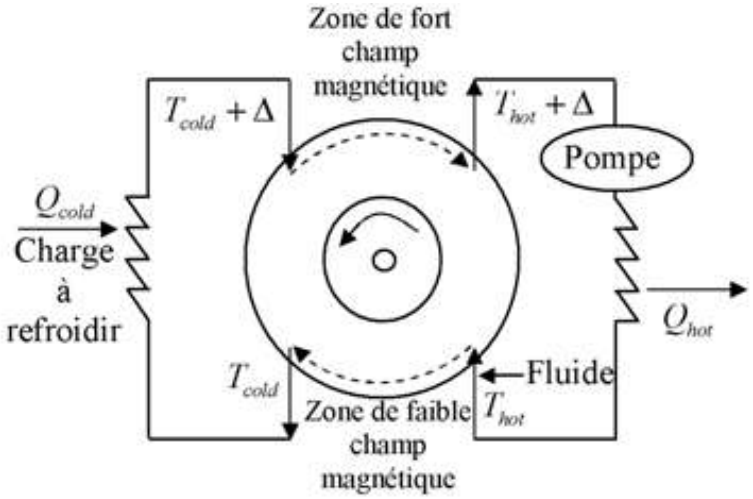


Figure. II.7: Représentation schématique du système magnétique de Steyert.

II.7.3. Système magnétique de Kirol :

Ce système a été conçu par Kirol selon le cycle d'Ericsson d'une machine tournante [1]. Le champ magnétique est produit par des aimants permanents NdFeB et atteint une valeur maximale de 0.9 T dans l'entrefer.

Le réfrigérant est un rotor composé d'un disque plat constitué de 270 g de Gadolinium. L'écart de température obtenu est de 11 K.

II.7.4. Dispositif magnétique réalisé en Espagne :

Le dispositif représenté par la figure (2.9) a été développé par l'équipe de l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone. Le matériau magnétocalorique est un ruban de Gadolinium (Gd 99.9%) fixé sur un disque en plastique et plongé dans un fluide caloporteur (huile d'olive). Le cycle magnétique d'aimantation / désaimantation est assuré par la rotation du disque en plastique et son passage devant un aimant. L'écart de température obtenu est respectivement de 1.6 et 5 K pour un champ de 0.3 T et 0.95 T. Ceci correspond à 2.5 fois l'EMC du Gd. Même si les performances obtenues sont faibles, ce dispositif est le premier qui a montré la faisabilité de la réfrigération magnétique avec des champs accessibles par des aimants permanents

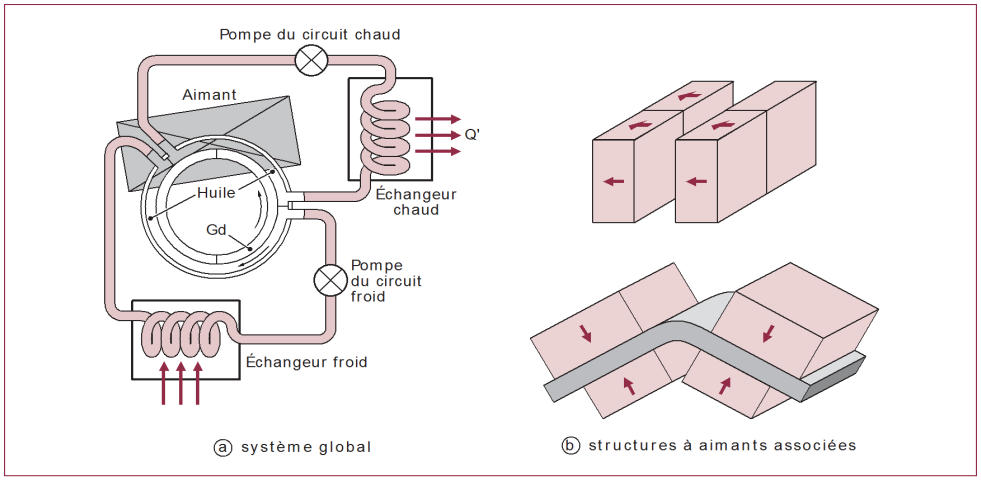


Figure 19 – Dispositif de réfrigération magnétique à aimants permanents

Figure. II.8. : Dispositif de réfrigération magnétique à aimants permanents [18]

II.7.5. Système magnétique Japonais:

Okamura et al. [19] ont construit un système de réfrigération magnétique, comme le montre la figure (II.10). La culasse a un diamètre extérieur de 27 cm et une longueur de 40 cm. Le champ magnétique est produit par des aimants permanents en rotation, produisant un champ maximal de 0.77 T. Le lit régénérateur est composé de 4 blocs. Chaque bloc est un alliage différent de GdDy (en forme de sphère) pour élargir la plage de variation de la température. La circulation du fluide est assurée par une pompe et une valve rotative. La puissance obtenue est de 60 W. Le système a été amélioré, La culasse statorique a été feuilletée et la source de champ améliorée (le champ maximal est de 0.9 T). Cela a permis d'atteindre une puissance de 100 W en utilisant le Gadolinium comme matériau magnétocalorique.

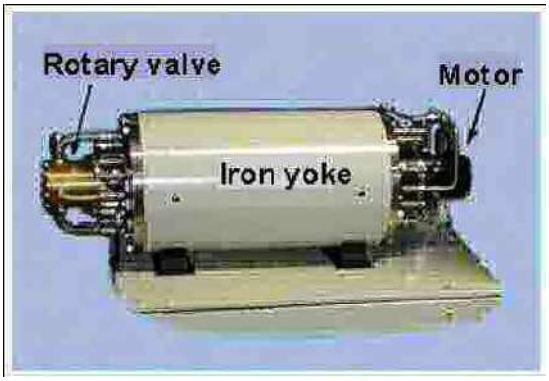


Figure. II.9 : Système magnétique japonais [19]

II.7.6 Dispositif magnétique du G2Elab :

Le dispositif réalisé au G2Elab (Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble) est de type alternatif. Le régénérateur est constitué de plaques parallèles de Gadolinium de 1 mm d'épaisseur et de 50 mm de longueur [11]. Le champ magnétique est produit par un aimant permanent (cylindre d'Halbach) créant un champ magnétique de 0.8 T. Le fluide utilisé est l'eau. Sa circulation est assurée par une pompe péristaltique fonctionnant dans les deux sens. Le vérin pneumatique produit le mouvement du bloc réfrigérant et assure les phases aimantation / désaimantation. L'automate programmé permet de gérer le vérin et la circulation du fluide pour effectuer les 4 phases de ce cycle. Le système est fermé et il n'y a pas d'échange avec l'extérieur. Il a été conçu pour étudier le cycle AMRR et l'exploiter en utilisant différents matériaux.Le but de ce prototype de réfrigération magnétique est de chercher à optimiser non plus uniquement les aspects magnétiques des matériaux, mais aussi les autres aspects : forme des blocs actifs (plaques, poudres, billes…), contraintes mécaniques….Il est paru judicieux de mettre en place un moyen de test des différents matériaux de façon simple, fiable et de manière reproductible. Le process est étudié pour qu'il soit le plus facilement paramétrable.

a. Patrie Mécanique :
    - La source de champ :

La source de champ utilisée est un cylindre de Halbach. Il produit un champ de 0.8 T.

Pour le relier à son actionneur, une structure mécanique a été conçue. Les pièces principales ont été faites en aluminium pour ne pas trop alourdir l'ensemble et trois axes en acier de haute précision le guident dans son déplacement vertical.

L'ensemble aimant et support pèse environ 14 kg.

- Le cylindre central :

Les cylindres ou les pistons se déplacent, permettant de pousser le volume de fluide, ont été fait en verre borosilicaté. Cela permet d'avoir un meilleur état de surface que sur une pièce usinée en plexiglas. Ces tubes en verre sont montés sur un support permettant de les relier au cylindre central contenant le matériau actif. Ces pièces là, puisqu'elles n'ont pas à supporter de frottement, sont faites en plexiglas. Cet ensemble est transparent. Les pistons sont faits en matière plastique pour limiter les fuites thermiques vers l'extérieur. Ils comportent chacun un joint quadrilobes. Ils assurent une bonne étanchéité avec des frottements moindres que les joints toriques.

Le piston du haut est relié à son actionneur par une tige métallique. Le piston du bas, lui, repose sur un ressort de rappel.

Lorsque l'actionneur descend, il pousse le piston du haut qui pousse le volume du fluide à travers le bloc actif vers le bas. Ce volume étant incompressible, il pousse lui-même le piston du bas.

Lorsque l'actionneur remonte, il tire le piston du haut. Le remplissage se fait à travers les pistons.

Un tuyau de faible diamètre (0.8 cm) permet de faire un vide primaire par une pompe manuelle puis d'aspirer le fluide. Par cette méthode, on limite la quantité d'air piégée dans le bloc actif.

Après le remplissage, ces tuyaux sont fermés par pincement. Le volume d'eau qu'ils contiennent est un volume « mort » puisqu'il ne passera jamais à travers le matériau actif. Mais le faible diamètre des tuyaux permet de négliger ce volume.

b. Partie Instrumentation

L'instrumentation de ce système se compose de deux actionnaires, de mesures de positions et de mesures de températures. La mesure de position des actionneurs permet de les synchroniser entre eux. Le pilotage est géré par ordinateur via une carte d'acquisition NI.

- Mesure de température :

Des thermocouples chemisés miniatures de type T sont utilisés pour suivre l'évolution de la température en différents points. Deux thermocouples sont positionnés sur les pistons au contact du fluide pour mesurer la température côté chaud et côté froid. Deux autres thermocouples traversent le cylindre central pour mesurer la température du matériau actif à chacune de ses extrémités. On peut voir ainsi l'évolution du gradient de température dans le matériau et de la quantité de chaleur transmise au fluide. Les thermocouples sont moins précis que les sondes en platine mais ils sont plus robustes notamment pour l'utilisation dans l'eau. Ils sont également miniaturisables. C'est pourquoi ils ont été préférés.

- Mesures de positions :

Elles sont faites par des capteurs potentiométriques linéaires. Par leur simplicité, ils sont particulièrement robustes. Un capteur est situé sur l'actionneur des pistons et un autre sur l'actionneur aimant. Cette mesure en continu des positions de l'aimant et des pistons permet de synchroniser le fonctionnement des deux actionneurs associés.

- Actionneur aimant :

C'est un moteur électrique synchrone linéaire qui met en mouvement l'aimant. Il peut développer une force maximale de 572 N et une vitesse maximale de 3 $m.s^{-1}$. Son servo contrôleur est piloté par une interface série sur ordinateur.

- Actionneur des pistons :

Un moteur pas à pas linéaire à vis est relié aux pistons. Il permet, sur une course maximale de 50 mm, de développer jusqu'à 300 N à 32 mm^{-1}. Son contrôleur nécessite un signal TTL dont la fréquence définit la vitesse du moteur. Ce signal est généré par une carte numérique sur l'ordinateur.

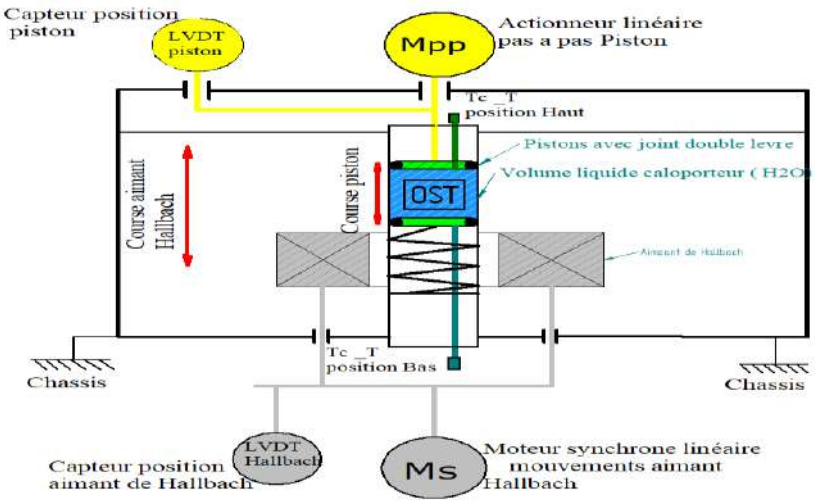


Figure.II.10. Démonstrateur linéaire de réfrigération magnétique au G2Elab.

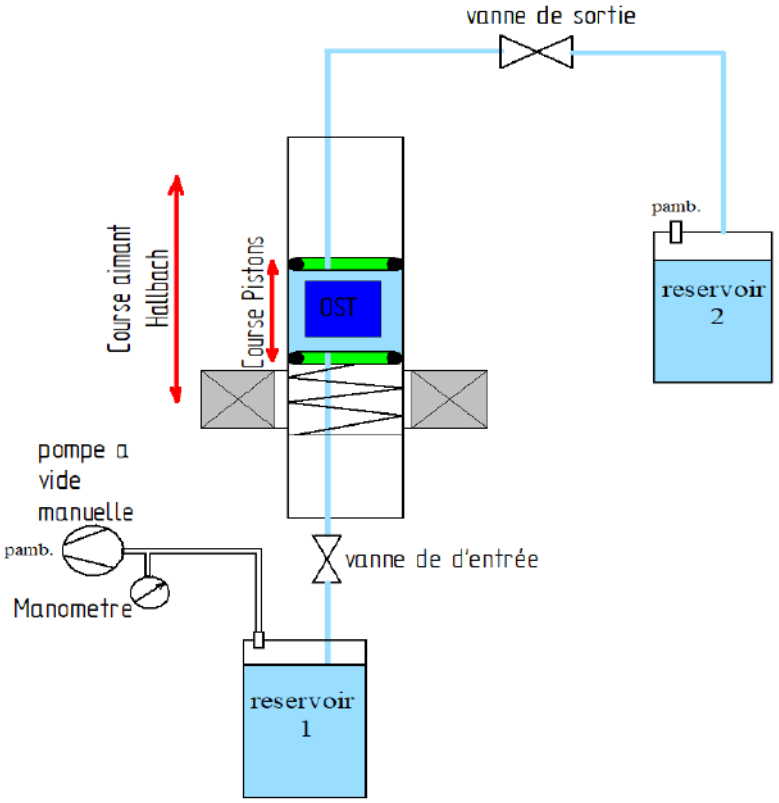


Figure .II.11. Principe de fonctionnement du DEMC au G2Elab.

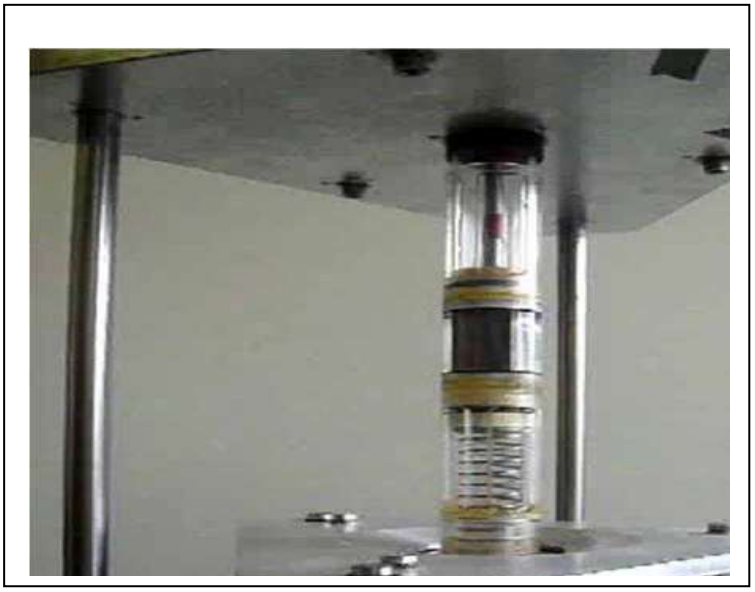


Figure. II.12. Dispositif à aimants permanents pour l'étude du cycle AMR

Chapitre III.
Les outils de travail, Résultats et discussions

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les outils de travail et c'est l'un des aspects les plus important dans la conception des systèmes magnétocaloriques est le concept de la modélisation qui rends possible l'étude des géométries complexes des différentes situations en dépensant moins de temps, d'efforts et d'argent que les recherches expérimentales. En outre, la validation des modèles théoriques et numériques requière la confirmation expérimentale.

Jusqu'à aujourd'hui, il n'y a aucun modèle informatique complet pour des systèmes magnétocaloriques comprenant tous les phénomènes ensemble. Néanmoins, l'intérêt grandissant en cette matière a produit des tentatives rudimentaires qui soutiendront probablement des études postérieures. Les données expérimentales et les modèles mathématiques ont été obtenus pour des situations très restreintes et idéalisées, et ne tiennent pas compte des phénomènes autres que celui étudié, [*A*], [*B*]… .

Les deux, études expérimentales et modélisation numérique/analytique doivent être confrontées et comparées l'une à l'autre pour décrire un système magnétocalorique complet. Les recherches futures doivent se focaliser sur les performances et l'intégration des systèmes magnétocaloriques aux auxiliaires incluant le stockage de l'hydrogène, reformage, les systèmes d'alimentation en oxygène, l'échangeur de chaleur, l'intégration thermique, gestion de l'eau et de l'humidité, la gestion de la puissance, les capteurs et le contrôle.

Notons que l'un des problèmes majeurs rencontré dans la modélisation des systèmes magnétocaloriques est la difficulté de connaître tous les paramètres rentrant dans les équations gouvernantes du fonctionnement systèmes magnétocaloriques.

Échange de température

Un certain nombre de techniques ont été utilisées pour augmenter cet échange, y compris la réfrigération régénérative magnétique active (AMRR). Le principe de ce cycle utilise un fluide caloporteur – en contact avec les matériaux magnétocaloriques (MMC) – circulant du côté froid vers le côté chaud lorsque le MMC est chauffé (magnétisé), et du côté chaud vers le côté froid lorsque la MMC est refroidie (démagnétisée). Cela augmente progressivement la différence de température entre la source froide et chaude à environ 20K, rendant le système potentiellement adapté aux applications commerciales.

Il existe diverses applications potentielles. Les développements initiaux ont été orientés vers les marchés de la réfrigération commerciale et domestique et comprennent des vitrines, des refroidisseurs de boissons et des réfrigérateurs commerciaux ou domestiques. Cependant, le refroidissement magnétique peut également être adapté à d'autres applications de réfrigération, telles que la climatisation (y compris automobile), la cryogénie ou dans les systèmes de chauffage - par exemple, les pompes à chaleur.

La demande est susceptible d'être dictée par les réglementations environnementales, car le chauffage ou le refroidissement magnétique n'utilise pas de réfrigérant mais, à la place, un fluide de chauffage ou de refroidissement, qui peut être à base d'eau. En conséquence, il n'y a aucune possibilité de fuite de réfrigérant et aucune émission directe de CO2, il est donc entièrement conforme à toutes les réglementations, y compris les réglementations F-Gas en Europe et de l'Environmental Protection Agency aux États-Unis.

De plus, la fréquence du cycle magnétocalorique est typiquement comprise entre 1Hz et 3Hz, la vitesse de rotation de la machine est donc lente et donc très silencieuse par rapport aux systèmes de compression traditionnels. Selon des recherches récentes, le MCE devrait avoir une efficacité (coefficient de performance) nettement plus élevée que les méthodes conventionnelles actuelles, avec un potentiel d'économie d'énergie de 30 %.

Par conséquent, nous développons dans ce qui suit, un modèle utilisant les réseaux de neurones comme technique non paramétrique.

III.1. 1.Aperçu sur les modèles trouvés dans la littérature :

Il est possible de classer les modèles disponibles dans la littérature en trois catégories selon leurs objectifs :

- **Les modèles de CAO** qui sont utilisés par les fabricants systèmes magnétocaloriques pour

recréer le comportement des systèmes magnétocaloriques en vue de son analyse. Ils décrivent systèmes magnétocaloriques et ses fonctionnements à l'échelle microscopique et les différents phénomènes électromagnétiques y sont pris en compte de façon très fine. Leur mise en œuvre

nécessite la connaissance d'un grand nombre de paramètres physiques concernant les matériaux constituant le noyau et des moyens de calcul très importants.

- **Les modèles de comportement** qui ont pour but, non pas de caractériser l'état

microscopique interne, mais de décrire avec le plus d'exactitude possible les variations des grandeurs macroscopiques externes au cours du fonctionnement. Ils utilisent la connaissance du fonctionnement interne pour établir des corrélations simples entre les grandeurs caractéristiques.

- **Les modèles mixtes** sont ceux qui reproduisent le comportement systèmes magnétocaloriques en faisant référence à des équations simplifiées utilisées dans les modèles de CAO. Ce sont des systèmes de plusieurs équations paramétriques à plusieurs inconnues. Ce type de modèle est plus précis que les modèles de comportement mais beaucoup plus difficile à mettre en œuvre. Il nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques des systèmes magnétocaloriques en faisant référence à de nombreuses données physiques constructeurs (quantité de matières, dimension, structure des éléments). L'identification des paramètres non calculables nécessite un large plan d'expérience.

Notons que la plupart de ces modèles nécessitent un travail d'identification de certains paramètres du modèle pour ajuster celui-ci aux caractéristiques des systèmes magnétocaloriques. Ils sont adaptés à des régimes de fonctionnement et un environnement connu. Ils donnent de bons résultats pour le domaine de fonctionnement où ils ont été prévus (précision d'environ 1 à 5%).

- La première approche est de modéliser les phénomènes physiques précisément. Ce type de modèle aboutit souvent à des équations très complexes demandant une connaissance très précise des systèmes magnétocaloriques étudiés.
- La seconde approche de modélisation est de simplifier le problème en modélisant non les phénomènes physiques, mais les courbes caractéristiques par des équations paramétrées. Cette deuxième approche est performante et moins exigeante dans les données et spécifications des systèmes modélisés.

Les modèles empiriques sont donc préférés aux modèles théoriques dans la mesure où ils permettent une simplification du problème et une diminution du nombre de paramètres.

Actuellement, la modélisation des processus physiques entrant dans la modélisation des systèmes magnétocaloriques devraient comprendre

1. Une distribution de courant égale doit être assurée par une distribution uniforme du flux magnétique. Autrement, un courant parasite peut être observé entre les canaux dus aux différences de potentielles, [C].
2. La température doit être maintenue uniforme.

La modélisation peut être envisagée de deux manières différentes :

- Utilisation des lois physiques, **modèle de connaissance**.
- Utilisation de résultats expérimentaux, **modèle de représentation**.

La première méthode cherche à comprendre et à représenter le fonctionnement du système, tandis que la seconde ne vise qu'à représenter un cas particulier. En conséquence, la première démarche couvre un domaine d'applications plus large du fait qu'elle est plus scientifique et plus quantitative.

Le modèle de simulation de systèmes magnétocaloriques dépend **principalement de son utilisation**. Un modèle très précis exige un niveau de complexité très élevé, ce qui a comme conséquence un poids de calcul plus important et donc une utilisation plus limitée. Néanmoins, dans certains cas, cette précision est nécessaire, [***D***].

Certains phénomènes physiques relatifs aux systèmes magnétocaloriques peuvent, suivant l'analyse à réaliser, revêtir plus ou moins d'importance. Ainsi, par exemple, les modèles destinés au contrôle commande ne nécessitent pas la prise en compte des phénomènes physiques. Par contre, pour l'étude des matériaux visant à leur amélioration, il sera impératif de comprendre et modéliser ces comportements, [***E***]. Les modèles se focalisent donc sur les phénomènes qui influent notablement sur les paramètres à prendre en compte dans l'étude. La complexité du modèle augmente évidemment en fonction du nombre de phénomènes simulés.

L'échelle de temps de simulation constitue également un facteur déterminant pour le choix du modèle, puisque les dynamiques des différents phénomènes physiques mis en jeu sont différentes.

Enfin, tout cela nous conduit à un compromis entre la précision et la complexité du modèle retenu suivant son utilisation. Nous nous intéresserons aux principaux phénomènes qui auront une influence sur la réponse en températures de systèmes magnétocaloriques.

A l'heure actuelle, les travaux concernant la modélisation de systèmes magnétocaloriques sont déjà nombreux. Néanmoins, il reste encore certains aspects à analyser et améliorer, [***F***], [***G***].

Le centre d'intérêt de la recherche pour l'avenir doit être sur les performances et l'intégration de systèmes magnétocaloriques et des sous-ensembles associés dans le développement des systèmes embarqués en particulier et la qualité de l'écart des températures produit en général. Les sous-ensembles incluent stockage, échangeurs de chaleur et intégration thermique avec d'autres sous-ensembles, les capteurs et le contrôle, etc… [***H***].

Actuellement, la technologie de systèmes magnétocaloriques est la principale candidate dans la technologie de la cryogénie grâce à sa haute densité de puissance et sa basse température de fonctionnement, résultant des temps de mise en œuvre relativement cours.

La plupart des données expérimentales et modèles mathématiques de systèmes magnétocaloriques sont disponibles sous des conditions très spécifiques et souvent irréalistes et idéalistes, [***I***].

Presque tous assument une alimentation uniforme et des conditions isothermes, tout deux étant des simplifications commodes, [***J***]. En effet, ces modèles dressent l'aspect d'un comportement spécifique de systèmes magnétocaloriques indépendamment des autres effets présents. Aucun d'eux n'attaque le problème globalement avec un modèle complet, incluant les effets tridimensionnels (3D) stationnaire et dynamiques pour les multiples phénomènes couplés.

Un tel modèle de simulation pour de systèmes magnétocaloriques fournirait les entrées nécessaires aux deuxièmes et troisièmes niveaux de synthèse et de développement, ayant pour résultat un outil puissant pour le développement de l'hydrogène embarqué, [***K***].

III.2. Résultats de la simulation :

La traduction en blocs fonctionnels sur Simulink / Matlab, pour représenter un schéma du modèle statique de systèmes magnétocaloriques est recommandée à ce niveau. Ceci nous permettra d'extraire une base de données représentative du modèle qui sera utilisée par la suite. Ainsi, Simulink est conçu pour résoudre numériquement les équations différentielles, linéaires ou non, qui régissent le comportement de systèmes physiques dynamiques représentés par leurs modèles mathématiques. Son principal intérêt réside dans la possibilité

de travailler directement sur le schéma-bloc en lieu et place des équations mathématiques du système. Cette façon de procéder, très visuelle, est parfaitement adaptée aux habitudes de travail de recherche et développement. Le logiciel sous Matlab fournit des « *sources* » variées pour exciter les systèmes mis en place, ainsi que des instruments d'observation pour visualiser les signaux présents en divers endroits dans le système. Dans Simulink un schéma se substitue aux équations pour constituer le modèle. Les équations différentielles représentatives du fonctionnement du système physique modélisé sont sous-jacentes. Le logiciel simule le comportement du modèle représentatif du système en calculant, pas après pas, les points du signal de sortie dès lors qu'il connaît ceux du signal d'entrée et le point de départ (conditions initiales). La simulation ne remplace pas les essais réels, mais elle permet de les préparer, de multiplier les situations, d'examiner l'influence de la variation des paramètres, voire d'explorer des situations extrêmes. C'est un outil désormais indispensable et couramment utilisé en recherche et développement industriels, [***M***]. Simulink communique parfaitement avec MATLAB® dont il profite de toutes les fonctionnalités. Il est possible, par exemple, de recueillir la réponse d'un modèle et de la visualiser dans MATLAB® pour l'annoter et l'analyser.

Les courbes sont obtenues pour plusieurs cycles.

III.3. Analyse des résultats de simulation :

Nous constatons des représentations de la caractéristique de systèmes magnétocaloriques assez proches et représentatives sous des conditions de fonctionnement qui sont plus ou moins réalistes. Les résultats des ajustements du modèle statique ont un bon coefficient de détermination.

Notons que la difficulté principale pour obtenir un modèle précis de systèmes magnétocaloriques est le manque d'informations sur les valeurs exactes qui devraient être employées pour modéliser des paramètres. Le choix des paramètres peut de manière significative affecter les caractéristiques de sortie simulée, [***N***]. Il y a plusieurs travaux qui traitent de la modélisation et simulation de systèmes magnétocaloriques, dont certains discutent le comportement dynamique de systèmes magnétocaloriques, et présentent également quelques aspects liés aux paramètres de modélisation, un exemple, est l'étude sur le traitement de la sensibilité des paramètres, [***O***]. Les valeurs utilisées pour les paramètres sont principalement basées sur des données de fabrication et des expériences de laboratoire.

Cependant, il est encore difficile de modéliser exactement un certain aspect de fonctionnement de systèmes magnétocaloriques, vu que quelques processus sont la propriété des fabricants. Pour une description détaillée des processus de fabrication et de fonctionnement impliqué dans les systèmes magnétocaloriques, [***P***].

Les ambiguïtés entre les mesures et les calculs surgissent en raison des incertitudes refoulant non seulement des mesures expérimentales, mais également des paramètres mal définis. L'importance relative des processus physiques et électromagnétiques se produisant dans un système magnétocalorique peut être évaluée en utilisant une analyse multi-paramétrique généralisée (Perceptron multicouches avec apprentissage par rétro-propagation), qui prend en compte l'espace entier des paramètres de modélisation.

III.3.1. Le modèle à base de réseau de neurones

Nous allons ici utiliser l'ensemble de différentes caractéristiques obtenu précédemment, qui servira comme exemple d'illustration d'une application de modélisation par réseau de neurones de systèmes magnétocaloriques.

III.3.2. Traitement des données

Afin de faire un bon apprentissage, il est nécessaire que les exemples d'apprentissage soient bien distribués à travers la gamme de fonctionnement. Les modèles d'apprentissage doivent aussi être correctement choisis. Dans ce système, les valeurs ne varient pas dans la même échelle. Par exemple les variations de température sont mesurées en degré celcius. Ainsi, il est recommandé de standardiser les entrées présentées au réseau afin de faciliter l'apprentissage. En outre, le traitement des données permet une meilleure homogénéité des paramètres et évite de négliger des valeurs qui peuvent être décisives, [***V***].

III.4 Conception du réseau

La topologie du réseau de neurone qui a été choisie est le multi couche complètement connecté,**.** On doit alors décider du nombre de couches cachées et du nombre de neurones dans ces couches cachées. Cet aspect est toujours sujet à de nombreuses recherches, mais jusqu'ici aucune théorie ne nous permet de déterminer un nombre optimal de neurones et de couches cachées pour une modélisation correcte du processus.

Après la sélection du nombre de couches cachées, on doit choisir les entrées du réseau. Certaines connaissances sur le comportement du système sont ici nécessaires et spécialement sur les facteurs qui conditionnent la sortie du système, [***1***], [***2***].

L'architecture du réseau, fixe le schéma d'inter-connexion des unités. Chaque connexion est généralement caractérisée par un sens et un poids de connexion (noté *w = weight*) indiquant la "force" de la connexion.

- On distingue 3 types d'unités : les **unités d'entrée**, activées par un signal

d'entrée (*input*), les **couches de sorties**, donnant la "réponse" (*output*) du réseau au signal d'entrée, et les **couches cachées** (*hidden*) n'ayant pas de connexion avec "l'extérieur".

- Le signal se propage des entrées vers les sorties via les couches cachées.
- On distingue 2 types d'architecture : sans boucles de rétroaction et souvent organisé en couches (*feedworward*), ou incluant des boucles de rétroaction (*recurrent*).

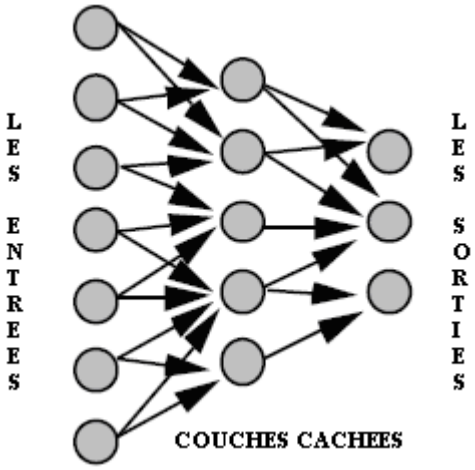


Figure.III.1 : Multicouche complètement connecté (Feedforward), pour la résolution de problèmes statiques

III.4.1.Le choix des entrées / sorties

Dans cette étude le modèle utilise un réseau de neurone qui a quatre nœuds d'entrées et une sortie du neurone linéaire. Un simple neurone de sortie est utilisé ici pour évaluer les

températures de sortie du système magnétocalorique. Le but de ce modèle de réseau de neurone est aussi pour estimer la température froide considérant les différentes conditions de fonctionnement et la température ambiante.

Sur la base de divers essais de simulation effectués sur un ordinateur de type Core i3, il a été établi que l'influence de la variation des températures d'entrée et la température froide sont décisives pour le comportement du système magnétocalorique. En considérant des résultats de simulation, les deux valeurs de pressions anodique et cathodique de gaz et la température du stack sont choisies en plus du courant comme entrées du modèle de réseau de neurone proposé, [***T.Fre, 00***].

$$E_{PAC} = f(T_{PAC}, P_{anode}, P_{cathode}, I_{PAC}) \quad \text{(III.1)}$$

Il peut être noté que la différence de température augmente avec la température ambiante cycliquement. Néanmoins, la meilleure caractéristique statique du système magnétocalorique est obtenue pour une température ambiante de 25°C et pour un cycle régulier. Il est donc possible de le fixer à une valeur réaliste.

Une température de fonctionnement élevée et les différentes valeurs de cycles n'améliorent pas davantage le comportement du système.

La figure, présente le schéma général du modèle du réseau de neurone du système magnétocalorique, il doit être souligné que le nombre des entrées dans ce modèle a été progressivement augmenté afin de quantifier l'influence de chaque paramètre considéré. Ainsi, les paramètres les plus prépondérant sont maintenus afin d'obtenir un modèle excellent requièrent un maximum de nombre de simulation possible. En effet, le principal objectif ici est de proposer un modèle à base de réseaux de neurones capable de représenter le comportement du système le plus parfait possible avec un minimum de paramètres. Dans certains cas les valeurs des températures ambiantes et le nombre de cycles ne seront pas des paramètres signifiant dans le cas où le système magnétocalorique fonctionne à température ambiante.

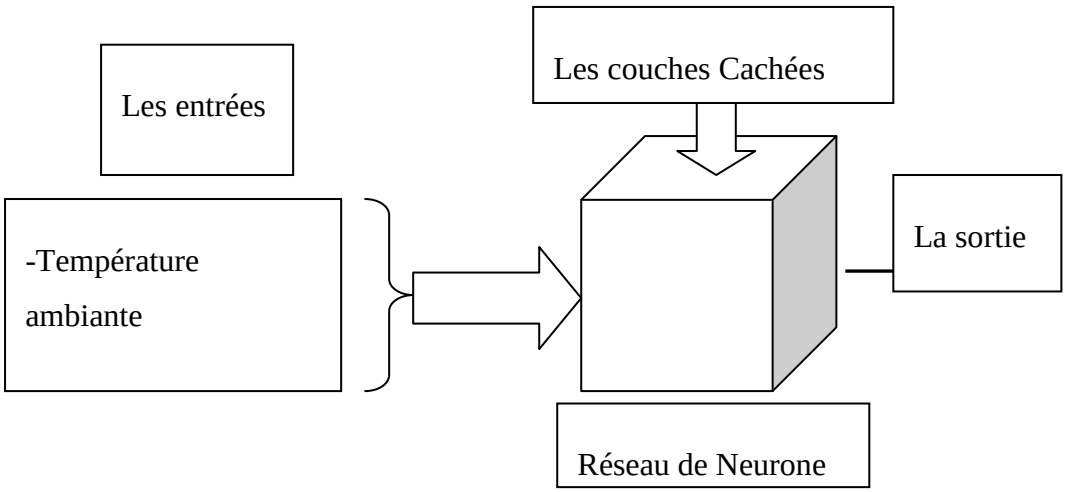


Figure III.2. Schéma général du modèle à réseau de neurone

III.4.2. La procédure d'apprentissage et résultats

Afin d'avoir les deux, ensemble d'apprentissage et ensemble de validation relativement significatifs pour valider le modèle du réseau neurone proposé, plusieurs essais sont effectués par simulation. Ces essais sont faits en considérant un mode de fonctionnement statique. Dans ce cas, les seuls paramètres variables sont les facteurs de températures (d'entrée), la température cryogénique et bien sûre du système magnétocalorique. Chaque test est effectué avec une température du sysème fixe et aussi des cycles fixes. L'ensemble d'apprentissage est effectué sur les courbes obtenues aux températures de fonctionnement du stack à 25°C et pour les différentes valeurs de cycles et de positions.

III.4.3. Apprentissage avec rétro-propagation

Les couches cachées n'ont pas de valeurs cible, donc, la procédure utilisée pour rétropropager l'erreur de la couche de sortie aux neurones de la couche caché pour modifier leurs poids et minimiser l'erreur.

Comme il a été indiqué au chapitre précédent, le choix de l'algorithme Quasi-Newtonnien de Levenberg-Marquardt qui présente des avantages notoires dans notre application et qui permet l'initialisation des poids aux petites valeurs aléatoires pour réduire les chances d'une saturation prématurée des neurones logistiques et de ce fait réduire la vitesse d'apprentissage, [***3***]. Le principe commun de l'algorithme du second-ordre est de calculer la direction descendante obtenue par la transformation linéaire du coût de la fonction gradient. Pour l'algorithme du gradient, les poids sont mise à jour à chaque pas selon la formule :

$$W(t+1)=W(t)+\Delta W \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (III.2)$$

Où :

$$\Delta W=-\alpha\frac{\partial J}{\partial W(t)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (III.3)$$

L'algorithme Quasi-Newton de Levenberg-Marquardt avec une approximation Hessienne *Hw* de la fonction coût est donc utilisé ici. Dans ce cas, l'équation de la mise à jour du poids est donnée en équation précédente (α Est le taux d'apprentissage).

$$W(t+1)=W(t)-\alpha[H_W(t)]^{-1}\frac{\partial J}{\partial W(t)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (III.4)$$

Où : α peut être considérée comme la taille du pas de la direction descendant du gradient d'erreur. Si les pas considérés sont très petits, l'erreur minimum est évidemment rencontrée, mais cette procédure de recherche du minimum peut mettre beaucoup de temps.

De larges pas peuvent aboutir à un apprentissage instable puisque ceci pourrait mener à passer le minimum recherché. Ainsi l'apprentissage est arrêté après un nombre fixé d'itérations ou après erreur ou après que l'erreur de moindre carrée dans l'apprentissage va au dessous de la tolérance spécifiée, [***4***].

III.4.4.Structure Matlab des réseaux :

Il s'agit d'une structure hiérarchique (certains membres de la structure de base sont eux-mêmes des structures) relativement complexe. Elle peut être visualisée lors de la création du réseaux ou plus tard. La fonction de création d'un réseau est spécifique au modèle de réseau utilisé. La fonction de création d'un réseau est newff, pour feed-forward (car dans ces réseaux l'activité ne se propage que de l'entrée vers la sortie). Exemple de syntaxe :

net =newff([0.001 1.2;303 343;0 1;0 1],[20 1],{'logsig','purelin'},'trainlm');

Cette commande crée le réseau et initialise ses poids, crée un réseau de 20 x 1 neurones, dont les entrées à 2 dimensions peuvent être comprises entre *0.001et 1.2* pour la1ère dimension*;303 et 343* pour la seconde*; 0 et 1 pour la troisième et; 0 et 1* pour la 4ième.

Il existe 2 types d'apprentissage :

· Incrémental : fonction *adapt*

· Par paquets : fonction *train*

Apprentissage incrémental (en-ligne, *on-line*) : les poids sont modifiés à chaque présentation d'une entrée.

Apprentissage par paquets (hors-ligne, *off-line*, *batch mode*) : les poids sont modifiés uniquement après présentation de toutes les entrées.

La simulation (ou activation) d'un réseau où *net* est le pointeur retourné par une fonction de création de réseau, se fait par l'instruction Matlab suivante : *a=sim(net, p) ;*

L'apprentissage est lancé par la fonction *train* (par paquets).

Dans Matlab le réseau pour le LM-BP (Levenberg-Marquardt Back Propagation) est programmé au moyen de 2 couches :

- Une couche pour la détermination du neurone excité (la sortie de ce dernier est

mise à 1, celle des autres neurones à 0)

- Une couche de neurones linéaires pour la classification.

La 2^{ième} couche comporte un neurone par classe, la 1ère comporte un neurone par sous-classe.

L'apprentissage modifie les poids de la première couche. Les neurones de la 2^{ième} couche combinent certaines sorties des neurones de la 1ère au moyen de fonctions OU.

On commence par fixer des paramètres d'apprentissage :

net.trainParam.epochs=1000; 100 par défaut

net.trainParam.lr=0.05 ; pas de valeur par défaut

puis on lance l'apprentissage :

net=train(net,P,T) ;

Affichage des poids résultats :

net.IW{1,1}

Affichage des résultats de classification :

Y=sim(net,P)

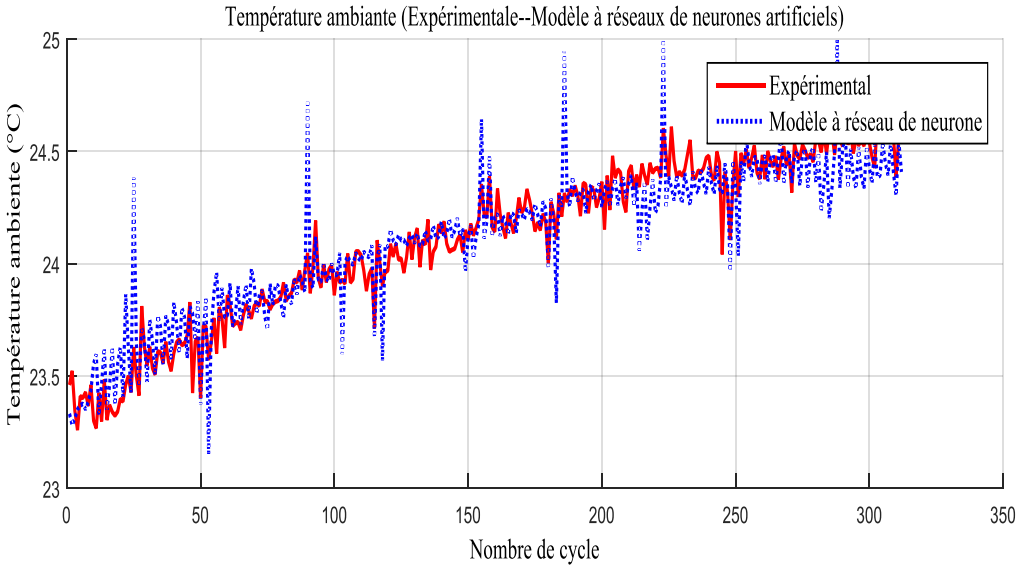


Figure III.3 : Profil des températures ambiantes.

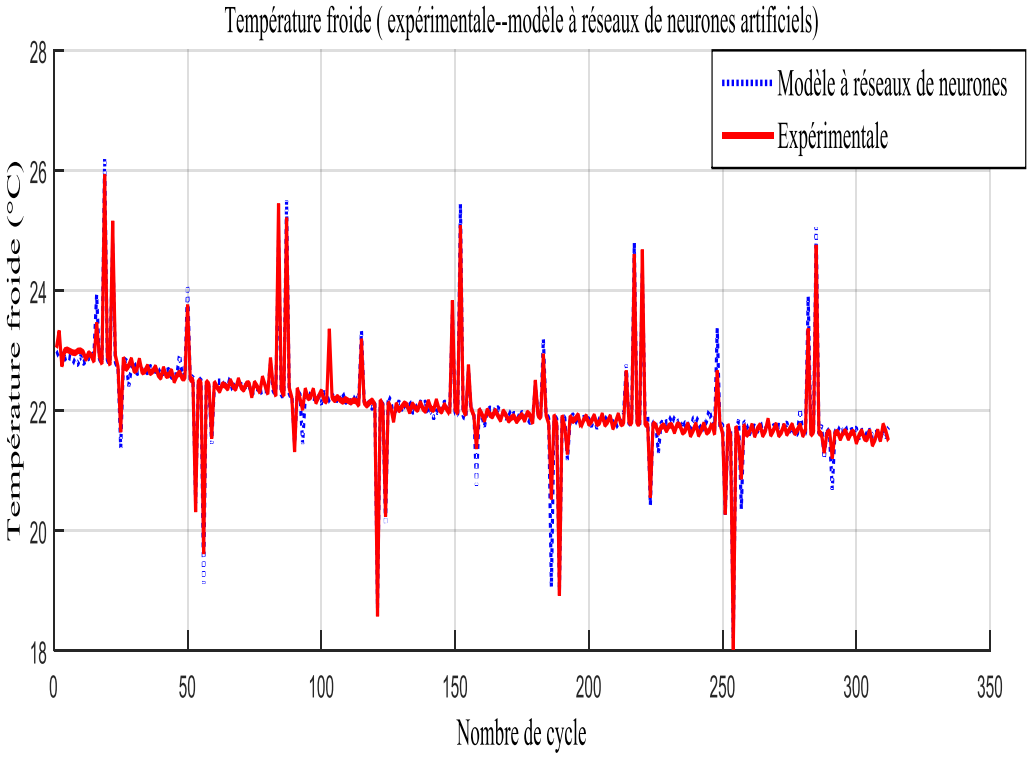


Figure III.4 : Profil des températures froides.

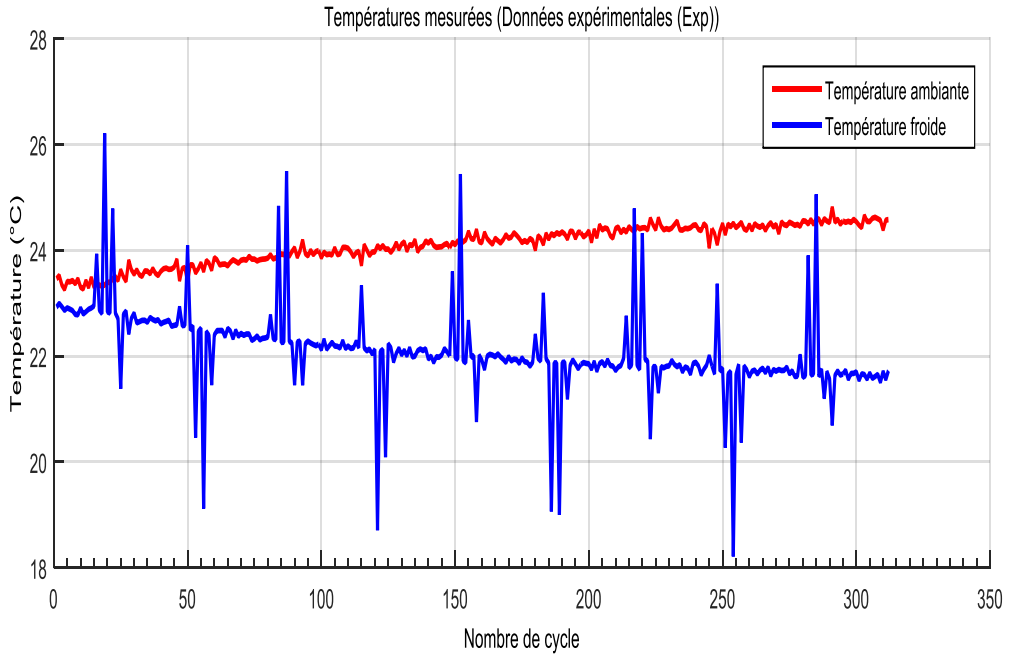


Figure. III.5: Profil des températures mesurées.

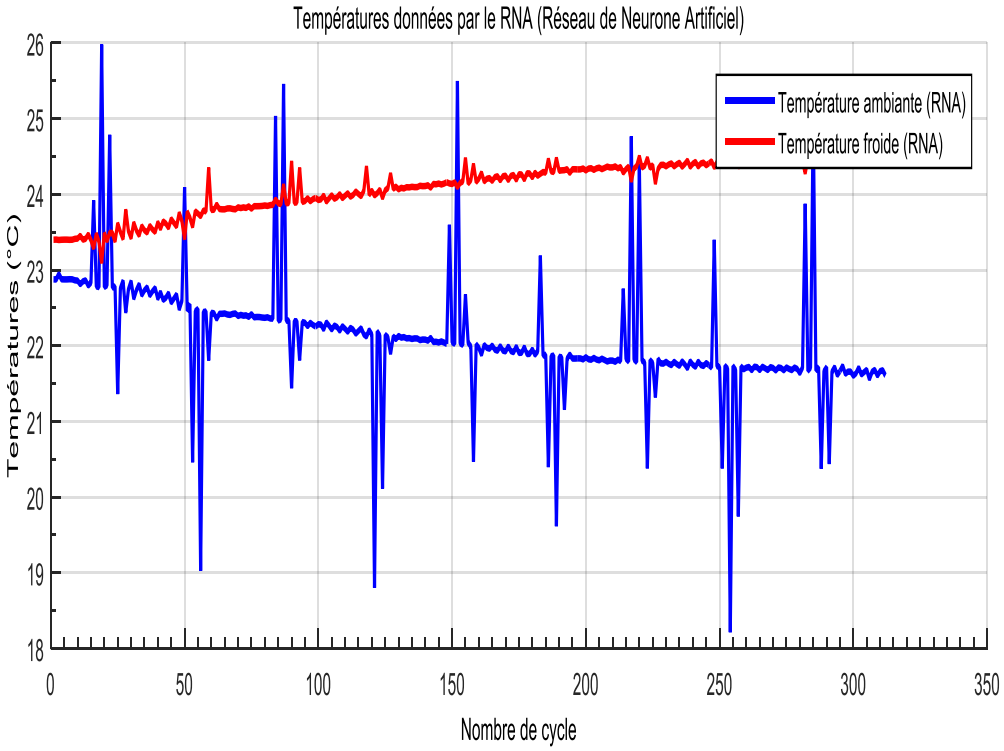


Figure. III.6: Profil des températures générées.

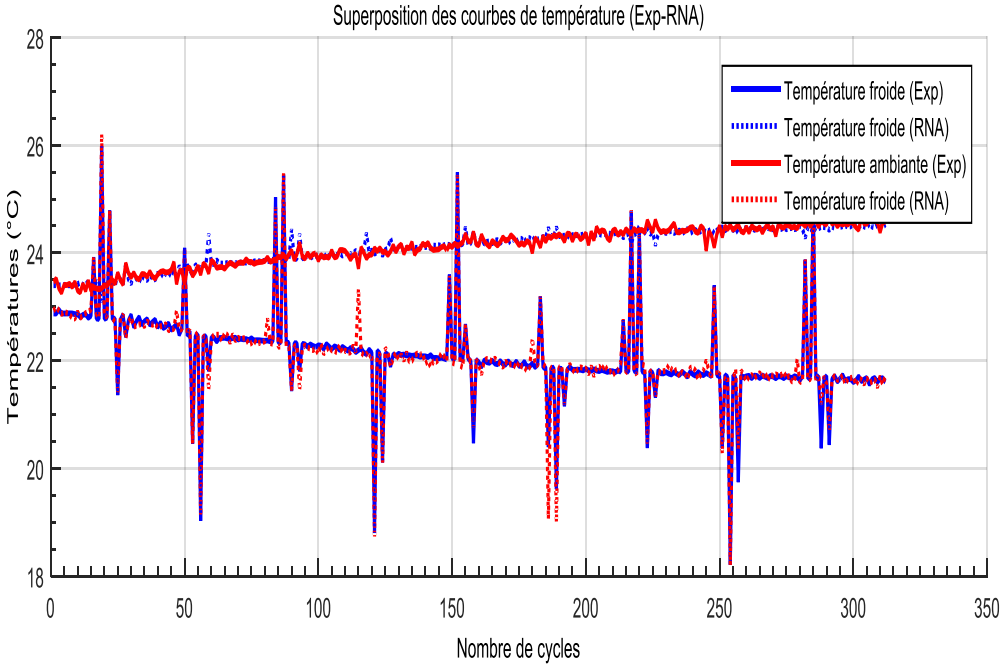


Figure. III.7: Superposition des températures.

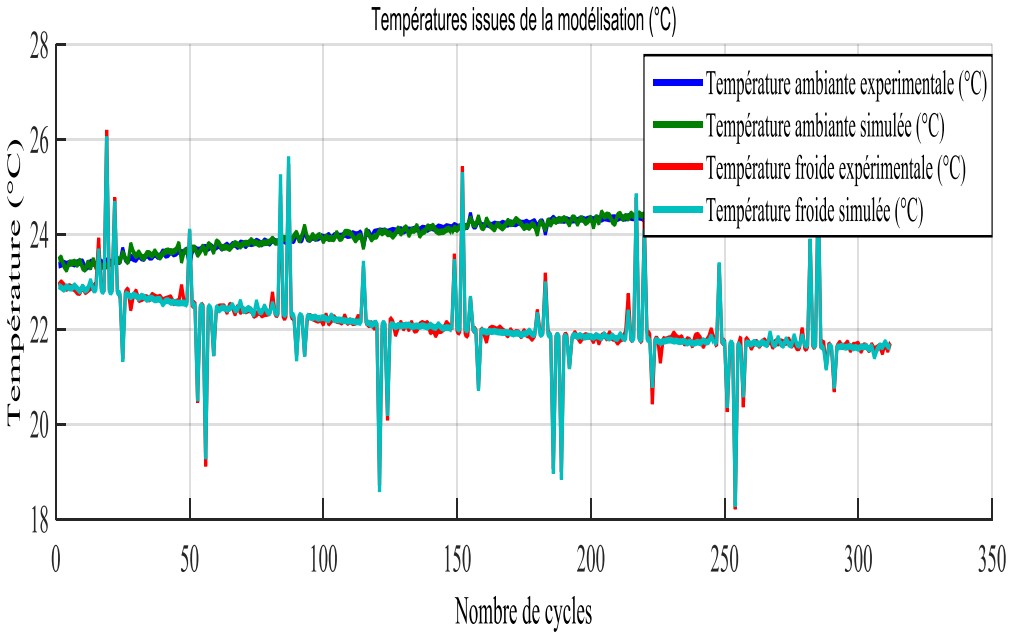


Figure. III.8: Profil des différentes températures issues de la modélisation.

III.4.5. Stratégie de détection d'Overfitting :

Le problème d'Overfitting est fréquemment mentionné dans la littérature des réseaux de neurones. Il est causé par la capacité du réseau de neurone, avec un certain nombre d'unités mémoires plus haut que nécessaires (on peut aussi parler de ''Over-parametrisation''), pour apprendre parfaitement les exemples des séquences d'apprentissage. Dans beaucoup de cas, ceci mène également à une capacité de généralisation très pauvre. Afin d'arrêter l'apprentissage avant que se passe le phénomène d'Overfitting.

Une façon d'éviter un surplus d'apprentissage est d'utiliser la **cross-validation**, Cette technique consiste à utiliser deux ensembles indépendants de données pour entraîner notre réseau : un pour l'apprentissage (l'ajustement des poids) et l'autre pour la validation.

Les paramètres du réseau de neurone sont estimés dans l'ensemble de l'apprentissage et la performance du modèle est testée dans l'ensemble de la validation. L'ensemble de validation est utilisé pour vérifier la stabilité des résultats obtenus sur l'ensemble d'apprentissage et l'absence de phénomène de sur-apprentissage (*overfitting*). Les résultats de validation peuvent alors être utilisés pour déterminer les paramètres de la méthode d'apprentissage.

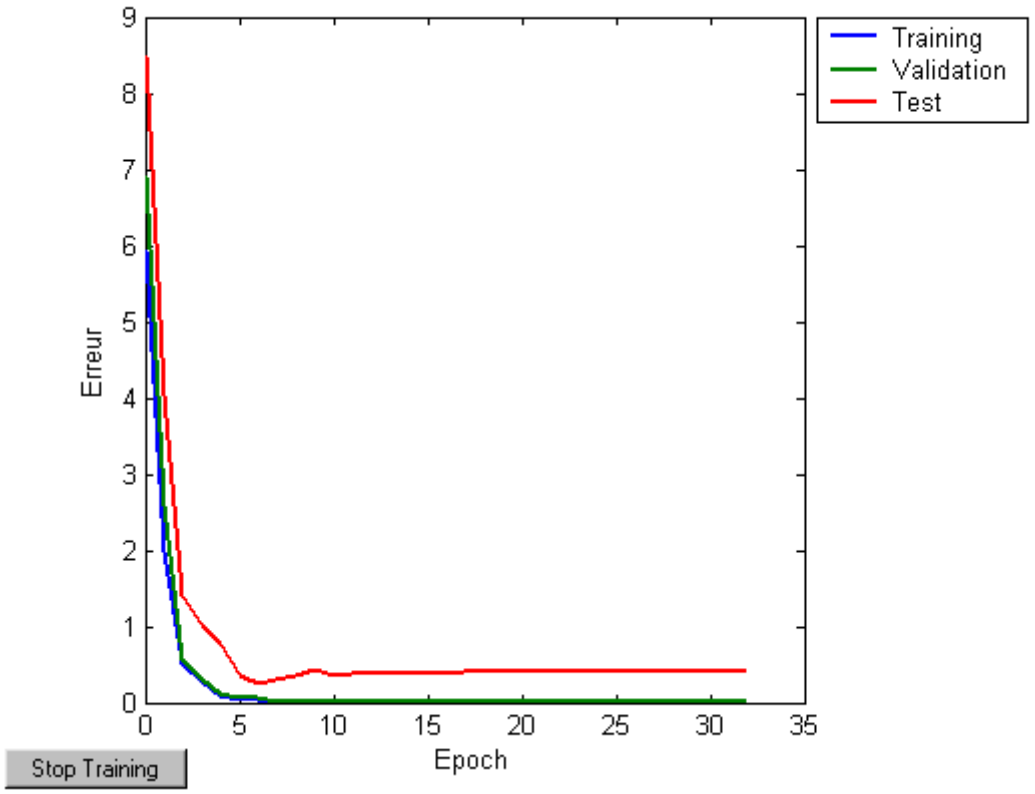


Figure III.9 : Courbe d'erreur de l'apprentissage, de la validation et du test.

Afin de tester la validation de notre réseau de neurone, nous avons divisé l'ensemble des données en trois sous ensembles. Nous avons pris le quart (25%) des données pour le teste de validation, un quart (25%) pour le test et un sous ensemble de un demi (50%) des données pour l'apprentissage. Nous sélectionnons les données pour chaque ensemble également espacées de l'ensemble des données d'origine. Après réalisation du réseau de neurone et son apprentissage. L'apprentissage est arrêté après 32 itérations, comme le montre la figure III.qui est un outil de diagnostique utile pour vérifier la validité du réseau de neurone et du processus d'apprentissage.

La figure. III.9, montre la courbe d'erreur de l'apprentissage, de la validation et du teste, les résultats qui en découlent sont raisonnable, puisque l'erreur de test et l'erreur de validation ont une caractéristique similaire, car ils ne montrent pas qu'un overfitting significatif s'est produit.

III.5. Conclusions :

Ce chapitre est consacré à mettre en exergue la modélisation du système magnétocalorique et en particulier la modélisation et la simulation d'une EMC, nous nous sommes essentiellement basé sur les travaux existant et publiés dans la littérature libre, pour décrire un modèle particulier de système magnétocalorique.

Ensuite une liste exhaustive des modèles que nous avons trouvé nécessaire de citer pour mettre en évidence l'aspect de la modélisation en même temps que l'aspect précurseur d'un tel système énergétique, en terminant avec une illustration par un exemple de modélisation d'un système magnétocalorique par réseau de neurone, exemple qui nous a été utile pour la suite de notre étude. Enfin une description succincte de l'outil de la modélisation et de la simulation utilisé ici est faite en guise de gratitude pour ce logiciel de simulation puissant qui permet la simulation, la modélisation et le développement des lois pour être implémentées ensuite sur des supports technologiques fiables. Les résultats de simulation de systèmes magnétocaloriques par les réseaux de neurones, sont satisfaisants. Les tests de validation du réseau de neurone sont réalisés et permettent de prendre en considération cet outil de modélisation de processus non paramétrique très performant.

A travers ce chapitre on comprend aussi aisément que tous reste à faire et à parfaire dans les systèmes magnétocaloriques, et que ces dernières sont vraiment prometteuse, vue que leur intérêt gagne une large et importante population de chercheurs tout azimut. La réfrigération magnétique est très prometteuse. Il n'est pas encore prêt pour le marché, mais c'est une technologie à surveiller au cours des cinq à dix prochaines années. Son potentiel de réduction de la consommation d'énergie et de fonctionnement sans réfrigérants nocifs pour l'environnement en fait une proposition passionnante.

Conclusion générale

Conclusion générale

En Conclusion, l'hydrogène a des avantages certains : il est abondant, permet de remplacer avantageusement certains usages des énergies fossiles, il peut être complémentaire à la transition vers des sources de production d'électricité renouvelable. Mais l'hydrogène n'est pas une solution miracle du point de vue écologique. Il génère des pollutions, et son faible rendement le rend peu avantageux pour les usages où l'électricité peut déjà remplacer les énergies fossiles.

Si l'hydrogène est perçu et utilisé comme un moyen de perpétuer un modèle de société non-soutenable, fondé sur une croissance infinie des consommations et des productions, il produira des destructions écologiques majeures. Il ne sera alors pas un outil de la transition écologique, mais un palliatif limité, ne faisant que déplacer nos impacts environnementaux. Mettre un modèle économique écocide sous perfusion d'hydrogène ne le rendra pas durable pour autant.

Si en revanche, l'hydrogène est conçu comme un outil complémentaire à la transition vers un nouveau modèle de société, fondé sur la sobriété, alors il peut avoir un rôle majeur pour se substituer aux énergies fossiles là où les solutions n'existent pas encore. Mais il doit alors être encadré, régulé.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Banque mondiale et Secrétariat général de l'Onu.

[2] AIE –World energy outlook 2014.

[3] H. Derbal and al. « Etude d'un système de production d'hydrogène par voie solaire, application sur l'électrolyseur de la vapeur d'eau à très hautes températures » Revue des Energies renouvelables vol.8 (2005) 137-156.

[4] Jonathan Bouchard, « Etude numérique de l'influence de la magnétisation sur l'effet magnétocalorique du gadolinium pur » mémoire de maitrise en physique, Université du QUEBEC à Trois Rivières, Avril 2005.

[5] La production d'électricité d'origine renouvelable : détails par région et par pays, Quinzième inventaire –Edition 2013, Fondation énergies pour le monde.

[6] Ahmed Djafour, « Etude d'un système de production d'hydrogène solaire » thèse de doctorat en physique énergétique, Université Kasdi Merbah- Ouargla, Mars 2013.

[7] Fatiha Sebaa-Ben Miloud et R. Aissaoui, « Etude du potentiel éolien d'Adrar Sélection de sites pour la ferme éolienne de 10 MW » CREDEG, Sonelgaz, Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 295 – 300 295.

[8] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Cea 2013.

[9] Noureddine Hajjaji, Analyse de cycle de vie exergétique de systèmes de production d'hydrogène, thèse de doctorat, école d'ingénieurs de Gabès- Tunisie, 14 Janvier 2011.

[10] R. Kothari et al. "Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods" Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, issue 2, February 2008, pages 553- 563.

[11] A. Midili et al. " On hydrogen and hydrogen energy strategies :I : Current status and needs" Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 9, Issue 3, June 2005, Pages 255- 271.

[12] S. Manish et al. "Comparison of bio hydrogen production processes" International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, Issue 1, January 2008, Pages 279-286.

[13] Mike Hulme, Martin Mahony, "Climate change: What do we know about the IPCC?" Progress in physical Geography: Earth and Environment, June 18, 2010.doi:10.1177/0309133310373719.

[14] Adam P. Simpson, Andrew E .Lutz, "Exergy analysis of hydrogen production via steam methane reforming" International Journal of Hydrogen Energy, Volume 32, Issue 18, December 2007, Pages 4811-4820.

[15] L. Barelli et al. "Hydrogen production through sorption- enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review" Energy, Volume 33, Issue 4, April 2008, pages 554-570.

[16] Robert. J. Farrauto and al. "Fundamentals of industrial catalytic processes, second edition, October 2005, doi: 10.1002/9780471730071.

[17] Souhila. Boumaza, « Elaboration des systèmes à base de cuivre, application en réaction de conversion du gaz à l'eau et en photo catalyse », thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene- Alger, 2012, pages 3-6.

[18] Meriem Banou, « Etude du procédé de production d'hydrogène par vaporeformage autotherme du bio-methanol » mémoire de magister, Université de Sétif, 2014.

[19] S. Chader et al. « Etude des procédés de production biologique de l'hydrogène », Revue des énergies renouvelables, Volume 10, n° 4, 2007 pages 497-505.

[20] C. Raimbault « L'hydrogène industriel : synthèse, purification » L'actualité chimique 1997, pages 17-23.

[21] K. Shashi et al "Hydrogen production by partial oxidation of methane: Modeling and simulation" International journal Hydrogen Energy, 2009, 34, pages. 6655-6668.

[22] Y.S. Seo et al."Evaluation of thermodynamically favourable operating condition for production of hydrogen in three different reforming technologies", journal of Power Sources, Volume 108, Issue1-2, June 2002, pages 213-225.

[23] F.B.Dega, « Etude des performances et de la désactivation par empoisonnement au soufre du catalyseur spinelle Ni-UGSO : cas de reformage autothermique du méthane », thèse de doctorat, Université de SHERBROOKE-Québec-Canada.

[24] R.T.K.B. C. Park: "Carbon deposition on Iron-Nickel during interaction with ethylene hydrogen mixtures." Journal Catalysis, Volume179, 1998, Pages. 361-374.

[25] X.Z. Jing Gao, Zhaoyin Hou, Hui Lou: "Chapter 7 - Dry (CO2) Reforming." Technol. Fuel Process. Elsevier.2011, Pages. 191-221.

[26] G.R. Kale et al. "Process thermoneutral point in dry autothermal reforming for CO2 utilization." J. CO2 Util. Volume. 18, 2017, Pages 318-325.

[27] M. Chamoumi al. "Dry reforming of methane with a new catalyst derived from a negative value mining residue spinellized with nickel." Catal. Today. Volume 291, 2017, Pages 86-98.

[28] Y.J.O. Asencios et al. "Partial oxidation of methane on NiO–MgO–ZrO2 catalysts." Fuel. Volume. 97, 2012, Pages 630-637.

[29] H. Dong et al.: "Investigation on POM reaction in a new perovskite membrane reactor." Catal. Today, Volume. 67, n°1-3, 2001, Pages 3-13.

[30] L. Chibane, B. Djellouli." Role of periodic input composition and sweeping gas for improvement of hydrogen production in a palladium membrane reactor by partial oxidation of methane" Chinese journal of Chemical Engineering – Elsevier, Volume 20, Issue 3, June 2012, Pages 577-588.

[31] N. Boudet et al. « Gazéification du charbon », ID : 100329102, Chemistry, 2009.

[32] K Halouani. « Production d'hydrogène par gazéification du bois et du charbon du bois », Bulletin des énergies renouvelables, n°08, décembre 2005.

[33] S. Hilaire et al. « A comparative study of water gas shift reaction over ceria supported metallic catalysts », Journal Applied catalysis A: General, Volume 258, Issue 2, 2004, Pages 271-276.

[34] F. Nozahic, "Production de gaz de synthèse par interactions à haute température du gaz, des goudrons et du résidu carboné issus de la pyrolyse de biomasses", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse- France, Janvier 2008.

[35] S. Das et al. « An overview of the synthesis of CuO-ZnO nanocomposite for environment and other applications », Journal nanotechnology reviews, Volume 7, Issue 3, April 2008, Pages 267-282.

[36] Jean Benoit Denis « Etude de l'influence d'éléments d'addition sur les propriétés de stockage de l'hydrogène dans le système Ti-V-Fe ». Thèse de doctorat, Université Paris – EST, 2016.

[37] W.B.Leung, N.H.March, H. Motz « Primitive phase diagram for hydrogen », Physics letters A, Volume 56, issue 6, 3 May 1976, Pages 425-426.

[38] McPhy Energy « l'avenir est dans l'hydrogène solide », Revue le Dauphiné du 25/01/2011.

[39] Benoit Charlas « Etude du comportement mécanique d'un hydrure métallique utilisé pour le stockage d'hydrogène » thèse de doctorat, Université de Grenoble, 07 Aout 2006.

[40] CEA, Les énergies renouvelables – L'hydrogène, 2014.

[41] Lefebvre-joud, F.Briottet, L.Gillia, O.Nony, Techniques de l'ingénieur « Matériaux de la filière hydrogène stockage et Transport », 10 Avril 2010.

[42] Boutelhig, A., Mellit, A., Hanini, S., Ground water sourcesassessment for sustainable supply through photovoltaic water pumping system, in M'zab valley, Ghardaia, *Energy Procedia*, vol.141, pp. 76-80. 2017.

[43] Sabat, M., Baczyński, D., Szafranek, K., The trials of providing the power and energy balancing of the studied area concerning the cooperation of the res, employing a different number of these sources, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol.93, no 9, pp. 11-15, 2017.

[44] Benhamza, T., Laidi, M., Hanini, S., Modeling of an Improved Liquid Desiccant Solar Cooling System by Artificial Neural Network, *Lecture Notes in Networks and Systems, 35*, pp. 337-348, 2018.

[45] Bartosik, M., Kamrat, W., Kaźmierkowski, M., Strupczewski, A., Szeląg, A., Storage of electrical energy and hydrogen economy, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol.92, no 12, pp. 332-340, 2016.

[46] Hatti, M., Operation and maintenance methods in solar power plants, Use, *Operation and Maintenance of Renewable Energy Systems*, pp. 61-93, 2014.

[47] Singh, B., Singh, S., GA-based optimization for integration of DGs, STATCOM and PHEVs in distribution systems, *Energy Reports*, 5, pp. 84-103, 2019.

[48] Saadi, A., Becherif, M., Ramadan, H.S., Hydrogen production horizon using solar energy in Biskra, Algeria, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.41, no47, , pp. 21899-21912, 2016.

[49] Hatti, M.; Meharrar, A.; and Tioursi, M. Novel approach of maximum power point tracking for photovoltaic module neural network based. *In Int. Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications.* pp. 1-6. 2010.

[50] Malinowski, M., Chmielowiec, J., Paściak, G., Świeboda, T.,Usability evaluation of PEM fuel cell and supercapacitors application in the emergency power backup system, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol.89, no 8, pp. 201-204, 2013.

[51] Amar Bensaber, A., Benghanem, M., Guerouad, A., Amar Bensaber, M., Power flow control and management of a hybrid power system, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 95, no1, pp.186-190, 2019.

[52] Wu, J., Xing, X., Liu, X., Guerrero, J.M., Chen, Z., Energy management strategy for grid-tied microgrids considering the energy storage efficiency, *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol.65,no12, pp. 9539-9549, 2018.

[53] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M.A., Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints, *Robotics and*

Computer-Integrated Manufacturing, vol. 59, pp. 143-157, 2019.

[54] Hatti, M.; Tioursi, M. and Nouibat, W. Neural Network Approach for Semi-Empirical Modelling of PEM Fuel-Cell. *In Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* vol.3, pp.1858-1863, 2006.

[55] Ganjehsarabi, H., Performance assessment of solar-powered high pressure proton exchange membrane electrolyzer: A case study for Erzincan, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(20), pp. 9701-9707, 2019.

[56] Chmielewski, A., Możaryn, J., Piórkowski, P., Bogdziński, K., Battery Voltage Estimation Using NARX Recurrent Neural Network Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 920, pp. 218-23, 2020.