



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

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département De Maintenance En Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière: Génie Industriel

Spécialité: Ingénierie de Maintenance en instrumentation

Thème

Etude des convertisseurs dans les applications de la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau

Présenté et soutenu publiquement par:

- Nom: *khane.* Prénom: *Mohamed.*
- Nom: *khouta.* Prénom: *abdallah.*

Devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mme.Guendouz djillalia	P R	Univ/Oran2 (IMSI)	Président
Mr. Belabbes Abdallah	M C B	Univ/Oran2 (IMSI)	Encadreur
Mr. Belkacem Belkacem	M C A	Univ/Oran2 (IMSI)	Examineur

Année 2021/2022

Remerciement

Tout d'abord, nous devons remercier Dieu pour nous avoir aidé et nous avoir permis de finir notre cursus et terminer notre mémoire, Nous le remercions aussi de nous avoir fait preuve de patience et de courage pendant toutes ces longues années.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur monsieur abdallah belabbes pour son appui considérable et pour les informations qu'il nous a fournies, pour la qualité de son encadrement et de sa gentillesse.

Nous remercions également les membres de jury madame guendouz djillalia et monsieur belkacem belkacem pour avoir accepté de juger et critiquer ce travail.

Nous ne devons pas oublier de remercier tous nos amis et collègues pour tous les moments de joie et de coopération, et ne pouvons pas oublier de remercier tous les membres de nos familles pour leurs soutiens et leurs encouragements, particulièrement nos parents.

Dédicaces

À ma très chère mère

Ma raison d'être, ma raison de vivre, la lantern qui éclair mon chemin.

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il le faut. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force.

À mon très cher père

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

À ma chers soeur

Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de tout mal.

mohamed.

Dédicaces

À ma très chère mère

Ma raison d'être, ma raison de vivre, la lanterne qui éclair mon chemin.

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il le faut. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force.

À mon très cher père

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse,

Je tiens à honorer l'homme que tu es.

À mes chères soeurs

Et la petit enfant moaad hali, Que Dieu le tout puissant vous préservez,
t'accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et te protège de
tout mal.

À mes amis

Achour jalol Srandi houssem Berdi alla edine Abdelhakim hacine Mohamed
Gulamine riyadh Ben tayeb zine edine Chawakhi moamed hadou Ismail aydet
Belmedioni djilali.

Abdallah.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Sommaire

Liste des tableaux

Listes des figures

Listes d'abréviations

Introduction général

Chapitre I : l'état de l'art.

Introduction	3
I.1. Techniques de production d'hydrogène.....	3
I.1. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau	5
I.1.1. Aspects thermodynamiques.....	5
I.1.1.1. Rendements	8
I.1.1.1.1. Rendement énergétique	8
I.1.1.1.2. Rendement Faradique.....	9
I.1.2. Les différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....	9
I.1.2.1. Electrolyse alcaline	9
I.1.2.2. Electrolyse à haute température	10
I.1.2.3. Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons	11
I.1.2. Comparaison des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau	15
I.1.3. L'électrolyse PEM de l'eau	16
I.1.3.1. Description générale.....	17
I.1.3.2. Rôles et propriétés des différents composants d'un électrolyseur PEM.....	18
I.1.3.2.1. Assemblage membrane électrodes (AME)	18
I.1.4. Conclusion.....	31

Chapitre II : Electronique de puissance.

Introduction	33
II.1. Convertisseurs AC-DC pour les applications d'électrolyseur	33
II.1.1. Redresseurs non commandés	35
II.1.1.1. Redresseur à pont de diodes à 12 impulsions	37
II.1.1.2. Redresseur double étoile à diodes à six impulsions	38
II.1.1.3. Redresseur double-étoile à diode à 12 impulsions à une voie avec transformateurs interphasé	39
II.1.2. Redresseurs commandés	40
II.1.2.1. Redresseur à pont à thyristor à six impulsions	40
II.1.2.2. Redresseur à pont de thyristors à 12 impulsions	42
II.1.2.3. Redresseur double étoile à thyristor à six impulsions	43
II.1.2.4. Redresseur double étoile à thyristor à 12 impulsions avec transformateurs interphasés.....	44
II.1.3. Convertisseurs AC-DC : Redresseur-Copper	45
II.1.3.1. Redresseur à pont de diodes à six impulsions avec un convertisseur Buck	46
II.1.3.2. Redresseur à pont de diodes à six ou douze impulsions avec un convertisseur Buck triphase	48
II.1.3.3. Redresseur à pont de diodes à six impulsions avec un convertisseur Buck entrelacé à deux phases	50
II.1.4. Discussion et défis futurs	51
Conclusion	58

Chapitre III : Simulation d'un redresseur en pont a 6 thyristor

III.1. Introduction	60
III.2. Différentes topologies d'alimentation	60
III.3. Simulation d'un pont de thyristors à 6 impulsions	61
III.3.1. Blocs de simulation	62
III.3.1.1. Source triphasé	62

III.3.1.2. Transformateur triphasé (abaisseur) à deux enroulements	62
III.3.1.3. Redresseur à base de thyristor	62
III.3.1.4. Régulateur PI	63
III.3.1.4.1 Synthèse d'un correcteur PI pour la commande du convertisseur à 6 Thyristors.....	63
III.3.1.5. Générateur de pulsion	65
III.3.1.6. filtre LC.....	65
III.3.2. Modèle de simulation sous MATLAB /SIMILUNK	65
III.4. Résultats de simulation	66
III.4.1. la tension simple primaire ($V_{SABC}=11\text{kv}$)	66
III.4.2. la tension simple secondaire ($V_{S abc}=400\text{v}$)	67
III.4.3. la tension complexe secondaire ($V_{Cabc}=400*\sqrt{3}$)	69
III.4.4. générateur des impulsions	71
III.4.5. Angle de commande	71
III.4.6. Tension et courant de sortie	72
III.5. Conclusion	73
Conclusion général.....	74
Bibliographie.....	75

Liste des tables

Tableau I.1: Liste des principaux fabricants d'électrolyseurs PEM.....	14
Tableau I. 2: Comparatif des technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....	16
Tableau II.1: Etat de l'art des électrolyseurs alcalins et PEM.....	34
Tableau II.2. Résumé de l'électronique de puissance en fonction de la gamme de puissance.....	57

Liste des figures

Figure I.1 : (a) Sources d'énergies utilisées actuellement pour la production d'hydrogène [2]	4
(b) Emissions de dioxyde de carbone par kilogramme de dihydrogène produit [3].....	4
Figure I.2 : Schéma des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.....	5
Figure I. 3 : (a) Evolution des grandeurs Δ_rG , Δ_rH , $T\Delta_rS$,	7
(b) de la tension thermodynamique E° et de la tension enthalpique V avec la température [5].....	7
Figure I.4: Courbe de polarisation typique d'un électrolyseur PEM testé au laboratoire; (2,7 mg $\text{cm}^{-2}\text{IrO}_2$ –0,3mg cm^{-2}Pt);	12
Figure I. 5 : Exemple de temps de réponse d'un électrolyseur PEM à une brusque variation du profil de charge ;graphique tiré de [12].....	13
Figure I. 6 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse PEM.....	17
Figure I. 7: Activité pour le dégagement d'hydrogène en fonction de la force de liaison métal-hydrogène pour différents métaux, selon [16].....	20
Figure I.8: Complexe de cobalt $[\text{Co}(\text{dmg})_3(\text{BF})_2]\text{BF}_4$	21
Figure I. 9 : Surtension à 0,1 mA cm^{-2} sur différents oxydes métalliques en fonction de l'enthalpie.....	22
Figure I. 10: Courbes de polarisation tirées de, [17]. Chargement en oxyde d'iridium de 0,3 mg cm^{-2} , membrane Nafion 112, 80 °C.....	26
Figure I. 11: Stack formé par un empilement de douze cellules montées en série.....	30
Figure II.1 : Pont redresseur à diodes à six impulsions.....	36
Figure II. 2 : Pont redresseur à diodes à 12 impulsions.....	38
Figure II.3 : Redresseur double étoile à diodes à six impulsions.....	39
Figure II.4 : Redresseur double étoile à diodes à 12 impulsions à une voie avec transformateurs interphases d'interface.....	40
Figure II.5 : Pont redresseur à thyristors à six impulsions.....	41

Figure II.6 : Pont redresseur à thyristors à 12 impulsions.....	43
Figure II.7 : Redresseur double étoile à thyristor à six impulsions.....	44
Figure II.8 : Redresseur double étoile à thyristor à 12 impulsions avec transformateurs Interphasés d'interface.....	45
Figure II.9 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck.....	46
Figure II.10 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck triphasé entrelacé....	48
Figure II.11. Pont redresseur à diodes à 12 impulsions avec un convertisseur hacheur triphasé.....	49
Figure II.12 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck entrelacé à deux phases.....	51
Figure II.13. Comparaison de la tension continue de sortie en fonction de l'angle d'allumage. Diodes) et entièrement commandés (thyristors).....	52
Figure II.14. Voie de production d'hydrogène basée sur un système de conversion de l'énergie éolienne et un convertisseur hacheur DC-DC à trois niveaux entrelacés.....	54
Figure II.15 : Electrolyseur à étages multiples basé sur une configuration en série.....	55
Figure II.16. Electrolyseur à étages multiples basé sur une configuration parallèle.....	55
Figure II.17. Redresseurs PWM à source de courant pour les applications d'électrolyseurs.....	56
Figure III.1. Pont a thyristor à 6 impulsions.....	60
Figure III.2. Pont à thyristor a 12 impulsions.....	61
Figure III.3. Simulation d'un Pont a thyristor à 6 impulsions.....	63
Figure III.4. sortie de modèle mesurée et simulée.....	64
Figure III.5. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps(VA1).....	66
Figure III.6. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps(VB1).....	67
Figure III.7. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps(VC1).....	67
Figure III.8. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps(VA2).....	68
Figure III.9. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps(VB2).....	68
Figure III.10. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps(VC2).....	69
Figure III.11. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps(Uab).....	69
Figure III.12. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps(Ubc).....	70

Figure III.13. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps(U_{ca}).....	70
Figure III.14. Les impulsions de commande.....	71
Figure III.15. angle de commande.....	72
Figure III.16. tension de sortie.....	72
Figure III.17. courant de sortie.....	73

AME Assemblage Membrane Electrode
 CCB Catalyst Coating Backing
 CCM Catalyst Coating Membrane
 CPE Constant Phase Element
 CV Cyclic Voltametry
 CVD Chemical Vapor Deposition
 DOE Department of Energy
 DRX Diffraction des Rayons X
 DSA Dimensionnally Stable Anode
 ENH Electrode Normale à Hydrogène
 EnR Energies renouvelables
 ERH Electrode Réversible à Hydrogène
 GDE Gaz Diffusion Electrode
 GDL Gaz diffusion Layer
 HUPD Hydrogen Under Potential Deposition
 MEB Microscopie Electronique à Balayage
 P atm Pression atmosphérique
 PEM Proton Exchange Membrane
 RDH Réaction de dégagement de l'hydrogène
 RDO Réaction de Dégagement de l'Oxygène
 SIE Spectroscopie d'Impédance Electrochimiqu

AC alternative Currente
 DC Direct Current
 c.c convertisseur continue
 IGBT Insulated-Gate Bipolar Transistor
 RMS Root Mean Square
 STATCOMs compensateurs statiques
 DSTATCOMs compensateurs statiques de distribution
 THD distorsion harmonique totale
 MOSFET Metal-Oxide-Semi conductor Field –Effect Transistor
 PMSG Permanent Maganet Synchronous Generator
 PWM three-phase pulse width modulation
 CSR Current Source Rectifiers
 GTO Gate Turn-Off thyristor

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, la consommation mondiale d'énergie a augmenté progressivement en raison de la croissance de la population et du niveau de vie. De plus, avec l'augmentation du réchauffement climatique et de la pollution de l'environnement, le développement des sources d'énergie renouvelables devenait de plus en plus essentiel. L'hydrogène est l'un des vecteurs énergétiques propres et durables les plus prometteurs et n'émet que de l'eau en tant que sous-produit sans aucune émission de carbone. L'hydrogène a de nombreuses propriétés attrayantes en tant que vecteur énergétique et une densité énergétique élevée (140 MJ / kg) qui est plus de deux fois supérieure à celle des combustibles solides typiques (50 MJ / kg). Actuellement, la production mondiale totale d'hydrogène est d'environ 500 milliards de mètres cubes (b m^3) par an. L'hydrogène produit est principalement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, telles que les engrais, les procédés de raffinage du pétrole, la pétrochimie, les piles à combustible et les industries chimiques.

Dans le premier chapitre on va un état de l'art des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, Electrolyse alcaline, Electrolyse à haute température, et Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons PEM et sur le développement et l'optimisation des matériaux utilisés dans les couches actives des électrodes des électrolyseurs où ont lieu les réactions électrochimiques.

Dans le deuxième chapitre on va faire une études sur les Convertisseurs AC-DC pour les applications d'électrolyseur et les redresseurs a diodes (non commandés) et les redresseurs a thyristors (commandés) , ce chapitre présente chaque convertisseurs AC-DC est comparé du point de vue de la qualité de l'alimentation, de l'efficacité énergétique, de l'ondulation du courant, du cout, du contrôle et de la fiabilité.

Dans le troisième chapitre nous avons faire une simulation d'un redresseur en pont a 6 impulsions sur environnement MATLAB/ simulink et la présentation des résultats et leurs analyses et interprétations.

Chapitre I

L'état de l'art

Introduction

Face aux doubles contraintes économiques et environnementales liées à la croissance des demandes en énergie, à l'épuisement des ressources de carburants fossiles et aux changements climatiques, il est nécessaire de développer de nouvelles sources d'énergies durables ayant moins d'impact sur l'environnement. Le cycle utilisant l'hydrogène comme vecteur énergétique de substitution est une alternative attractive qui suscite de nombreuses études de recherche et développement.

La quasi-totalité de l'hydrogène est actuellement obtenue par reformage ou gazéification d'hydrocarbures. A long terme, l'électrolyse de l'eau doit devenir la plus importante technologie de production d'hydrogène puisque c'est un mode de production propre (pas d'émission carbone lorsqu'elle est couplée à une source d'énergie renouvelable) qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée. Cependant, le développement de l'électrolyse PEM de l'eau est encore limité par le prix de ses composants.

I.1. Techniques de production d'hydrogène

A ce jour, l'hydrogène est principalement obtenu (96 % de la production mondiale (**Figure I.1.a**)) ; par reformage de gaz naturels ou d'hydrocarbures tels que le propane, l'essence, le gazole, le méthanol ou l'éthanol [1]. L'hydrogène produit de cette manière comporte un fort pourcentage d'impuretés gazeuses (CO, CO₂, composés soufres...) et nécessite obligatoirement une étape de purification gazeuse. Mais surtout, utiliser les énergies fossiles pour produire de l'hydrogène, ne résout en rien les problèmes environnementaux liés à l'utilisation de ces énergies polluantes et non renouvelables. La qualification de l'hydrogène comme vecteur d'énergie propre dépend de la source d'énergie utilisée pour sa production (**Figure I.1.b**).

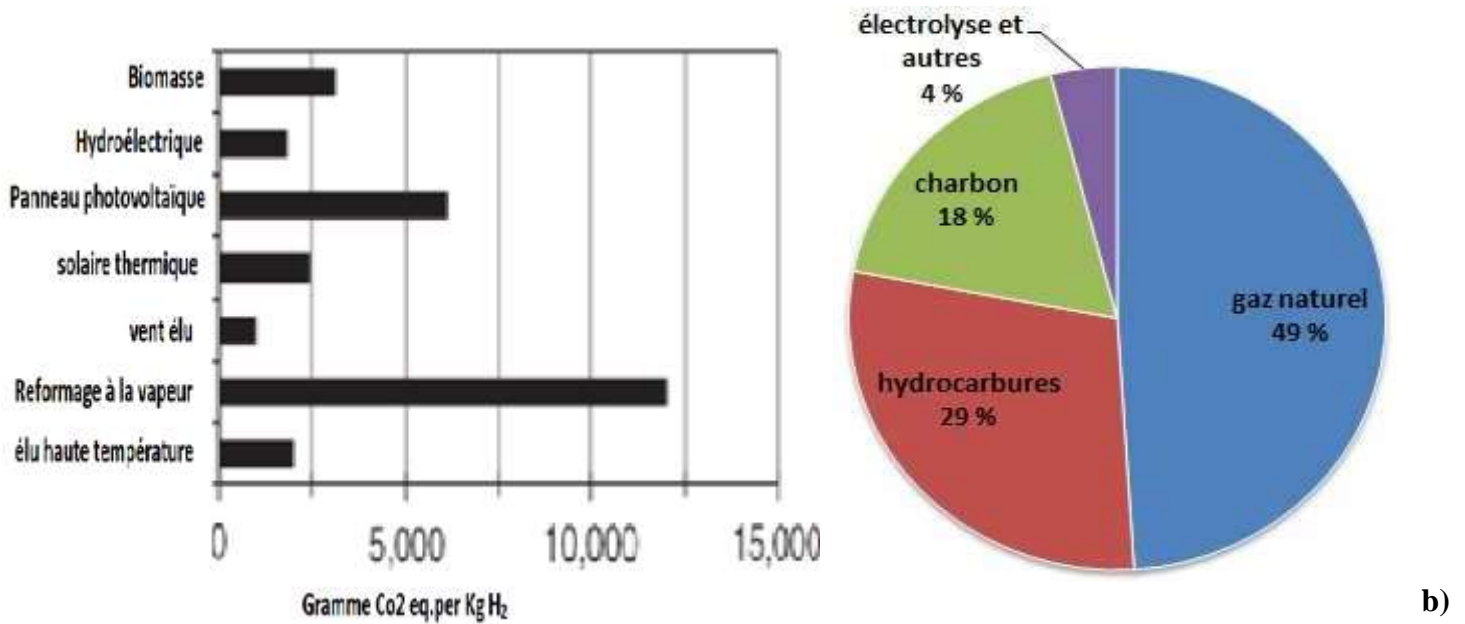


Figure I.1 : (a) Sources d'énergies utilisées actuellement pour la production d'hydrogène [2]

(k) Emissions de dioxyde de carbone par kilogramme de dihydrogène produit [3].

L'électrolyse de l'eau, même si elle ne représente aujourd'hui que quelques pourcents de la totalité de l'hydrogène produit, est néanmoins du plus haut intérêt car elle est un mode de production propre (pas d'émission carbone lorsqu'elle est couplée à une source d'énergie renouvelable) qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée. Lors des dernières décennies, le prix de l'électricité a limité l'utilisation de cette technique [4] ; cependant, avec l'émergence de l'exploitation des sources d'énergies renouvelables au caractère intermittent, l'électrolyse de l'eau, au vu de sa très bonne réactivité vis-à-vis des changements de régime, pourrait devenir le moyen de production d'hydrogène privilégié.

I.1.1. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

La décomposition de l'eau par électrolyse se produit selon la réaction suivante :



Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode) reliées à un générateur de courant continu, et séparées par un électrolyte (milieu conducteur ionique). Cet électrolyte peut être soit une solution aqueuse acide ou basique, soit une membrane polymère échangeuse de protons, soit une membrane céramique conductrice d'ions. Suivant le cas, les demi-équations électrochimiques qui se déroulent à chaque électrode sont différentes comme le présente la **Figure I.2**. Chaque procédé a ses avantages et inconvénients et peut être utilisé en fonction des applications désirées.

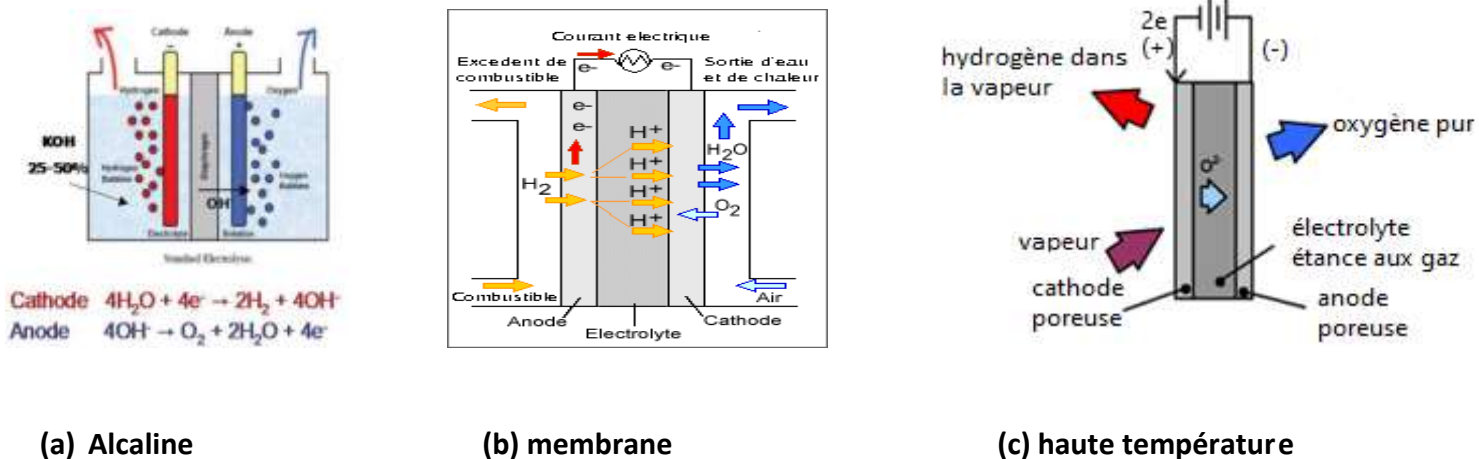


Figure I.2 : Schéma des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

I.1.1.1. Aspects thermodynamiques

La quantité minimale d'énergie électrique à fournir à la cellule pour dissocier une mole d'eau est égale à la variation d'enthalpie libre ($\Delta_r G$, variation d'énergie libre de Gibbs) associée à la réaction de dissociation (I.1) :

$$\Delta_r G - nFE = 0 \text{ où } \Delta_r G > 0 \quad I.2$$

Avec :

- n : nombre d'électrons échangés dans le processus électrochimique
- F : constante de Faraday (96485 C mol^{-1})
- E : tension thermodynamique minimale à appliquer à la cellule
- $\Delta_r G$: variation d'enthalpie libre associée à la réaction de dissociation (I.1)

La variation d'enthalpie libre $\Delta_r G$ est fonction de la température T et de la pression totale P du système :

$$\Delta_r G(T, P) = \Delta(T, P) - T\Delta_r S(T, P) > 0 \quad \text{I.3}$$

$\Delta(T, P)$ et $\Delta_r S(T, P)$ désignent respectivement les variations d'enthalpie et d'entropie associées à la réaction de dissociation (I.1) Celle-ci requiert donc de la part du milieu extérieur (le générateur électrique) une énergie électrique $\Delta_r G$ (en J mol^{-1}) et une quantité de chaleur $T\Delta_r S(T, P)$ (en J mol^{-1}).

La tension thermodynamique d'électrolyse E s'exprime alors :

$$E(T, P) = \frac{\Delta_r G(T, P)}{nF} \quad \text{I.4}$$

La tension enthalpique ou thermo neutre V de décomposition de l'eau correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle est définie par :

$$V(T, P) = (\Delta_r H^0(T, P))/nF \quad \text{I.5}$$

Thermodynamiquement, dans la condition standard de température et de pression

($T^0 = 298^0 \text{ K}$ et $P^0 = 101,3 \text{ kPa}$), l'eau est liquide, H_2 et O_2 sont gazeux :

$$\Delta_r G^0(\text{H}_2\text{O}) = 237,22 \text{ kJ mol}^{-1} \Rightarrow E^0 = \frac{\Delta_r G^0(\text{H}_2\text{O})}{2F} = 1,2293 \text{ V} \approx 1,23 \text{ V} \quad \text{I.6}$$

$$\Delta_r H^0(\text{H}_2\text{O}) = 285,840 \text{ kJ mol}^{-1} \Rightarrow V^0 = \frac{\Delta_r H^0(\text{H}_2\text{O})}{2F} = 1,4813 \text{ V} \approx 1,48 \text{ V} \quad \text{I.7}$$

$$\Delta_r S^0(\text{H}_2\text{O}) = 163,15 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1} \quad \text{I.8}$$

Une tension supplémentaire de $\frac{T\Delta S^0}{2F} = 0.25\text{V}$ est donc nécessaire pour fournir la chaleur

Requise pour le fonctionnement de la réaction. Pour $E^0 < U_{cellule} < V$, un apport extérieur de chaleur est nécessaire alors que pour $U_{cellule} > V$, la chaleur est produite par la réaction.

Les évolutions des grandeurs $\Delta_r G$, $\Delta_r H$, $T\Delta_r S$, E , V avec la température sont montrées sur la **Figure 3**.

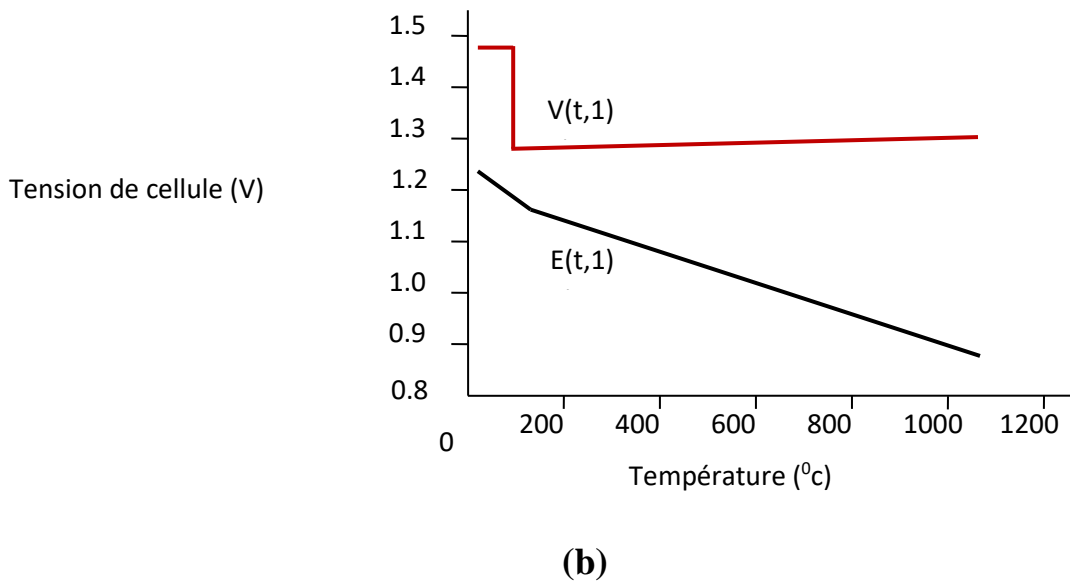
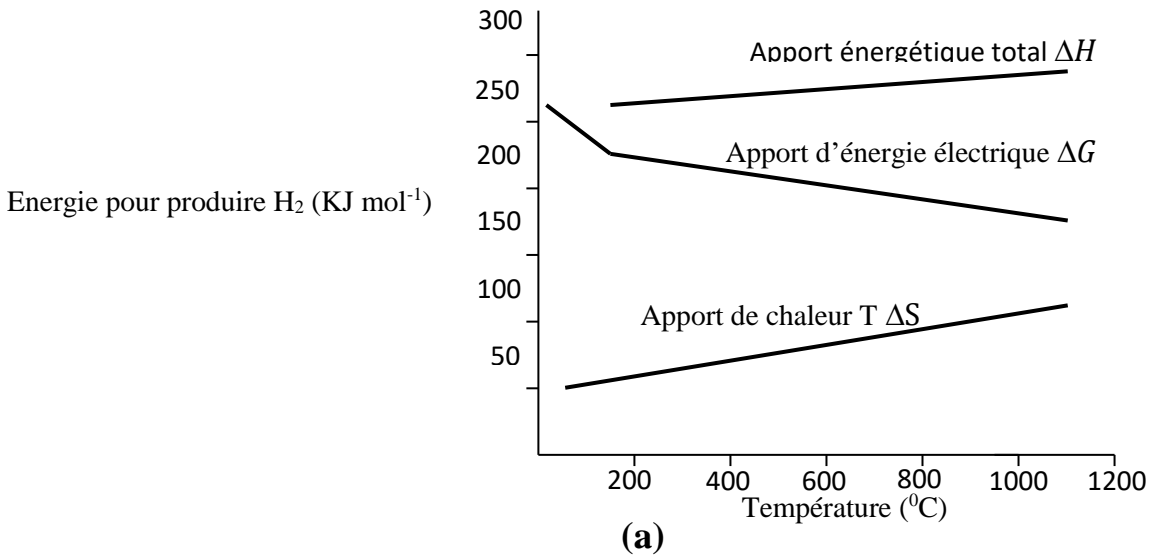


Figure I. 3 : (a) Evolution des grandeurs $\Delta_r G$, $\Delta_r H$, $T\Delta_r S$,
 (b) la tension thermodynamique E° et de la tension enthalpique V avec la température [5].

Une augmentation de la température favorise la réaction de dissociation de l'eau en diminuant la tension d'électrolyse (**Figure I 3**). La discontinuité à 100 °C est due à la vaporisation de l'eau. Au-delà de 100 °C, la variation d'entropie de la réaction de dissociation de l'eau (**équation I.1**) est réduite et la pente $T\Delta_r S$ est moins importante que pour l'eau liquide.

A température ambiante, 15 % de l'énergie nécessaire à l'électrolyse de l'eau provient de la chaleur et 85 % de l'électricité. A 1000 °C, un tiers provient de la chaleur et deux tiers de l'électricité. C'est pourquoi l'électrolyse de l'eau à haute température est intéressante quand un tel apport de chaleur est disponible [6].

I.1.1.1.1. Rendements

le rendement est le rapport entre ce que produit quelque chose et ce qu'elle consomme ou représente.

I.1.1.1.1.1. Rendement énergétique

Le rendement énergétique \mathcal{E} est défini comme le rapport entre la quantité d'énergie théorique W_t et la quantité d'énergie réelle nécessaire W_r :

$$\mathcal{E} = \frac{W_t}{W_r} \quad \text{I.9}$$

Avec

$$W_r = U_{cell} \times I \times t \quad \text{I.10}$$

Où I est le courant (A) et t le temps (s).

W_t peut être défini à partir de la tension thermodynamique d'électrolyse E^0 ou de la tension enthalpique (thermo-neutre) V :

$$W_t = E^0 \times I \times t \quad \text{I.11}$$

$$W_t = V \times I \times t \quad \text{I.12}$$

Le rendement de la réaction d'électrolyse peut se définir de deux façons différentes :

$$\text{Rendement énergétique : } \mathcal{E}_{\Delta G}(T,P,i) = E^0(T,P) / U_{cell}(T,P,i) \quad \text{I.13}$$

$$\text{Rendement enthalpique : } \mathcal{E}_{\Delta G}(T,P,i) = V(T,P) / U_{cell}(T,P,i) \quad \text{I.14}$$

D'où :

$$\mathcal{E}_{\Delta G} = \mathcal{E}_{\Delta H} - T\Delta S / nFU_{cell} \quad \text{I.15}$$

I.1.1.1.2. Rendement Faradique

Le rendement faradique (ϵ_F) exprime l'efficacité coulombique des processus aux interfaces. Il dépend de la densité de courant j et s'exprime sous la forme :

$$\epsilon_F = 2F \cdot F_{H_2} / j$$

Où F_{H_2} est le flux d'hydrogène produit par l'électrolyseur (en mol s⁻¹).

Le rendement faradique est en général proche de 1. Cependant, en électrolyse de l'eau, l'étanchéité des séparateurs aux gaz (H₂ et O₂) n'est pas totale : H₂ peut diffuser vers l'anode et O₂ vers la cathode pour se recombiner et redonner de l'eau.

I.1.1.2. Les différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

I.1.1.2.1. Electrolyse alcaline

Depuis sa découverte en 1789 [7], l'électrolyse alcaline est devenue un procédé mature employé massivement par l'industrie. Les électrodes sont plongées dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25 % en masse à 80 °C jusqu'à 40 % à 160 °C) ; les deux électrodes sont séparées par un diaphragme qui a pour fonction de séparer les gaz produits (**Figure 2**). Ce diaphragme n'étant pas complètement imperméable aux gaz, le mélange gazeux peut conduire à des conditions potentiellement dangereuses d'inflammabilité ou d'explosivité. Du fait de la chute ohmique à travers le diaphragme et l'électrolyte liquide, les densités de courant applicables sont limitées, de l'ordre de 0,2-0,4 A cm⁻². De plus, à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide, cette technique peut difficilement être couplée à une source d'énergie intermittente (problèmes liés à la gestion thermique et à la modification de la conductivité de l'électrolyte lors de la mise en régime dans les périodes d'arrêt/démarrage et de variation de charge). L'électrolyte liquide limite aussi les pressions d'opération applicables (classiquement entre 30 et 50 bars).

L'électrolyse alcaline est principalement développée au Canada et en Norvège par Hydrogenics et NEL Hydrogen en couplage avec l'énergie électrique d'origine nucléaire, récupérée pendant les heures creuses, pour la production d'ammoniaque. Le coût de

l'hydrogène produit varie fortement en fonction du prix de l'électricité ; il est de l'ordre de 630DA kg⁻¹ H₂ pour un prix de l'électricité de 8400DA MWh⁻¹.

I.1.1.2.2. Electrolyse à haute température

Contrairement aux technologies d'électrolyse à basse température pour lesquelles le coût de production de l'hydrogène est constitué à 80 % par le coût d'approvisionnement en électricité, la technologie d'Electrolyse de la Vapeur d'Eau à Haute Température (EVHT) est Basée sur l'apport d'une partie de l'énergie nécessaire à la décomposition de la molécule d'eau sous forme thermique, la chaleur étant a minima trois fois moins chère que l'électricité surtout lorsqu'elle provient des réacteurs nucléaires. Au-delà de 600 °C, il existe des céramiques conductrices anioniques qui permettent de transporter les charges O₂₋ de la cathode vers l'anode ; contrairement aux autres techniques d'électrolyse, ce sont les ions O₂₋ qui traversent l'électrolyte pour se recombinaison sous forme d'oxygène à l'anode. A la cathode, le gaz s'enrichit progressivement d'hydrogène pour délivrer un mélange de vapeur d'eau et d'hydrogène. Il est alors nécessaire de séparer l'hydrogène et l'eau par condensation et faire ré-circuler l'eau liquide qui doit de nouveau être vaporisée. L'assemblage des cellules d'électrolyse est assez complexe dans le cas de la haute température du fait de l'utilisation de fragiles céramiques, d'inter-connecteurs rigides et de joints en verre ou en vitrocéramique (permettant d'éviter la recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène produit). La limitation intrinsèque à cette technologie provient alors du fonctionnement à ces niveaux de température ; les principaux enjeux identifiés sont la tenue des matériaux à ces températures (fragilisation des céramiques, endommagement lié aux contraintes lors de la dilatation des matériaux), la durabilité pendant les cycles (cycles redox en cas d'arrêts) et le coût.

Les travaux sur l'EVHT, qui avaient débuté dans les années 80 [8], ont repris début 2000 après une interruption faute de perspective de marché et ont bénéficié des recherches menées sur les piles à combustible à oxyde solide. Ces travaux ont principalement été soutenus par le (DoE) aux Etats-Unis et par la Commission Européenne (Projet Relhy [9]). De bonnes performances ont été atteintes dès 2006 dans le cadre du projet européen Hi₂H₂ à des températures assez élevées (> 850 °C) grâce à la très bonne conductivité ionique de l'oxyde de zirconie utilisé comme électrolyte. D'après l'étude technico-économique réalisée dans le cadre de ce projet, le coût de production de l'hydrogène est de l'ordre de 490da kg⁻¹ avec un coût d'électricité de 8200da MWh⁻¹ et une énergie thermique Gratuite (couplage à une installation nucléaire). Cependant, certaines données ayant un impact

majeur sur le coût de l'hydrogène produit ont été omises dans les hypothèses de calcul (investissement initial et coût de maintenance sous-évalués, actualisation, durée d'exploitation, taux de disponibilité, dégradation, ...). Après régularisation, on obtient un coût d'hydrogène de 800da € kg⁻¹ H₂.

I.1.1.2.3. Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons

Le principe de l'électrolyse PEM diffère de celui de l'électrolyse alcaline par le fait que l'électrolyte est un électrolyte solide, composé d'une membrane conductrice de protons ; les électrodes sont déposées de part et d'autre de ce matériau polymère. Le premier électrolyseur basé sur un électrolyte solide a été développé dans les années 1960 par General Electric ; le concept a ensuite été amélioré ,avec l'utilisation d'une membrane de polystyrène sulfoné.

A. Avantages de la technique de membrane échangeuse de protons

La membrane polymère utilisée comme électrolyte solide est la source des nombreux avantages inhérents aux électrolyseurs PEM notamment en termes de pureté de l'hydrogène produit, de la compacité des systèmes et du fonctionnement à haute pression. De plus, l'électrolyse PEM est une technique fiable et durable souvent sur plus de 60 000 h de fonctionnement [10].

Grâce à l'utilisation d'une membrane fine (20-300 µm) capable de fournir une très bonne conduction des protons [11], il est possible d'atteindre des densités de courants très élevées comme le montre la Figure 4. Ce fonctionnement à forte densité de courant et l'utilisation d'un électrolyte mince procurent une excellente compacité à ce type d'électrolyse. Le fonctionnement à fortes densités de courant engendre bien entendu une réduction du rendement électrique de la production d'hydrogène, mais il peut être intéressant de pouvoir absorber de grandes quantités d'énergie, même à un faible rendement, comme l'illustrent les récentes fluctuations du cours de l'électricité qui ont donné lieu à un prix négatif du MWh.

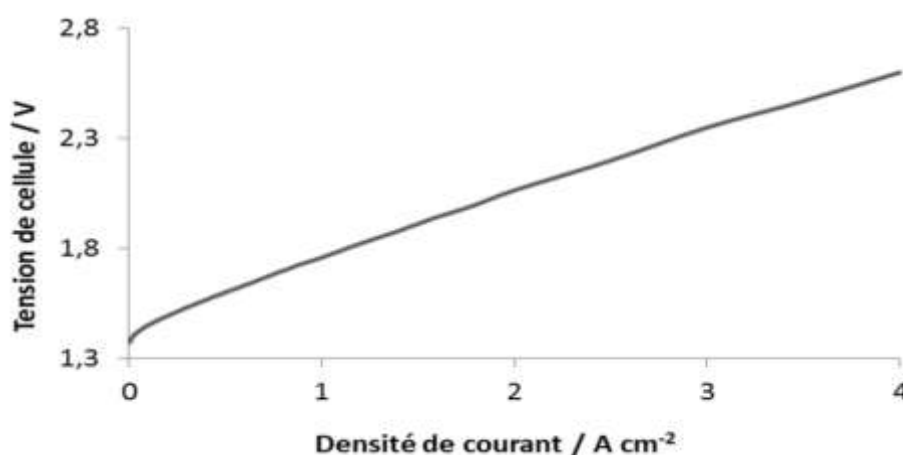


Figure I.4: Courbe de polarisation typique d'un électrolyseur PEM testé au laboratoire; (2,7 mg cm⁻² IrO₂ – 0,3 mg cm⁻² Pt) ; 60 °C, Patm

De plus, grâce au faible coefficient de diffusion de l'hydrogène à travers la membrane Nafion ($< 1,25 \cdot 10^4 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ pour une membrane N117, pression atmosphérique, 80 °C, 2 A cm⁻²) l'électrolyse PEM de l'eau permet de produire un hydrogène de grande pureté.

L'utilisation d'un électrolyte solide permet aussi de fonctionner à haute pression (égale ou différentielle à travers l'électrolyte) ce qui permet de s'affranchir d'un compresseur d'hydrogène dans le système ; certains modèles commerciaux ont même annoncé des fonctionnements jusqu'à 350 bars .De plus, la configuration à pression différentielle, où Seulement la cathode est sous pression, permet d'éliminer les problèmes d'auto-inflammation du collecteur de courant en titane en présence d'oxygène sous pression.

Comme le montre (la **Figure I.5**), l'électrolyse PEM est appréciée pour sa plage de fonctionnement étendue (de 10 à 200 % voire 400 % de la puissance nominale) et pour la rapidité de sa réponse à des variations brutales de charge. Cette capacité de pouvoir travailler sur des larges gammes de puissance est due au fait que le transfert des protons à travers la membrane est un procédé rapide qui n'est pas retardé par la nécessité de mettre en mouvement de grandes quantités de liquide comme c'est le cas pour les électrolytes liquides. A noter également que la production rapide de gros volumes de gaz peut conduire à un effet de "mousse" qui expulse l'électrolyte du compartiment.

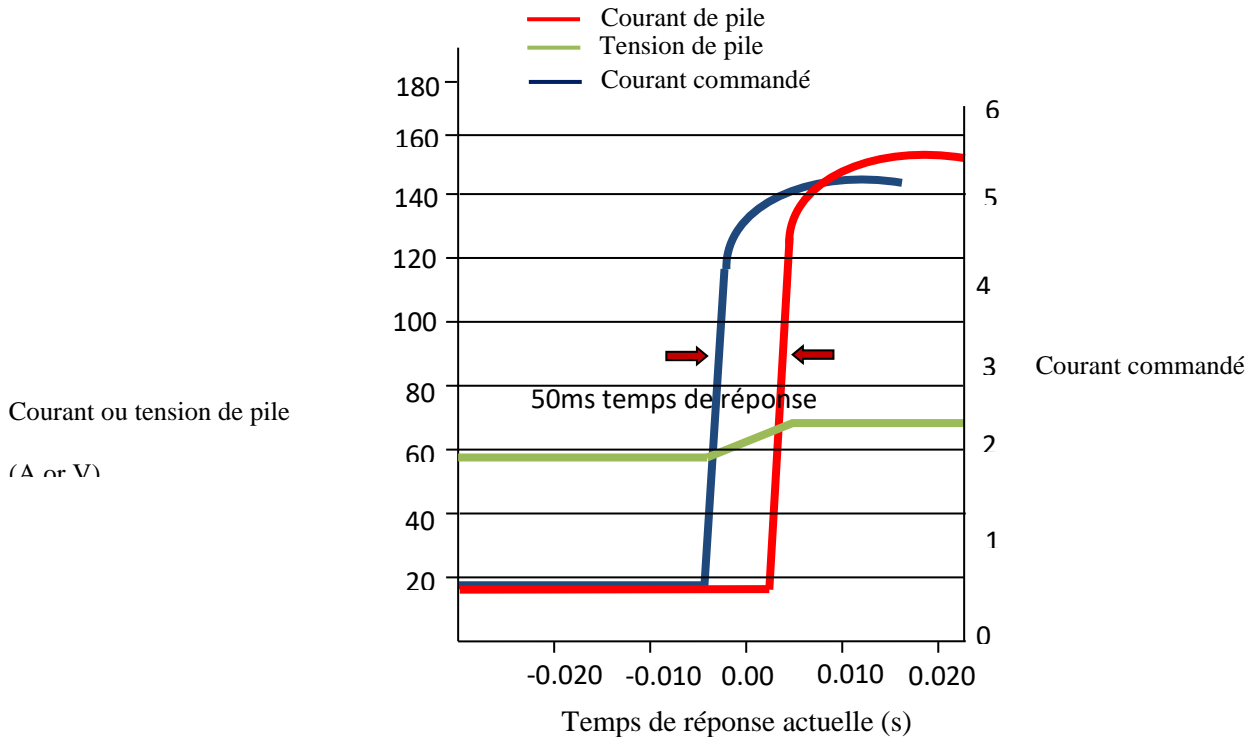


Figure I. 5 : Exemple de temps de réponse d'un électrolyseur PEM à une brusque variation du profil de charge ; graphique tiré de [12].

B. Inconvénients de l'électrolyse membrane échangeuse de protons

Les principaux inconvénients des électrolyseurs PEM sont eux aussi inhérents aux propriétés des membranes polymères utilisées comme électrolyte solide. Les matériaux utilisés comme catalyseurs, mais aussi ceux qui composent les plaques bipolaires et les collecteurs de courant, doivent résister à l'environnement acide provoqué par l'utilisation d'une membrane Nafion (équivalence $0,5 \text{ mol l}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$ [13]), mais aussi aux potentiels élevés surtout lors du fonctionnement à forte densité de courant. Bien souvent, seuls les métaux nobles, donc rares et onéreux, peuvent résister à ce type de conditions. Le passage à une production de masse des électrolyseurs aura donc pour seule conséquence l'augmentation du prix des catalyseurs.

Comme en électrolyse alcaline, la présence potentielle d'hydrogène dans l'oxygène à hauteur de quelques pourcents, due à la permutation à travers la membrane, engendre un risque d'explosion, dès lors que la concentration dépasse la limite inférieure d'explosivité de 4,2 % H_2 dans O_2 (à température ambiante et pression atmosphérique) Il est donc essentiel que la membrane garde une bonne étanchéité aux gaz sur sa durée de vie ; or, la permutation de l'hydrogène à travers la membrane augmente avec la pression ce qui pose certains problèmes lors du fonctionnement à haute pression. Des membranes plus épaisses ou

renforcées pourront être utilisées de manière à réduire la permutation.

De plus, la température de fonctionnement des électrolyseurs est généralement limitée à 80-90 °C du fait de la nature des membranes [14]. Cependant, en les modifiant légèrement (dopage par de l'acide phosphorique, réseaux interconnectés de polymère), des températures de fonctionnement de 130 °C ont pu être rapportées.

C. Panorama des acteurs et des applications

Les applications des électrolyseurs PEM sont principalement la génération d'hydrogène sur des sites de stockage alimentant des piles à combustible. Ces systèmes peuvent alors servir d'énergie de secours pour des stations de télécommunications, des sites isolés (projet Myrte en Corse, Areva), ou pour des stations-service hydrogène alimentant de petites flottes de véhicules fonctionnant avec une pile à combustible (Freiburg, Allemagne). Certains acteurs tels que (Paris, France) sont principalement axés sur la production d'hydrogène ultra pur pour des applications médicales ou de recherche en laboratoire. Les principaux acteurs en présence sont listés dans le **Tableau 1**.

Sociétés	Pays	Débit (Nm ³ h ⁻¹)	Pression (Bars)	Energie consommée kWh Nm ⁻³ (Rendement ΔH)
Proton On Site	USA	0-230	1-30	4,2 (84 %)
Mitsubishi Corp.	Japon	1 30	1 à 8 400	Données indisponibles
Hydrogenics	Canada	0-2	1 à 8	4,2 (72 %)
CETH2	France	0-5 0-20	1-16 1-16	5,0 (70 %) 5,2 (65%)
HELION Hydrogen Power	France	0-10	1-50	Données indisponibles
GINER Electrochemical Systems	USA	3	85	3,5
ITM Power	Grande Bretagne	0-5	1 à 200	6,25-7,14 (57-50 %)
h-tec Wasserstoff-Energy-System	Allemagne	3,6	30	Données indisponibles

Tableau I.1: Liste des principaux fabricants d'électrolyseurs PEM

Au final, le coût de production de l'hydrogène est de l'ordre de 3 \$ kg⁻¹ pour une installation de 700 Nm³ h⁻¹ consommant 39,4 kWh kg⁻¹ H₂, avec un coût d'électricité de 39 \$ MWh⁻¹ (les calculs ont été réalisés aux Etats-Unis par l'entreprise Giner Inc [15].). A noter que le coût de l'électricité utilisé par la société Giner Inc. pour ces calculs est moins élevé que celui annoncé pour les études de coût en électrolyse alcaline (alcaline : 8400DA MWh⁻¹ PEM : 8200DA MWh⁻¹ soit environ 6300DA MWh⁻¹). Il nous est ainsi difficile de comparer ces deux techniques en termes de coût.

Néanmoins, l'électrolyse PEM et alcaline ont été comparées dans le cadre du projet Xcel Energy Wind2hydrogen (NREL, USA) ayant pour objectif d'utiliser l'électricité produite par des éoliennes pour la production d'hydrogène. Des électrolyseurs alcalins (Teledyne) et PEM (Proton Energy Systems) respectivement de 50 et 5 kW ont été testés: le rendement sur l'électricité consommée du système PEM est de 57 % alors que celui du système alcalin est de 41 %.

Cependant, avec seulement quelques premiers petits systèmes en exploitation industrielle (**Tableau I.1**), le niveau de maturité de l'électrolyse PEM est bien moins important que celui de l'électrolyse alcaline, qui dispose de dizaines d'années de retour d'expérience.

I.1.2. Comparaison des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Le **Tableau I.2** résume les principaux avantages et inconvénients des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

	Electrolyse alcaline	Electrolyse PEM	Electrolyse à haute température
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature - Catalyseur nonnoble - Stack au niveau du MW 	<ul style="list-style-type: none"> - Réponse rapide aux variations de charge - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant) - Haute pureté des gaz produits - Durabilité - Fonctionnement à haute pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement électrique élevé - Diminution des coûts d'électricité nécessaire - Fonctionnement à haute pression - Catalyseur non noble - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Faibles densités de courant - Faible pureté des gaz à cause de la perméation à travers le diaphragme - Systèmes non compacts à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide - Faibles pressions de fonctionnement - Délai de réponse lors de variations de régime 	<ul style="list-style-type: none"> - Environnement très oxydant qui limite l'éventail de matériaux potentiellement utilisables - Coût des catalyseurs (métaux nobles), de l'électrolyte solide, des plaques bipolaires et des collecteurs de courant en titane - Stack inférieur au MW 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement à l'échelle du laboratoire - Durabilité

Tableau I. 2: Comparatif des technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Après analyse du **Tableau I.2**, il apparaît que chaque technologie, du fait de ses avantages/inconvénients, peut trouver son propre créneau de marché.

Nous avons choisi d'orienter cette thèse sur l'étude de l'électrolyse PEM pour sa capacité de couplage avec les énergies renouvelables ; l'électrolyse PEM vise en effet les marchés de stockages des énergies renouvelables car elle est en mesure d'absorber aisément les fortes variations de la production électrique solaire ou éolienne pour le stockage de l'électricité sous forme chimique que représente l'hydrogène.

I.1.3. L'électrolyse PEM de l'eau

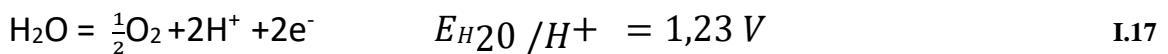
Les électrolyseurs à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) sont très prometteurs pour la production d'hydrogène : ils sont compacts, performants électriquement (1 à 4 A cm⁻²), produisent de l'hydrogène très pur (pas ou peu de pollution par l'électrolyte),

nécessitent peu de maintenance et peuvent être alimentés par de l'électricité provenant des EnR (Energies renouvelables).

Cependant, cette technologie demande des améliorations en particulier au niveau des coûts de ses composants qui sont encore très élevés. Les membranes (environ 115500da m⁻² pour une membrane Nafion 115 - Sigma Aldrich), les catalyseurs les plaques bipolaires utilisés sont chers, et il est important d'optimiser leur utilisation tout en cherchant des alternatives car il n'y a peu d'espoir de diminution des coûts, même en envisageant une production en série.

I.1.3.1. Description générale

Une mono-cellule de type PEM est constituée de plusieurs éléments visibles sur la Figure 6. L'Assemblage Membrane Electrodes ou AME est composé de deux électrodes de part et d'autre d'un électrolyte polymère qui permet l'échange des protons tout en étant isolant électronique et peu perméable aux gaz. Des catalyseurs déposés sur les électrodes favorisent les réactions. L'eau est oxydée à l'anode et se décompose selon la demi-réaction suivante pour produire des protons et de l'oxygène :



Les protons H⁺ migrent vers la cathode à travers la membrane sous l'effet du champ électrique et du gradient de concentration où ils sont réduits en hydrogène moléculaire (avec les électrons provenant du pôle négatif du générateur) selon la demi-réaction :

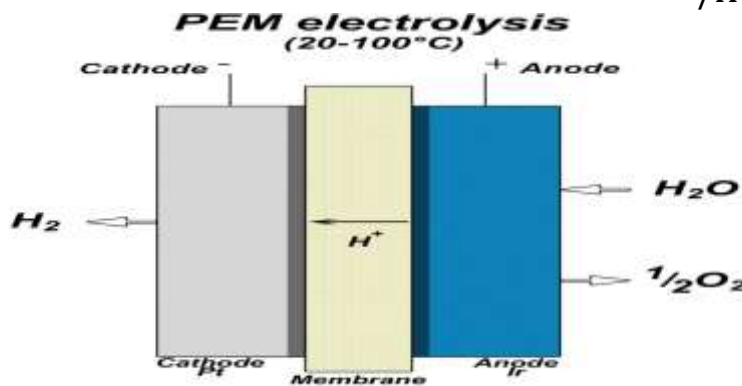


Figure I. 6 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse PEM.

I.1.3.2. Rôles et propriétés des différents composants d'un électrolyseur PEM

I.1.3.2.1. Assemblage membrane électrodes (AME)

Dans un AME, la membrane sert à la fois d'électrolyte à conduction ionique et de séparateur des gaz produits par la réaction d'électrolyse. Les gaz sont rejetés à l'arrière des lignes de champs. Une telle configuration permet de fortement réduire la distance interpolaire mais exige l'utilisation d'électrodes de structures complexes, poreuses aux gaz, conductrices ioniques et électroniques. Il s'agit de problèmes de percolation spatiale de trois phases.

En effet, pour qu'un AME soit le siège de la réaction d'électrolyse de l'eau, certaines conditions doivent être satisfaites :

- Chaque électron libéré du catalyseur anodique (I.17) doit trouver son chemin vers les particules de catalyseurs cathodiques pour se recombinaison suivant l'équation I.18 ; un passage suffisamment conducteur doit donc exister. En parallèle, un chemin avec une conductivité protonique suffisante doit être disponible pour transporter les protons du catalyseur anodique au catalyseur cathodique.
- La réaction d'électrolyse consomme de l'eau qui doit être apportée en quantité suffisante à l'interface anode/électrolyte.
- Les produits de réaction O₂ et H₂ doivent être évacués des catalyseurs anodique et cathodique.

Ces zones en trois dimensions où le catalyseur, le ionomère et le réactif sont en contact sont appelées zones de points triples.

A. Les électrodes

Les électrodes sont le siège des réactions électrochimiques. Elles sont composées d'une couche de matériau catalytique (catalyseurs + ionomère) et d'une couche de diffusion. La couche de diffusion est utilisée pour améliorer le passage du courant et faciliter le transport des réactifs et des produits.

Le choix des catalyseurs nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs [15]:

- L'activité catalytique vis-à-vis des réactions concernées,
- La stabilité chimique vis-à-vis de l'électrolyte et des produits de la réaction,
- La stabilité électrochimique en fonction du potentiel des électrodes,
- Le coût,
- La facilité à former, sur les membranes, des dépôts poreux, homogènes, adhérents ayant des surfaces spécifiques importantes,
- La stabilité mécanique sous fort dégagement gazeux,
- La conductivité électronique,
- La sensibilité à l'empoisonnement,
- La morphologie (taille des cristaux, cristallinité, réseaux...).

D'un point de vue thermodynamique, l'électrolyse de l'eau peut être réalisée à partir de 1,23 V dans les conditions standard de pression et de température. Cependant, les potentiels de fonctionnement sont toujours supérieurs à cette valeur idéale à cause de l'apparition de différentes surtensions. Ainsi, les tensions habituelles de fonctionnement sont comprises entre 1,4 et 2 V ce qui impose de fortes contraintes dans le choix des matériaux.

La problématique du choix des matériaux n'est donc pas la même à l'anode et à la cathode puisque les potentiels des électrodes sont différents (supérieurs à 1,6 V à l'anode et inférieurs à 0 V à la cathode). C'est pourquoi, le choix des catalyseurs anodiques et cathodiques sera distingué dans ce qui suit.

- A la cathode : Réaction de dégagement de l'hydrogène

La cathode est le siège de la réaction de dégagement de l'hydrogène. L'activité catalytique d'un matériau peut être évaluée en représentant la surtension ou le courant de réaction en fonction d'un paramètre énergétique spécifique (force de liaison M-H, enthalpie de réaction...). **La Figure I.7** est un exemple de ce type de tracé représentant le logarithme de la densité de courant du dégagement d'hydrogène en fonction de la force des liaisons M-H sur différents métaux.

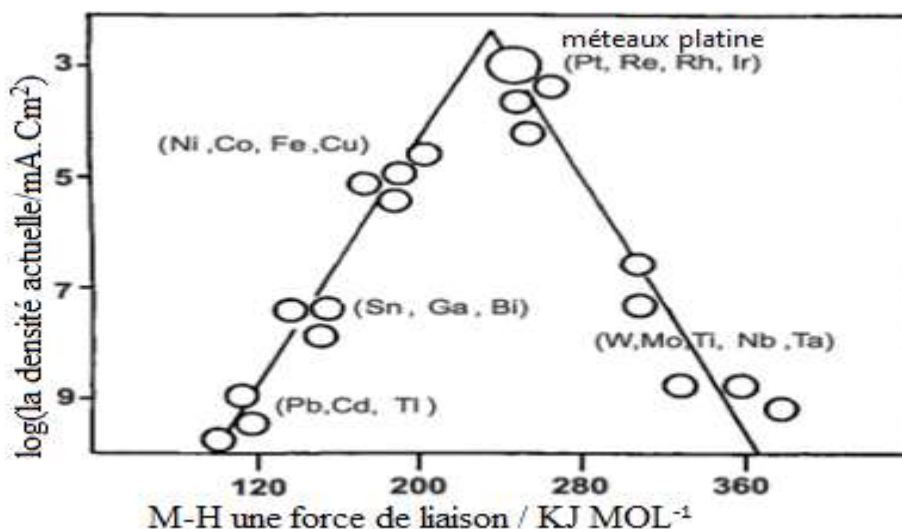


Figure I. 7: Activité pour le dégagement d'hydrogène en fonction de la force de liaison métal-hydrogène pour différents métaux, selon [16]

Les métaux avec des énergies de liaisons intermédiaires sont les plus actifs vis-à-vis de la réaction de dégagement de l'hydrogène tandis que ceux situés de part et d'autre ont des étapes de désorption de l'hydrogène cinétiquement lente.

Catalyseurs conventionnels à base de métaux nobles

Le platine est connu pour être le catalyseur le plus actif vis-à-vis de cette réaction. Comme le platine est coûteux il est important d'optimiser son utilisation. Ainsi pour réduire les coûts, l'objectif est d'obtenir la plus grande surface active possible pour augmenter l'utilisation du platine et réduire les chargements. Pour cela, les nanoparticules de platine sont généralement déposées sur un support carboné de type Vulcan ou Black Pearls 2000 (noir de carbone). Ces poudres ont de très grandes surfaces spécifiques (respectivement $250 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ et $1300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$). L'utilisation de noir de platine est aussi courante.

Le palladium est régulièrement utilisé car son comportement électro catalytique vis-à-vis de la réduction du proton est intéressant (bien qu'inférieur à celui du platine) et son coût est quatre fois moindre que celui du platine (il est en outre trois fois plus abondant sur Terre). Les chargements en matériaux catalytiques généralement rencontrés dans la littérature les problématiques étant identiques à celles des piles à Combustible à membrane échangeuse de protons, l'architecture de ces électrodes a pu bénéficier des nombreuses recherches

effectuées dans ce domaine.

Remplacement des métaux nobles par des complexes organométalliques

Les métaux comme le cobalt ou le fer sont aussi bons catalyseurs de la réaction de dégagement de l'hydrogène mais ils ne sont pas stables dans les conditions d'électrolyse PEM. Une solution possible consiste à protéger ces atomes métalliques en les entourant par un certain nombre de ligands. La littérature fait mention de nombreux complexes organométalliques catalysant la réduction des protons en hydrogène moléculaire.

Leur activité catalytique dépend en général de la formation d'un centre métallique de faible degré d'oxydation. Les électrons nécessaires à cette réduction peuvent être obtenus d'un réducteur chimique sacrificiel. Ou d'une électrode inerte conductrice sur laquelle le complexe est fonctionnalisé. Pour être utilisés dans un assemblage membrane électrodes, ces complexes sont adsorbés à la surface d'un support carboné comme le Vulcan.

Il est aussi possible de jouer sur la nature chimique des substituants du ligand pour modifier la potentielle thermodynamique d'oxydoréduction du centre métallique de manière à le rapprocher de celui du couple H^+/H_2 à catalyser et réduire ainsi la surtension nécessaire au bon déroulement de la réaction.

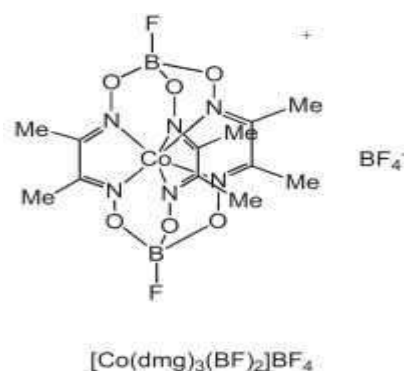


Figure I.8: Complexe de cobalt $[Co(dmg)_3(BF_2)_2]BF_4$

-A l'anode

L'anode est le siège de la réaction d'oxydation de l'eau en oxygène. La surtension anodique est la cause principale d'irréversibilité dans une cellule PEM d'électrolyse de l'eau. Il est donc important d'étudier les catalyseurs permettant de réduire ces surtensions afin de diminuer l'énergie nécessaire à l'électrolyse. De plus, le potentiel de fonctionnement de l'anode est très élevé (supérieur à 1,6 V) ce qui limite la gamme de matériaux utilisables qui peuvent le supporter. Par exemple, l'utilisation de matériaux carbonés n'est pas possible à l'anode car le carbone s'oxyde en milieu acide ($C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^-$) pour des potentiels supérieurs à 1 V.

Réaction de dégagement de l'oxygène

L'étude de la cinétique de la réaction de dégagement de l'oxygène a fait l'objet d'un nombre important de publications ; les principaux mécanismes proposés pour cette réaction ont été listés par Bockris *et al.* Parmi ces mécanismes, les trois présentés dans le Tableau 3 semblent les plus probables lorsque l'oxyde d'iridium ou de ruthénium est utilisé comme catalyseur.

L'activité catalytique de différents matériaux peut être évaluée en observant la Figure I.9 qui représente la surtension à $0,1 \text{ mA cm}^{-2}$ en fonction de l'enthalpie de transition pour différents matériaux.

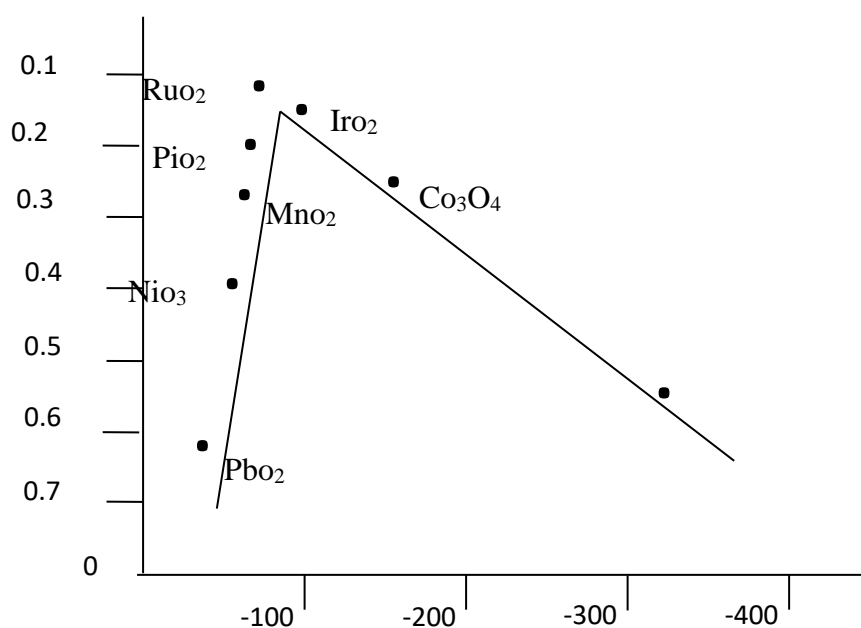


Figure I. 9 : Surtension à $0,1 \text{ mA cm}^{-2}$ sur différents oxydes métalliques en fonction de l'enthalpie.

Choix du catalyseur anodique

A l'anode, les oxydes de métaux nobles (oxydes d'iridium et de ruthénium) sont majoritairement utilisés car ils sont bons conducteurs électroniques, stables à ces potentiels élevés de fonctionnement et présentent des propriétés électro catalytiques intéressantes vis-à-vis de l'électro-oxydation de l'eau. Néanmoins, comme ils sont parmi les métaux les plus denses ($d \text{ IrO}_2 = 11,66 \text{ g cm}^{-3}$), pour obtenir une continuité électrique de la couche anodique, les chargements doivent être très élevés, de l'ordre de $2\text{-}4 \text{ mg cm}^{-2}$. De plus, l'iridium est l'un des éléments les plus rares dans la croûte terrestre avec une fraction massique moyenne de 0,001 ppm. En comparaison, l'or et le platine sont 40 et 10 fois plus abondants. La réduction de la quantité de métaux nobles est donc un enjeu majeur.

Plusieurs pistes sont envisagées dans la littérature comme l'alliage avec des métaux non nobles, l'utilisation de matériaux supports conducteurs ou l'utilisation d'architectures innovantes.

. Catalyseurs multi-métalliques

Comme décrit dans le chapitre 1, les oxydes d'iridium et de ruthénium, utilisés seuls ou en alliage sont généralement utilisés comme catalyseurs de la réaction de dégagement de l'oxygène. Au vu de leur rareté et de leur prix, de nombreuses recherches se sont focalisées sur l'alliage de ces catalyseurs avec des métaux moins nobles ; les différents alliages possibles ont tout d'abord été testés pour des électrodes de type DSA avant que leur synthèse ne soit adaptée pour former des poudres utilisables dans la fabrication des électrodes d'un électrolyseur PEM.

Catalyseurs multi-métalliques développés pour les électrodes stables en dimensionnement

Une grande partie des travaux recensés sur les catalyseurs de la réaction de dégagement de l'oxygène ont été réalisés dans le cadre du développement des électrodes de type DSA. Ces électrodes sont massivement utilisées dans l'industrie, en outre, pour la production d'hydroxyde de sodium (procédé chlore-soude), d'aluminium (Procédé Héroult-Hall) et de cuivre électrolytique.

Elles sont fabriquées à partir d'un substrat de titane recouvert de catalyseurs à base d'oxydes de métaux platinoïdes. La couche de catalyseurs est enduite directement sur le substrat par calcination des précurseurs.

Les techniques de préparation de ces électrodes de type DSA sont difficilement transposables directement pour former un assemblage membrane électrodes pour l'utilisation en électrolyse PEM. En effet, il est difficile d'obtenir de bons contacts électriques entre les électrodes et la membrane, et la surface active est limitée du fait de la faible rugosité de ces couches catalytiques formées par calcination. Pour diminuer la résistivité du système, il est possible de coller l'électrode (catalyseur déposé sur le collecteur de courant en titane) à la membrane par imprégnation d'ionomère de Nafion sur l'électrode. Un pressage à chaud sur la membrane permet alors la formation de l'AME. Mais restreint le démontage complet du bloc électrochimique (substrat lié à l'AME). Ainsi, pour développer les électrolyseurs PEM, les chercheurs ont dû travailler sur d'autres méthodes de synthèses pour obtenir ces particules de catalyseurs sous forme de poudre de grande surface spécifique.

Les travaux réalisés sur ce type d'électrode recensent la plupart des alliages utilisables comme catalyseurs.

Ces études ont recensé l'utilisation de matériaux tels que SnO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , Sb_2O_5 ou SiO_2 pour former des oxydes multi-métalliques à base d'iridium et/ou de ruthénium.

Les auteurs s'accordent sur le fait que l'ajout de ces métaux non nobles permet d'augmenter la surface active du catalyseur multi-métallique grâce à une meilleure dispersion du catalyseur et ainsi de pouvoir diminuer très fortement les taux de métaux nobles utilisés tout en conservant de bonnes performances (tension de cellule faible); cependant, le ratio métaux nobles/non nobles doit être adapté pour chaque type d'alliage de manière à garder une conductivité électronique satisfaisante dans l'électrode, les métaux non nobles étant généralement moins conducteurs.

Catalyseurs multi-métalliques développés pour les électrodes d'électrolyseurs PEM

Contrairement aux résultats obtenus pour des électrodes de type DSA, dans la plupart des études présentées dans la littérature pour des poudres de catalyseurs, l'ajout des métaux non nobles (comme SnO_2 , Ta_2O_5 ou Nb_2O_5) ne présente aucun effet positif envers la réaction de dégagement de l'oxygène.

En effet, l'augmentation de la résistivité des oxydes multi-métalliques liée à l'ajout de

ces métaux non nobles est un facteur rédhibitoire dans le cas des électrolyseurs PEM puisque les densités de courants employées sont généralement élevées (1-2 A cm⁻² pour les électrolyseurs PEM par rapport à 0,3-0,5 A cm⁻² pour les électrodes de type DSA). De plus, leur ajout induit une augmentation de la taille des particules et donc une baisse de la surface active à l'inverse de l'oxyde de métal noble utilisé seul. Seul l'ajout de molybdène semble avoir un effet catalytique positif car il permet de réduire la taille des particules et donc d'augmenter la surface active.

Ainsi, l'intérêt de ces structures multi-métalliques réside uniquement dans l'amélioration de la durée de vie des électrodes à base de ruthénium.

. Structures de catalyseurs ou de couches actives innovantes

Une autre approche pour réduire la quantité de métaux nobles utilisée consiste à structurer les couches actives ou les particules de catalyseurs de manière à augmenter la surface active disponible.

On peut citer l'utilisation de nanoparticules d'oxyde d'iridium de diamètre de l'ordre de 2-3 nm (à comparer aux 7-12 nm généralement rapportés), de nanotubes ou nano-dendrites d'oxyde d'iridium, des structures cœur/coquille avec un cœur de métal moins coûteux et une coquille du catalyseur noble, ou encore des catalyseurs multi métalliques nanostructures déposés en film minces par PVD (Physical Vapor Deposition).

Même si ces structures innovantes apparaissent très actives électro chimiquement, la méthode de fabrication et surtout la stabilité des nanostructures au cours du fonctionnement, semblent être des points quelque peu limitant.

. Catalyseurs supportés

La troisième méthode consiste à disperser les nanoparticules de catalyseur sur un support, de manière à obtenir une plus grande surface active et améliorer la conductivité électronique de la couche catalytique. L'utilisation d'un matériau support limite aussi les phénomènes d'agglomération entre les espèces métalliques, conférant ainsi une meilleure stabilité aux catalyseurs.

Le matériau support doit respecter certaines conditions :

- grande surface spécifique pour promouvoir la dispersion du catalyseur,
- très bonne conductivité électronique,
- stabilité chimique et électrochimique dans les conditions d'électrolyse PEM (milieu acide et potentiel élevé).

Matériaux supports de type carbures métalliques

Des carbures métalliques tels que le carbure de titane, de tantale ou de silicium ont été utilisés comme matériaux supports des catalyseurs de la réaction de dégagement de l'oxygène. L'augmentation de la surface active du catalyseur supporté par rapport au catalyseur seul, observée dans les trois études, a été attribuée à la meilleure dispersion des particules sur le support.

ont testés leur catalyseurs dans un assemblage membrane électrodes .Des performances légèrement supérieures ont pu être obtenues en utilisant du carbure de titane comme matériau (Figure 10) ; le support de catalyseur améliore uniquement la conduction électronique dans la couche active (aucune amélioration dans la 1^{ère} partie de la courbe de polarisation aux faibles densités de courant) alors que des tests effectués en milieu H₂SO₄ 0,5 M ont révélé une activité catalytique neuf fois supérieure pour une électrode d'Ir/TiC comparée à une électrode de noir d'iridium seul (courant mesuré à 1,5 V/ ECS).

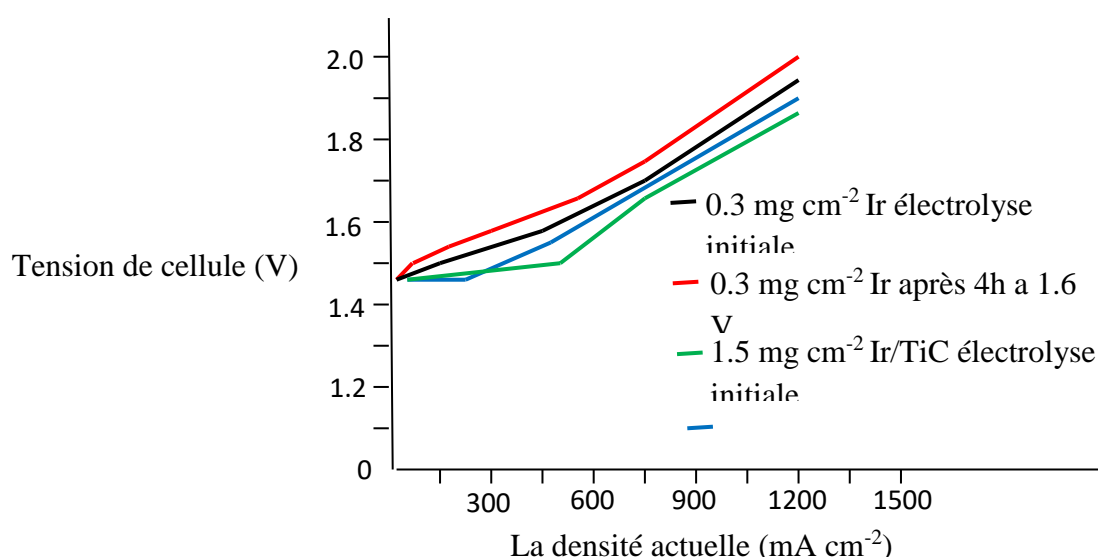


Figure I. 10: Courbes de polarisation tirées de, [17]. Chargement en oxyde d'iridium de 0,3 mg cm⁻², membrane Nafion 112, 80 °C.

La stabilité de ces carbures métalliques dans les conditions d'électrolyse PEM est cependant à mettre en doute. A titre d'exemple, une dégradation des électrodes à base d'Ir/TiC est déjà observée au bout de seulement 4 h de maintien de la polarisation à 1,6 V (**Figure I.10**). L'augmentation de la tension de cellule à fortes densités de courant, et donc de la résistance ohmique, est due à l'oxydation du carbone et du titane qui se recouvre d'une couche d'oxyde de titane non conductrice.

Matériaux supports sous forme oxyde

Les oxydes potentiellement utilisables comme matériaux supports sont les mêmes que ceux utilisés pour former des catalyseurs multi-métalliques : TiO₂, SnO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅ ou encore Sb₂O₅. Cependant, aucun de ces oxydes n'est bon conducteur électronique dans les conditions d'électrolyse PEM.

Une première approche consiste à recouvrir en totalité ces oxydes métalliques non conducteurs par le catalyseur ; pour cela, un taux minimal de 60 % de métaux nobles par rapport au support doit être utilisé. Des performances sensiblement meilleures au catalyseur utilisé seul ont été obtenues en utilisant des catalyseurs supportés du type IrO₂Pt/TiO₂ [18]. Ou IrO₂/SnO₂ [19]. Les auteurs supposent une meilleure utilisation du catalyseur grâce à l'amélioration de la dispersion sur le support de grande surface spécifique. Les taux de catalyseurs restent cependant élevés (de l'ordre de 1 mg cm⁻²) pour pouvoir recouvrir ces matériaux non conducteurs.

La deuxième approche consiste à doper ces oxydes pour obtenir une conductivité satisfaisante. Plusieurs résultats sont rapportés dans la littérature concernant l'utilisation d'oxyde d'étain dopé à l'indium ou à l'antimoine (ATO) comme matériaux supports anodiques. Des oxydes de titane dopés au niobium ont aussi été utilisés comme catalyseur dans un système réversible électrolyseur/pile à combustible. Des études de modélisation réalisées par Velikokhatnyi et Kumta, ont révélé que d'autres matériaux, comme CaTa₂O₆ dopé au scandium et à l'yttrium, ou encore SnO₂ dopé au fluor (FTO), pouvaient être envisagés comme supports de catalyseur. Cependant, aucun résultat expérimental n'a encore été rapporté à l'heure actuelle. Grâce à leur bonne stabilité, ces oxydes métalliques dopés peuvent être envisagés comme supports de catalyseur ; cependant, les chargements en catalyseurs restent élevés de manière à pallier leur faible conductivité.

Une dernière approche consiste à réduire partiellement ces oxydes pour les rendre conducteurs à température ambiante ; plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens sur

l'oxyde de titane. Cet oxyde sous-stœchiométrique étant eux aussi faiblement conducteurs, il est important d'utiliser de forts taux de catalyseurs. De plus, certains doutes liés à leur stabilité dans le temps doivent aussi être levés. En effet, il est suspecté que l'oxyde sous-stœchiométrique se ré-oxyde en TiO_2 non conducteur au cours du temps.

Ainsi, quelle que soit la méthode utilisée pour améliorer la conductivité de ces matériaux supports, les chargements en métaux nobles rapportés dans la littérature restent encore trop importants, ce qui limite leur utilisation pour des applications en électrolyse PEM.

. Remplacement des métaux nobles

Certains chercheurs ont essayé de trouver des alternatives à ces oxydes de métaux Nobles montré que des sphères creuses d'oxyde titane dopées au baryum Pouvaient être utilisées comme catalyseur de la réaction de dégagement de l'oxygène (potentiel d'activation aux alentours de 1,8 V). Il serait intéressant d'utiliser ce matériau comme support de catalyseur ; l'effet ajouté de l'activité catalytique de TiO_2 dopé au Ba à celle élevée de l'oxyde d'iridium devrait donner de bonnes performances.

Certains auteurs rapportent aussi l'utilisation d'oxyde de plomb ou d'alliages fer-nickel supportés sur des nanotubes de carbone. Comme catalyseur de la réaction de dégagement de l'oxygène. Cependant, il est largement reconnu que ces métaux non nobles et le carbone ne sont pas stables dans les conditions des électrolyseurs PEM. Ainsi, le potentiel de dégagement de l'oxygène à 0,9 V annoncé est en partie dû à l'oxydation du catalyseur et du carbone.

- Membrane

Les membranes utilisées en électrolyse PEM sont majoritairement des polymères échangeurs de cations. Le Nafion échangé dans l'acide est le polymère le plus utilisé. Le Nafion est un ionomère composé d'un squelette hydrophobe de type poly sur lequel sont greffées des chaînes fluorées terminées par des groupes sulfoniques. Il a une bonne conductivité protonique et de bonnes stabilités chimique et thermique. Les propriétés mécaniques et physico-chimiques des membranes de type Nafion dépendent directement de leur degré d'hydratation.

La firme Dupont de Nemours commercialise le Nafion sous différentes formes et notamment sous forme de films de 25 à 300 μm d'épaisseur. Le Nafion est assez cher. Des

recherches d'alternatives aux polymères perfluorosulfonés sont actuellement en cours. On peut citer les réseaux interpénétrés de polymères où l'idée est d'associer les propriétés respectives de tenue mécanique et de conduction protonique de plusieurs polymères.

B. Plaques bipolaires et couches de diffusion

Dans un stack de cellules d'électrolyse PEM, les plaques bipolaires ont la double fonction de fournir le courant et d'assurer l'évacuation des gaz produits. Des cannelures au design particulier favorisent la distribution des réactifs et l'évacuation des produits. Le choix des matériaux est délicat au vu des conditions difficiles auxquelles sont soumises ces plaques (potentiel élevé et milieu acide). Le titane est souvent utilisé car il est très stable électrochimiquement car dans ces conditions, le métal est protégé de l'oxydation par une fine couche d'oxyde natif. Cependant la difficulté de mise en forme du titane rend ces composants très chers à fabriquer (usinage). Les différentes solutions proposées consistent à utiliser des plaques bipolaires en titane sans cannelures ou en acier protégées par une fine couche de métal résistant (Ti, Ta ou oxydes de métaux nobles).

En termes de couche de diffusion cathodique, des papiers ou tissus de carbone sont utilisés de façon similaire.

Comme couche de diffusion anodique, les potentiels élevés ne permettant pas l'utilisation des composés carbonés, des poreux en titane sont souvent utilisés pour véhiculer l'eau et conduire le courant. Le titane s'oxyde en surface pour former une fine couche de TiO_2 passivant. TiO_2 est un matériau semi-conducteur mais, comme la couche de passivation est très fine et que le métal sous-jacent est conducteur électronique, une bonne conduction électrique est assurée. L'utilisation de grille de titane fine peut aussi être envisagée.

C. Module d'électrolyse

Pour produire de grands volumes de gaz, les mono-cellules d'électrolyse sont empilées en série de façon à former un stack comme le montre la **Figure I.11**.



Figure I. 11: Stack formé par un empilement de douze cellules montées en série.

La puissance totale consommée par un électrolyseur, en W, est calculée par :

$$P = n_{nbcell} \times U \times I \quad \mathbf{I.19}$$

Où I est le courant en A, U la tension de cellule en V, et n_{nbcell} le nombre de cellules de l'électrolyseur.

D'après la loi de Faraday, la variation du nombre de moles d'une espèce i (Δn_i en mol s^{-1}) au cours du temps s'écrit :

$$\Delta n_i = I/nF \quad \mathbf{I.20}$$

Où F est la constante de Faraday (96485 C mol^{-1}) et n le nombre d'électrons de la réaction.

La consommation spécifique exprimée en kWh Nm^{-3} s'écrit :

$$S = P / \Delta n_{Tot i} = (2F.U) / 3600.V_m. n_{nbcell} \quad \mathbf{I.21}$$

Prenons comme exemple le stack développé dans le cadre du projet GenHyPEM montré sur la Figure 11. Pour un fonctionnement à $j=1$ A cm^{-2} et 2 V, le courant est de 250 A et la tension de 24 V soit une puissance de 6 kW en appliquant l'équation **I.19**. La quantité d'hydrogène produite pour une cellule de 250 cm^2 fonctionnant à 1 A cm^{-2} est de 0,1 $Nm^3 h^{-1}$ soit 1,2 $Nm^3 h^{-1}$ pour le module de 12 cellules. L'énergie à fournir à cet électrolyseur est d'environ 5 kWh $Nm^3 H_2$ (équation **I.21**).

I.1.4. Conclusion :

Ce chapitre introductif a permis de mettre en évidence l'importance de l'électrolyse PEM de l'eau dans un système énergétique basé sur l'hydrogène. Cependant, malgré ses avantages intrinsèques (compacité, maintenance quasi nulle, réponse immédiate à de forts appels de courant, pureté des gaz produits). La technologie d'électrolyse PEM ne s'imposera que si elle permet de produire de l'hydrogène à un coût compétitif.

Pour cela, il est nécessaire de réduire à la fois les coûts de fabrication des systèmes et le coût énergétique de la production d'hydrogène.

Chapitre II :

Electronique de puissance

Introduction

L'objectif principal de cet chapitre est de fournir une revue approfondie des convertisseurs AC-DC actuellement utilisés pour les électrolyseurs alcalins et à membrane échangeuse de protons (PEM) dans les réseaux électriques ou les systèmes de conversion d'énergie éolienne. Sur la base de la littérature actuelle.

ce chapitre vise à souligner les avantages et les inconvénients des convertisseurs AC-DC principalement basés sur des ponts redresseurs à thyristors et des redresseurs-hacheurs. L'analyse est principalement axée sur les problèmes actuels de ces convertisseurs en termes de consommation d'énergie spécifique, d'ondulation du courant, de fiabilité, d'efficacité et de qualité de l'énergie.

Il ressort de cette analyse que les redresseurs à base de thyristors sont particulièrement adaptés aux applications de haute puissance, mais qu'ils nécessitent l'utilisation de filtres actifs et passifs pour améliorer la qualité de l'alimentation. En comparaison, la combinaison de l'association hacheur-rectificateur peut éviter l'utilisation de filtres actifs et passifs encombrants puisqu'elle peut améliorer la qualité de l'alimentation. Cependant, l'utilisation d'un hacheur de base (c'est-à-dire un convertisseur buck) présente plusieurs inconvénients du point de vue de la fiabilité, du rendement énergétique, du rapport de tension et de l'ondulation du courant. Pour cette raison, de nouveaux convertisseurs DC-DC émergents doivent être utilisés pour répondre à ces questions importantes en fonction de la disponibilité de nouveaux dispositifs de commutation de puissance.

Enfin, sur la base de l'expérience des auteurs en matière de conversion de puissance pour les électrolyseurs PEM, une discussion est fournie concernant les défis futurs auxquels l'électronique de puissance doit faire face pour la production d'hydrogène vert basée sur des sources d'énergie renouvelables.

II.1. Convertisseurs AC-DC pour les applications d'électrolyseur

De nombreux types de convertisseurs AC-DC peuvent être utilisés pour alimenter les électrolyseurs alcalins et PEM en fonction de leurs exigences électriques du point de vue du courant et de la tension. D'après le tableau **II.1**, on peut noter que la tension requise pour la cellule peut varier de quelques volts à des centaines de volts, tandis que le courant est compris

entre 10 et des milliers d'ampères, en fonction de la puissance nominale de la cellule (c'est-à-dire de l'ordre du watt au mégawatt). Avant de choisir la bonne topologie de convertisseur AC-DC pour une application d'électrolyseur donnée, différentes exigences et spécifications doivent être prises en considération. Les principaux problèmes actuels des convertisseurs AC-DC sont résumés ci-dessous:

Specifications	Electrolyseur alcalin	Electrolyseur PEM
Temperature de la cellule	60-80°C	50-80°C
Pression	1-200bar	0-50bar
Densité de courant	0,2-0,4A.cm ⁻²	0,6-2,0A.cm ⁻²
Tension de La cellule	1.8-2.5V	1.8-2.2V
Rendement de la tension de la cellule(LHV ¹ ,	52-85%	57-83%

Tableau II.1: Etat de l'art des électrolyseurs alcalins et PEM.

1. Fournir un courant continu contrôlé pour gérer le débit d'hydrogène et l'efficacité énergétique de l'électrolyseur.
2. Interaction avec l'alimentation électrique du point de vue de la qualité de l'énergie (par exemple, facteur de puissance élevé, compensation de la puissance réactive).
3. Les harmoniques du courant d'entrée injectées dans l'alimentation en courant alternatif doivent répondre aux normes et exigences internationales.
4. Haute efficacité.
5. Haute fiabilité pour assurer une continuité de service en cas de défaillances électriques.
6. Faible ondulation du courant à basse et haute fréquence pour prolonger la durée de vie de l'électrolyseur tout en optimisant la consommation d'énergie spécifique.
7. Faible coût pour réduire le coût global du système.

Dans les sous-sections suivantes, plusieurs topologies AC-DC (redresseur non contrôlé, redresseur contrôlé à diode et à thyristor, et redresseur à pont de diodes connecté à un hacheur c.c.) sont présentées avec leurs avantages et leurs inconvénients. De plus, chaque topologie AC-

DC est discutée du point de vue de la qualité de l'énergie, de l'efficacité énergétique, de l'ondulation du courant, du coût, du contrôle et de la fiabilité. Cette analyse approfondie vise à mettre l'accent sur la topologie de convertisseur AC-DC la plus appropriée pour une application donnée (faible, moyenne ou forte puissance) et sur les défis restants pour surmonter certains problèmes pour les applications d'électrolyseur.

II.1.1. Redresseurs non commandés

Présenter les redresseurs à base de diodes non commandés (à 6 et 12 impulsions). Même si ces topologies AC-DC ne répondent pas à la première exigence du point de vue du contrôle du courant, considérée comme un point de départ pour mettre en évidence les avantages et les inconvénients avant de présenter les redresseurs à base de thyristors commandés (6 et 12 impulsions) et les convertisseurs AC-DC basés sur la combinaison d'un redresseur et d'un hacheur DC.

La technologie des convertisseurs AC-DC est motivée par les processus industriels dans les industries métallurgiques et chimiques. En commençant par les redresseurs électromécaniques et en passant par les redresseurs à arc au mercure, la disponibilité de commutateurs de puissance statiques à semi-conducteurs (diodes et thyristors, puis IGBT) a fait évoluer la technologie des redresseurs à tension continue variable vers des convertisseurs avec un redresseur frontal à bus continu fixe et un étage de commutation à haute fréquence.

Une étape supplémentaire consistera à adopter des redresseurs frontaux actifs. Les convertisseurs AC-DC non contrôlés présentés ci-après présentent une sortie à tension DC fixe ; en tout état de cause, les deux principales applications du redresseur à haute puissance (charges d'arc et électrolyseurs) nécessitent un régulateur de tension. En particulier, la caractéristique de charge des électrolyseurs, définie par la zone comprise entre la ligne de charge supérieure et la ligne de charge inférieure, est plus contraignante car la variation de tension est limitée.

Par rapport aux redresseurs à diodes monophasés, qui conviennent aux applications de faible et moyenne puissance, le redresseur à pont de diodes triphasé est particulièrement adapté aux applications de forte puissance (c'est-à-dire...), >15 kW) [20]. L'architecture de cette topologie est illustrée à la **figure II.1**. Elle est composée de six diodes. L'anode des diodes (c'est-à-dire D1 , D3 , et D5) est connectée à une phase du réseau électrique AC basé sur un transformateur en triangle triphasé. Dans une phase spécifique, la diode peut conduire si la tension alternative sur cette phase est supérieure à celle des deux autres phases. Par rapport au redresseur classique à pont de diodes monophasé, La valeur moyenne de la tension de sortie, $V_s \text{ moy}$, est donnée par l'expression suivante :

$$V_s \text{ moy} = \frac{3V_{\text{max}}\sqrt{3}}{\pi} \quad (\text{II.1.})$$

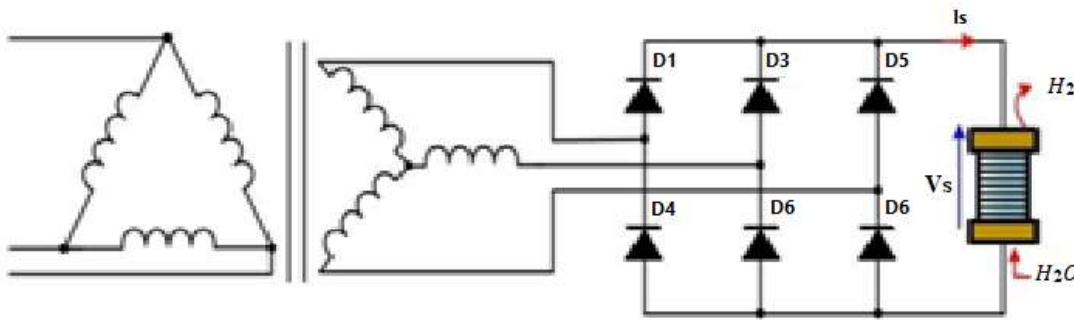


Figure II.1 : Pont redresseur à diodes à six impulsions.

Où V_{max} est la tension ligne-neutre maximale en (V). En ce qui concerne la valeur efficace de la tension de l'électrolyseur, elle est donnée par :

$$V_{\text{eff}} = V_{\text{max}} \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} \quad (\text{II.2.})$$

On peut noter que la valeur moyenne et la valeur RMS sont presque égales. Les principaux avantages de cette topologie sont son coût peu élevé, son bon rapport de redressement et son facteur de forme, son faible facteur d'ondulation (environ 4,2 %) et sa bonne efficacité énergétique due à la commutation à la fréquence de ligne. Comme l'ondulation de la tension de sortie est assez faible, aucun filtre supplémentaire n'est nécessaire. La fréquence de la tension de sortie est six fois plus élevée que la fréquence d'entrée. En outre, la qualité de l'alimentation en courant alternatif peut être assurée avec un bon facteur de puissance et un contenu harmonique de courant réduit. Cependant, cette topologie ne peut fournir qu'une tension et un courant de sortie constants pour alimenter l'électrolyseur, dont la valeur dépend des caractéristiques électriques de l'alimentation en courant alternatif et de l'électrolyseur

également. Si l'alimentation en courant alternatif était basée sur un système de conversion d'une éolienne, la tension de sortie du redresseur fluctuerait en fonction de la vitesse du vent. Pour cette raison, les redresseurs à diodes non contrôlés directement couplés à un électrolyseur ne sont pas envisagés pour cette application.

II.1.1.1. Redresseur à pont de diodes à 12 impulsions

Sur la base de la (**figure II.2**), présente un pont redresseur à diodes à 12 impulsions, composés de deux ponts redresseurs à diodes à six impulsions [21]. Au lieu d'utiliser un seul secondaire du transformateur (**figure II.2**), on utilise deux ponts de diodes à six impulsions. Des secondaires sont utilisés, l'un connecté en triangle (partie supérieure) et le second en étoile (partie inférieure). Les deux secondaires conduisent jusqu'à un décalage naturel de $\pi/6$ entre les tensions générées pour alimenter les deux ponts redresseurs à diodes à six impulsions connectés en parallèle. La configuration en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie ; tandis que la configuration en série permet d'augmenter la tension de sortie. Le choix de la configuration est guidé par les spécifications électriques de l'électrolyseur. Dans une configuration parallèle, un transformateur interphasé doit être utilisé. En effet, comme souligné dans le transformateur interphasé a pour but de faire en sorte que la tension de sortie, V_s , soit la moyenne des valeurs redressées v_1 et v_2 . La fréquence de la tension d'ondulation de sortie est 12 fois supérieure à la fréquence d'entrée. La tension moyenne et la tension efficace de sortie sont données respectivement par les expressions (**II.3**) et (**II.4**). D'autre part, dans une configuration en série, la valeur moyenne de la tension de sortie, V_s , est donnée par l'expression suivante :

$$V_s = V_{\max} \frac{12}{\pi} (\sqrt{3} - 1) / (2\sqrt{2}) \quad (\text{II.3.})$$

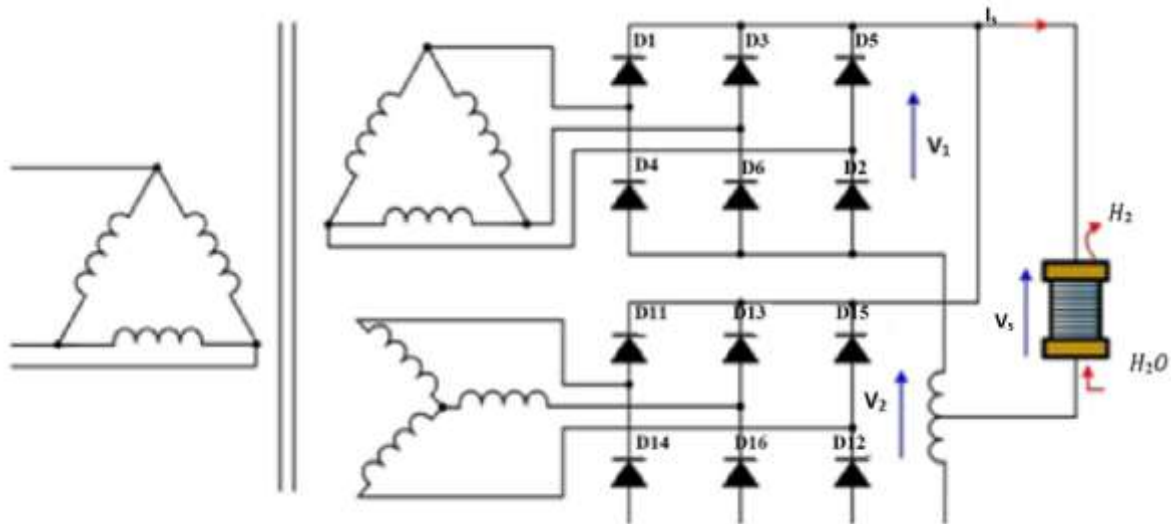


Figure II. 2 : Pont redresseur à diodes à 12 impulsions.

Concernant la valeur efficace de la tension de l'électrolyseur, elle est exprimée par :

$$V_s \text{ eff} = V_{\text{max}} \sqrt{\frac{12}{2\pi} * \left(\frac{\pi}{12} + \frac{1}{4}\right)} \quad (\text{II.4})$$

Par rapport à un pont redresseur à diodes classique à six impulsions, cette topologie offre :

- Un bon rapport de redressement.
- Un bon facteur de forme.
- Un faible facteur d'ondulation (environ 1%).
- De faibles pertes.

.En outre, du point de vue de la qualité de l'énergie, elle offre un bon facteur de puissance et un faible contenu harmonique du courant. Cependant, la complexité de la topologie conduit à une augmentation de son coût ainsi que de son volume.

II.1.1.2. Redresseur double étoile à diodes à six impulsions

Pour les applications basse tension, un redresseur double étoile à diodes à six impulsions peut être utilisé, comme le montre la figure **II.3**. Cette configuration est basée sur deux redresseurs triphasés en étoile dont les nœuds neutres sont interconnectés à un transformateur interphasé .Ce transformateur interphasé. A la même fonction que celle introduite pour le redresseur à pont de diodes à 12 impulsions. Le principal avantage de l'utilisation de cette configuration par rapport à la configuration classique de la (**figure II.4**) est la diminution du

courant moyen et du courant efficace de la diode (c'est-à-dire 50 % de moins). Par conséquent, une meilleure efficacité énergétique peut être obtenue.

II.1.1.3. Redresseur double-étoile à diode à 12 impulsions à une voie avec transformateurs interphasé

Sur la base du redresseur double étoile à diodes à six impulsions, deux peuvent être couplés en parallèle pour construire un redresseur double étoile à diodes à 12 impulsions, comme le montre la (figure II.4). les nœuds neutres des deux redresseurs à double étoile sont connectés en utilisant deux transformateurs interphases (c'est-à-dire des transformatrices interphasés). Un transformateur interphasé supplémentaire est utilisé pour relier les deux transformateurs interphasé et la polarité négative de l'électrolyseur.

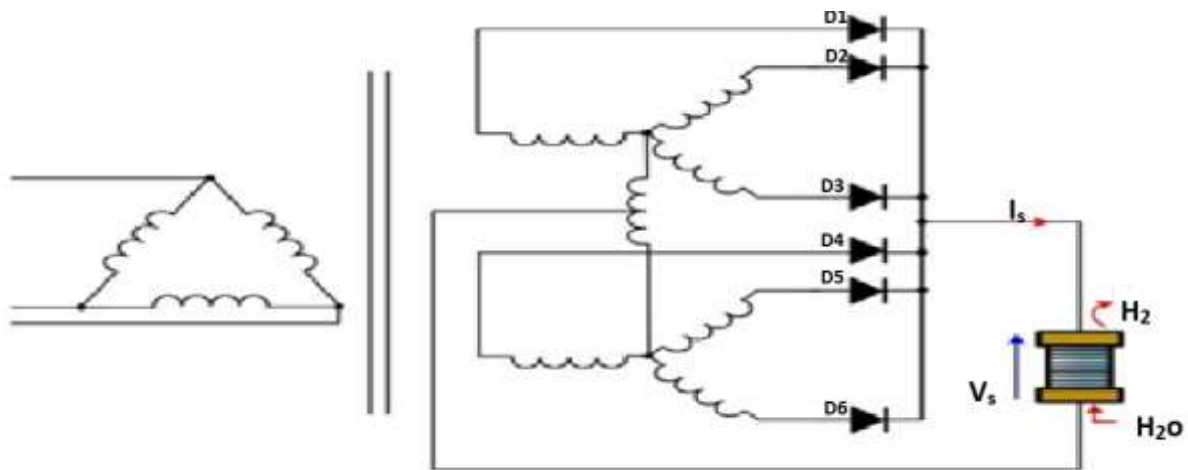


Figure II.3 : Redresseur double étoile à diodes à six impulsions.

Par rapport au redresseur double étoile à diodes à six impulsions, cette configuration offre un courant moyen et un courant efficace de diode inférieurs (c'est-à-dire inférieurs de 50 %). L'efficacité énergétique est donc améliorée. Cependant, la complexité du convertisseur le rend peu attrayant pour cette application.

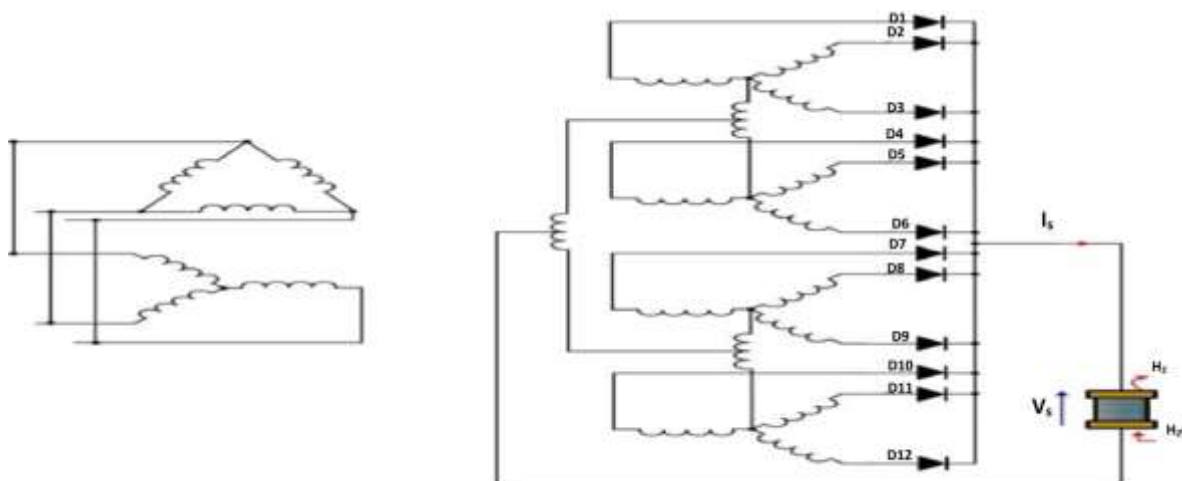


Figure II.4 : Redresseur double étoile à diodes à 12 impulsions à une voie avec transformateurs interphases d'interface.

II.1.2. Redresseurs commandés

A l'heure actuelle, les redresseurs à base de thyristors dominent le marché des applications industrielles où une tension et un courant élevés sont nécessaires pour alimenter les électrolyseurs [22,23]. Par rapport aux redresseurs à diodes, l'utilisation de thyristors permet de délivrer un courant contrôlé, nécessaire pour gérer le débit d'hydrogène et l'efficacité énergétique de l'électrolyseur lors du couplage avec des sources d'énergie renouvelables. D'une part, le contrôle des redresseurs à base de thyristors s'effectue par leur angle d'amorçage. Si leur angle d'amorçage est inférieur à $\pi/2$, le redresseur fonctionne en mode redresseur ; alors que pour un angle d'amorçage compris entre $\pi/2$ et π , le redresseur fonctionne en mode onduleur. Cependant, en contrôlant le redresseur par les angles d'allumage, cela conduit à l'augmentation du contenu harmonique du courant et à une diminution du facteur de puissance due à la génération de puissance réactive [24]. L'amélioration de la qualité de l'énergie pour les redresseurs à base de thyristors est un défi. Pour cette raison, la compensation de la puissance réactive générée est obligatoire pour augmenter le facteur de puissance. Les différents types de redresseurs à base de thyristors sont présentés et discutés du point de vue de la qualité de la puissance.

II.1.2.1. Redresseur à pont à thyristor à six impulsions

Un pont redresseur à thyristors à six impulsions est représenté sur la **figure II.5**, où les diodes sont remplacées par des thyristors pour obtenir une tension de sortie continue variable pour alimenter l'électrolyseur. En négligeant les éléments parasites des thyristors et en

considérant un courant continu constant, la valeur moyenne de la tension de sortie, V_s , est donné par l'expression suivante en fonction de l'angle d'amorçage α :

$$V_s = 3v_{\max} \frac{\sqrt{3}}{\pi} * \cos \alpha \quad (\text{II.5.})$$

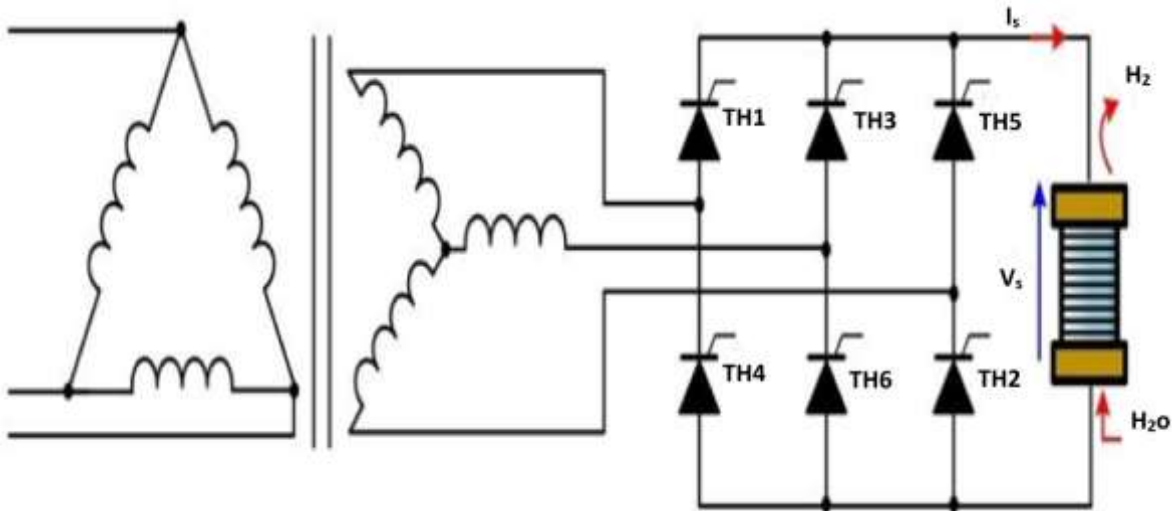


Figure II.5 : Pont redresseur à thyristors à six impulsions.

D'après l'équation (II.5), la tension de sortie continue maximale ($V_s = 538 \text{ V}$ si $V_{\text{eff}} = 230 \text{ V}$) est obtenue pour $\alpha = 0^\circ$, fournissant la même tension de sortie qu'un redresseur à pont de diodes à six impulsions. Plus l'angle d'amorçage est élevé, plus la tension de sortie continue est faible. Pour maintenir un fonctionnement en mode redresseur, l'angle d'amorçage ne peut être supérieur à $\alpha = 90^\circ$.

Malgré le fait que ce pont redresseur à thyristors à six impulsions offre un rendement énergétique élevé et un courant contrôlé, il souffre de différents inconvénients en termes de qualité de puissance et d'ondulation du courant. En effet, la génération de puissance réactive est directement liée à l'angle d'amorçage. Plus l'angle d'allumage n'est élevé, plus le contenu harmonique du courant est important, ce qui diminue drastiquement le facteur de puissance du système. De plus, selon les travaux rapportés dans, cette topologie a un facteur d'ondulation élevé, entre 14% et 71%, dépendant fortement de la gamme de charge. Plus la charge est élevée, plus l'ondulation du courant est faible. Pour cette raison, le fonctionnement à faible charge doit être évité. Cependant, l'amélioration de la qualité de l'énergie reste une question clé. Dans, les auteurs ont démontré qu'une ondulation de courant élevée augmente la consommation d'énergie spécifique, ce qui signifie qu'une quantité d'hydrogène inférieure est

produite à partir de la même quantité d'énergie d'entrée. L'ondulation du courant a également une influence sur la qualité du gaz d'hydrogène généré par les électrolyseurs. L'ondulation du courant peut être réduite en utilisant des filtres passifs (c'est-à-dire une inductance, un condensateur) situés entre le redresseur et l'électrolyseur, et/ou en utilisant d'autres convertisseurs AC-DC (par exemple, un redresseur à thyristor à 12 impulsions, des redresseurs plus un hacheur DC). Des filtres passifs de sortie ont été introduits dans. D'autre part, pour améliorer le facteur de puissance en compensant la puissance réactive, différentes solutions ont été proposées dans la littérature. Ce redresseur génère des harmoniques de rang impair (c'est-à-dire 5, 7, 11, 13, 17, etc.). La solution la plus répandue consiste à utiliser des filtres passifs (côté alimentation en courant alternatif), qui sont conçus et réglés pour annuler une fréquence harmonique spécifique. Une autre solution consiste à utiliser des STATCOMs (c'est-à-dire des compensateurs statiques) ou des DSTATCOMs (c'est-à-dire des compensateurs statiques de distribution) [25]. Cette solution est adaptée à la compensation de la puissance réactive variable. Cependant, l'utilisation de ces dispositifs entraîne une augmentation du coût et des pertes. Pour surmonter le problème du coût.

II.1.2.2. Redresseur à pont de thyristors à 12 impulsions

Pour faire face aux problèmes de qualité de l'énergie et d'ondulation du courant, un pont redresseur à thyristors à 12 impulsions peut être utilisé comme le montre la (**figure II.6**). Il est représenté dans une configuration parallèle avec un transformateur interphasé pour augmenter le courant de sortie mais peut être configuré en série pour augmenter la tension de sortie. Les deux secondaires sont couplés soit en triangle (partie supérieure) soit en étoile (partie inférieure). Les deux secondaires offrent un décalage naturel de $\pi/6$ entre les tensions générées. Dans une configuration parallèle, cette topologie est particulièrement adaptée aux électrolyseurs nécessitant un courant élevé comme rapporté dans le **tableau 1**.

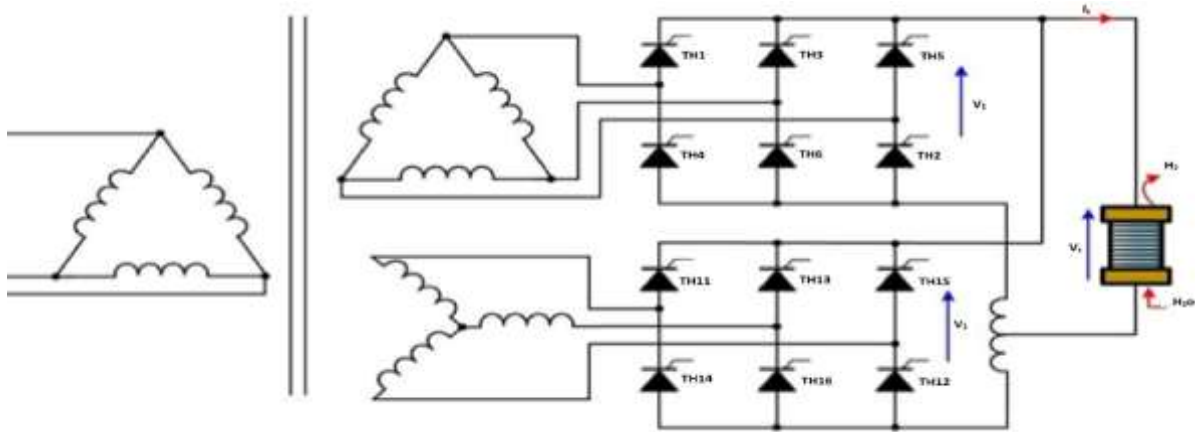


Figure II.6 : Pont redresseur à thyristors à 12 impulsions.

Cette topologie présente plusieurs avantages par rapport au redresseur à pont de thyristors à six impulsions du point de vue de la qualité de l'énergie et de l'ondulation du courant. En effet, d'une part, comme souligné dans, le facteur d'ondulation est plus faible, entre 3.2% et 4.8% selon la gamme de charge. Ainsi, la consommation d'énergie spécifique est plus faible et la qualité de l'hydrogène produit est meilleure. D'autre part, malgré la réduction de la consommation d'énergie spécifique, celle-ci reste supérieure à la référence de consommation d'énergie spécifique en courant continu pur. Enfin, un pont redresseur à thyristors à 12 impulsions permet d'éliminer les harmoniques de rang impair, réduisant ainsi la puissance réactive et augmentant le facteur de puissance. Un filtre hybride composé d'un filtre passif shunt et d'un DSTATCOM a été proposé et discuté dans. Grâce à ce filtre hybride, un facteur de puissance d'entrée de 0,98 et un faible THD (distorsion harmonique totale) de 4,8% sont obtenus.

II.1.2.3. Redresseur double étoile à thyristor à six impulsions

Pour les applications à courant élevé et pour éliminer les harmoniques, on peut utiliser un redresseur double étoile à thyristors à six impulsions, comme le montre la figure II.7. Les deux redresseurs à thyristors sont décalés de 180° , et leurs nœuds neutres secondaires sont interconnectés par un transformateur interphase. Ce dernier est connecté entre les deux nœuds neutres secondaires et la polarité négative de l'électrolyseur. Le principal avantage de l'utilisation de ce redresseur à double étoile par rapport à la configuration de base de la figure 8 est la diminution du courant moyen et du courant efficace du thyristor (c'est-à-dire 50 % de moins) ainsi que de l'ondulation du courant de sortie. Par conséquent, la consommation

d'énergie spécifique est améliorée et la qualité de l'hydrogène produit est optimisée. Du point de vue de la qualité de l'énergie, par la réduction du courant contenu harmonique, la qualité de l'énergie peut être améliorée.

II.1.2.4. Redresseur double étoile à thyristor à 12 impulsions avec transformateurs interphasés

À partir de la configuration du redresseur double étoile à thyristors à six impulsions, deux peuvent être connectés en parallèle pour obtenir un redresseur double étoile à diodes à 12 impulsions, comme le montre la figure. Les quatre redresseurs à thyristors sont décalés de 90° , et leurs nœuds neutres secondaires sont connectés à l'aide de deux transformateurs interphasés. Un transformateur interphasé supplémentaire permet d'interconnecter les deux transformateurs interphasés et la polarité négative de l'électrolyseur. Cette configuration se caractérise par un courant moyen et un courant efficace du thyristor inférieurs (c'est-à-dire 50 % inférieurs) à ceux du redresseur double étoile à thyristors à six impulsions. En raison du déphasage de 90° entre les quatre redresseurs à thyristors, l'ondulation du courant de sortie est très faible, ce qui permet d'optimiser la consommation d'énergie spécifique et la qualité du gaz. Enfin, la puissance réactive peut être compensée, améliorant ainsi la qualité du courant.

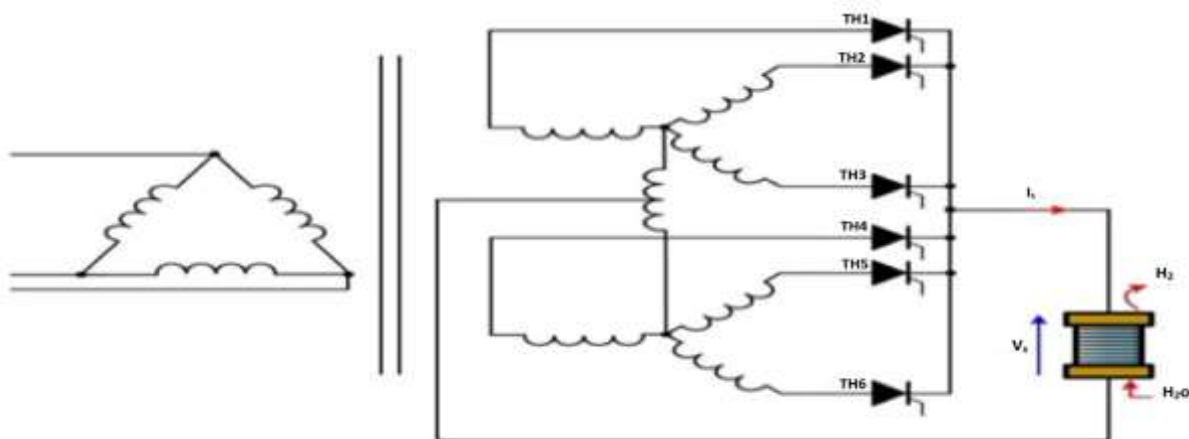


Figure II.7 : Redresseur double étoile à thyristor à six impulsions.

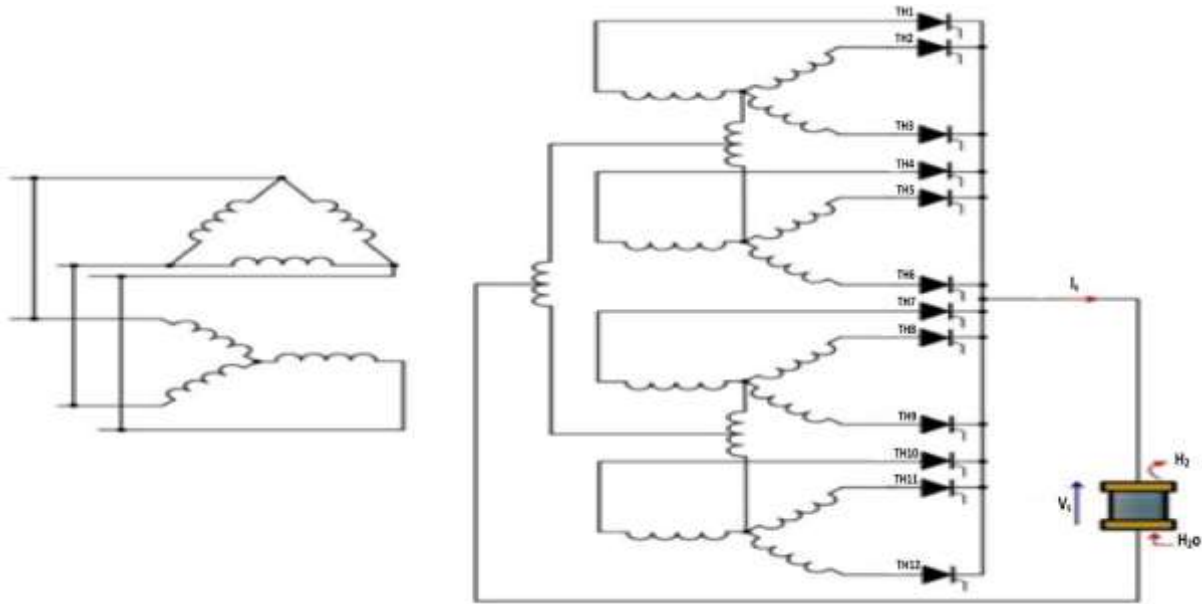


Figure II.8 : Redresseur double étoile à thyristor à 12 impulsions avec transformateurs
Interphasés d'interface.

II.1.3. Convertisseurs AC-DC : Redresseur-Copper

Après avoir présenté les différents types de redresseurs à base de thyristors et les solutions pour améliorer la qualité de l'énergie et réduire l'ondulation du courant de sortie, les convertisseurs AC-DC basés sur la combinaison d'un redresseur à diodes et d'un hacheur DC ont beaucoup à offrir. En effet, cette combinaison permet d'améliorer le facteur de puissance sans utiliser d'encombrants filtres passifs à faible taux d'harmoniques et autres solutions, ce qui la rend plus rentable. En général, il comprend un pont redresseur à diodes à six impulsions (**figure II.1**) fournissant une tension continue pour alimenter un convertisseur DC-DC abaisseur classique (c'est-à-dire Buck). Le contrôle du courant est réalisé par le convertisseur abaisseur pour gérer le débit d'hydrogène et l'efficacité énergétique de l'électrolyseur. Dans la sous-section suivante, différentes combinaisons de redresseurs et de bouchons sont présentées. Ils sont présentés et discutés en termes de qualité de l'énergie, de coût, d'efficacité énergétique, de fiabilité et d'ondulation du courant. Les circuits suivants permettent une fréquence de commutation beaucoup plus élevée que la fréquence de ligne ; pour cette raison, les éléments réactifs ont des valeurs plus petites et, en général, la dynamique du convertisseur est plus rapide. Avec un circuit de contrôle approprié, il est possible d'obtenir une rétroaction sur la tension et le courant de sortie. En général, ces convertisseurs présentent une réponse dynamique en boucle fermée plus rapide que la source, l'électrolyseur. D'autre part, la

dynamique des électrolyseurs influence en général la fonction de transfert à petit signal du convertisseur et, par conséquent, sa stabilité.

II.1.3.1. Redresseur à pont de diodes à six impulsions avec un convertisseur Buck

Les convertisseurs suivants fonctionnent sur la base d'un bus DC à tension fixe et d'un étage de conversion à commutation haute fréquence. Le transformateur d'entrée peut être adopté en fonction de la puissance et de la distribution du réseau (BT ou MT). L'ondulation résiduelle du bus continu sur la tension de sortie peut être éliminée par un choix approprié du système de contrôle de l'étage de conversion à découpage. La figure II.9 montre la combinaison classique d'un pont redresseur à diodes à six impulsions connecté à un convertisseur DC-DC abaisseur. Pour convertir la tension AC en tension DC, un pont redresseur à diodes à six impulsions est utilisé, ce qui permet de fournir une tension DC moyenne conforme à la spécification de tension de l'alimentation AC (c'est-à-dire le réseau électrique). Cette tension continue moyenne est donnée par l'équation (II.6). Étant donné que le redresseur à pont de diodes triphasé ne peut pas être contrôlé en raison de l'utilisation de diodes, un convertisseur DC-DC abaisseur doit être utilisé pour contrôler le courant à travers l'interrupteur de puissance unique (c'est-à-dire l'IGBT) du point de vue du débit d'hydrogène et de l'efficacité énergétique. Comme un convertisseur DC-DC abaisseur comprend peu de composants, son coût est réduit.

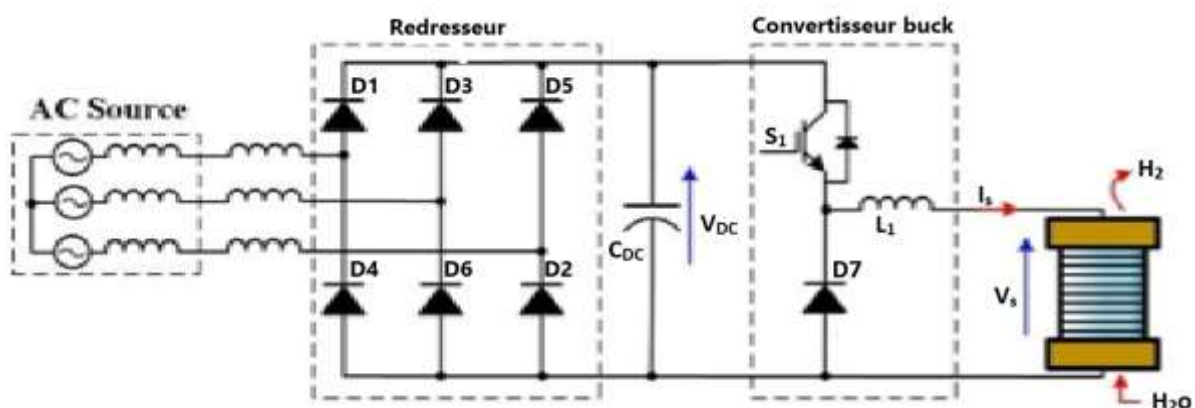


Figure II.9 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck.

La tension de sortie du convertisseur abaisseur en négligeant les éléments parasites est exprimée Par $V = DV_{dc}$ où D est le rapport cyclique du commutateur de puissance $S1$

(défini comme le rapport entre son temps de conduction et la période de commutation), compris entre 0 et 1 ; tandis que V_{DC} est la tension continue de sortie du redresseur. Le condensateur C_{DC} permet de lisser l'ondulation de la tension.

L'ondulation du courant de sortie ΔI_S est donnée par :

$$\Delta I_S = DV_{dc}(1-D)/L_1 f_s \quad (\text{II.6.})$$

Où L_1 est l'inductance en (H) et f_s est la fréquence de commutation en (Hz) du convertisseur. on peut noter que plus l'inductance et la fréquence de commutation sont élevées, plus l'ondulation du courant est faible. Une faible ondulation du courant est l'une des caractéristiques les plus importantes des électrolyseurs pour optimiser leur consommation d'énergie spécifique et leur fiabilité. D'une part, lorsque l'on augmente l'inducteur il entraîne un coût et un volume plus élevés. On peut noter que la totalité du courant I_S traverse l'inducteur, ce qui constitue une limite de conception pour les électrolyseurs à courant élevé. Une faible valeur de L peut être adoptée pour augmenter la fréquence de commutation. D'un autre côté, plus la fréquence de commutation est élevée, plus les pertes de commutation sont importantes. Pour cette raison, un compromis doit être trouvé pour optimiser l'efficacité énergétique tout en réduisant l'ondulation du courant.

Différentes solutions ont été proposées pour diminuer les pertes de commutation, telles que l'utilisation de techniques de commutation douce et de semi-conducteurs à large bande interdite. Comme un convertisseur DC-DC abaisseur permet de diminuer la tension, des courants élevés peuvent être obtenus en optimisant l'efficacité énergétique. Cette topologie souffre d'avoir une tension élevée pour les applications de haute puissance.

De plus, le niveau de puissance est limité en raison de l'utilisation d'un seul commutateur de puissance. Du point de vue de la fiabilité, le convertisseur n'est pas tolérant aux pannes en cas de défaillance d'un commutateur de puissance. Une autre caractéristique importante de cette topologie est la réponse dynamique rapide du courant due à la fréquence de commutation élevée (c'est-à-dire >20 kHz) par rapport à la fréquence habituelle des redresseurs à thyristors (environ quelques kHz). Du point de vue de la qualité de l'énergie, une valeur élevée du condensateur C_{dc} est nécessaire pour minimiser l'ondulation due au fait que le redresseur implique un courant en forme d'impulsion. La génération de puissance réactive peut être réduite tout en améliorant le facteur de puissance. Pour améliorer encore le facteur de puissance, des filtres passifs peuvent être utilisés du côté de l'alimentation électrique.

II.1.3.2. Redresseur à pont de diodes à six ou douze impulsions avec un convertisseur Buck triphasé

Pour diminuer l'ondulation du courant de sortie, un redresseur à pont de diodes à six impulsions connecté à un convertisseur Buck triphasé entrelacé entre deux phases est utilisé. Le convertisseur buck à phases entrelacées est illustré à la (figure II.10). Le choix de trois phases permet d'obtenir un compromis entre l'ondulation du courant de sortie et la réduction du volume, le rendement énergétique et la fiabilité en cas de défaillance des commutateurs de puissance. L'amélioration du rendement est principalement due au partage du courant I_s entre de nombreuses inductances puisque les pertes Joule dans la résistance parasite dépendent du carré du courant.

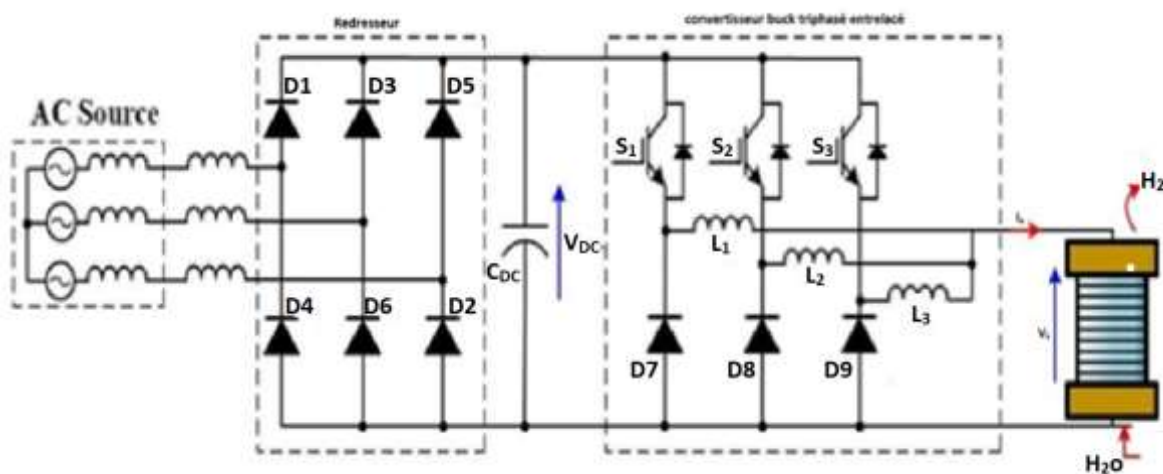


Figure II.10 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck triphasé entrelacé.

Chaque commutateur de puissance (c'est-à-dire S_1 , S_2 et S_3) est commandé avec un angle de déphasage de 120° , ce qui réduit l'ondulation du courant de sortie et le volume des inductances. La tension de sortie V_s est donnée par l'équation (12). En fonction de la valeur du rapport cyclique, l'ondulation du courant de sortie est exprimée par les expressions suivantes :

$$\Delta s = V_s D (1-3D)/L_{fs} \quad , \quad 0 < D < 1/3 \quad \text{(II.7.)}$$

$$\Delta s = V_s D (1-3D) (2-2D)/3L_{fs} \quad , \quad 0 < D < 2/3 \quad \text{(II.8.)}$$

$$\Delta s = V_s (3D-2) D/L_{fs} \quad , \quad 3/2 < D < 1 \quad \text{(II.9.)}$$

A partir des équations (II.7)-(II.8), on peut noter que l'ondulation du courant de sortie est annulée pour des cycles d'utilisation spécifiques (c'est-à-dire 1/3 et 2/3). En outre, par rapport à un convertisseur DC-DC abaisseur classique, un Le convertisseur hacheur triphasé entrelacé peut continuer à alimenter l'électrolyseur sans aucune interruption en cas de défaillance d'un commutateur de puissance grâce à sa redondance statique. Cependant, il entraîne des contraintes de courant supplémentaires et une ondulation de courant plus élevée en raison d'un angle de déphasage inadéquat. Pour surmonter ce problème, l'angle de déphasage doit être modifié à 180° pour faire fonctionner le convertisseur comme un convertisseur hacheur entrelacé à deux phases. Même si cette topologie souffre d'un gain de conversion limité et d'une tension élevée, elle est particulièrement adaptée aux applications de forte puissance en raison du partage du courant d'entrée entre les phases. L'efficacité énergétique peut être améliorée par rapport à un convertisseur hacheur classique, mais les pertes sont particulièrement importantes à faible tension continue d'entrée en raison de la valeur élevée du rapport cyclique. Plus le rapport cyclique est élevé, plus le rendement énergétique est faible.

Comme cette topologie nécessite des éléments supplémentaires, le coût est généralement plus élevé qu'un convertisseur abaisseur classique, même dans ce dernier cas si la disponibilité et le coût d'une seule inductance peuvent orienter le concepteur vers la topologie entrelacée. Enfin, un convertisseur buck entrelacé triphasé offre les mêmes avantages du point de vue de la qualité de l'alimentation. Pour les applications à courant élevé, le redresseur à six impulsions peut être remplacé par un pont redresseur à diodes à 12 impulsions (comme le montre la (figure II.11), mais cela entraîne un coût et un volume supplémentaires.

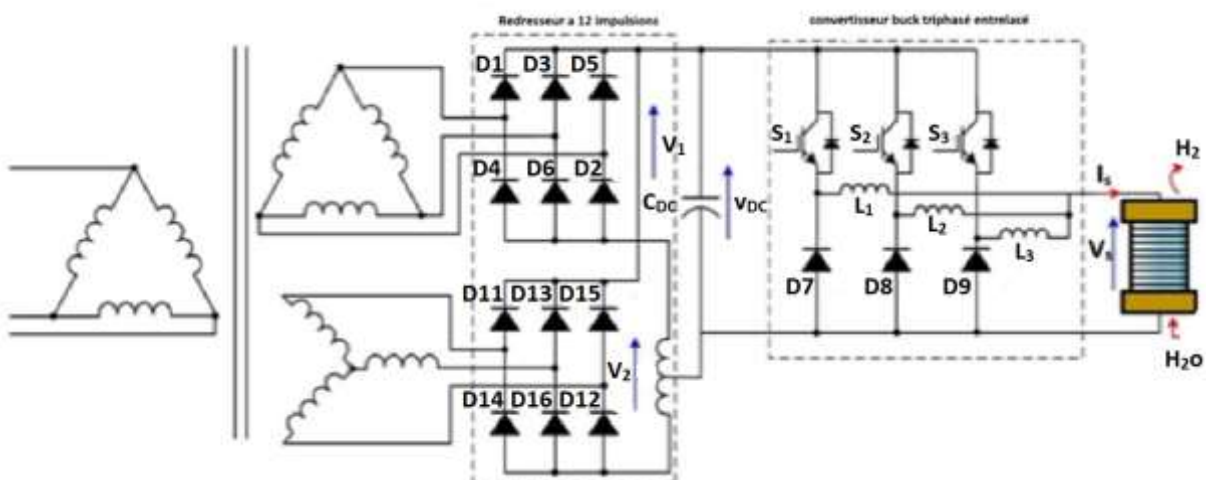


Figure II.11. Pont redresseur à diodes à 12 impulsions avec un convertisseur hacheur triphasé

II.1.3.3. Redresseur à pont de diodes à six impulsions avec un convertisseur Buck entrelacé à deux phases

Une autre configuration intéressante consiste à coupler un redresseur à pont de diodes à six impulsions avec un convertisseur Buck à deux phases. Convertisseur hacheur intercalé empilé biphasé (SIBC), comme le montre la (**figure II.12**). Il a été introduit pour la première fois pour contrôler l'électrolyseur en fonction de la puissance disponible d'un système de conversion par éolienne. Les diodes sont remplacées par des IGBT pour réduire les pertes par conduction, car les résistances à l'état passant des IGBT sont plus faibles que celles des diodes ; pour les applications à faible puissance, les MOSFET peuvent également être adoptés. En outre, un condensateur supplémentaire C_s est utilisé entre la première et la deuxième phase pour bloquer la composante continue du courant circulant dans la deuxième phase (c'est-à-dire s). Par conséquent, seule la composante alternative du courant circule dans la deuxième phase. Le couple d'IGBT (c'est-à-dire S_1, S_4 , et S_2, S_3) est commandé de manière opposée (au lieu de 180° pour un convertisseur hacheur entrelacé à deux phases). Ainsi, les deux composantes alternatives du courant circulant dans la première et la deuxième phase peuvent être annulées. Seul un courant continu pur circule dans l'électrolyseur, quelles que soient les conditions de fonctionnement, ce qui optimise sa fiabilité et son efficacité énergétique.

Du point de vue de la fiabilité, le SIBC peut continuer à fonctionner même en cas de défaillance d'un commutateur de puissance. Cependant, l'ondulation du courant est plus élevée. Le SIBC présente les mêmes inconvénients qu'un convertisseur buck entrelacé à trois branches, notamment les pertes à faible tension continue d'entrée. Enfin, un bon facteur de puissance peut être assuré ; en ce qui concerne la qualité de l'alimentation en courant alternatif, elle est influencée par le courant en forme d'impulsion. C'est le défi futur dont le chemin passe par de nouvelles topologies de redresseurs actifs.

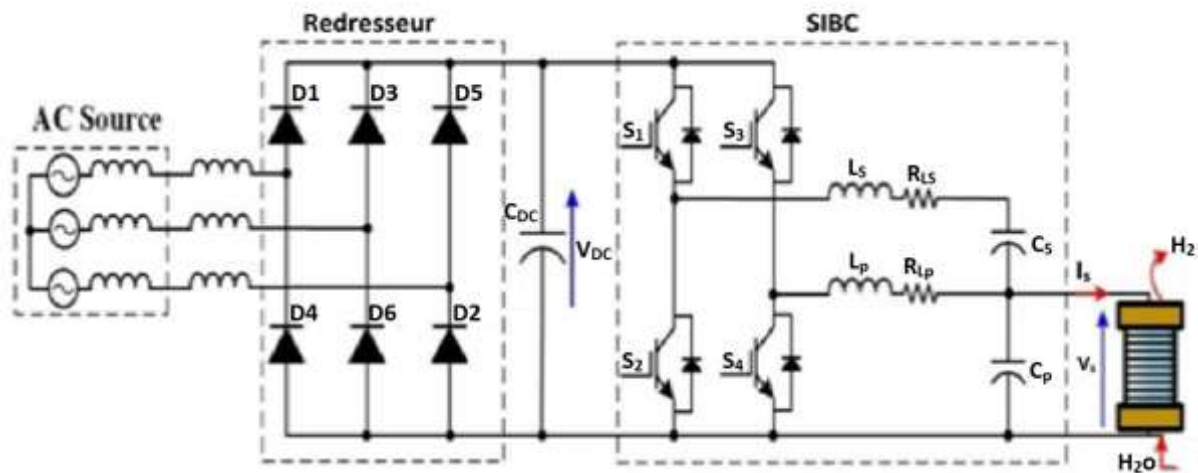


Figure II.12 : Pont redresseur à diodes à six impulsions avec un convertisseur buck entrelacé à deux phases.

II.1.4. Discussion et défis futurs

Actuellement, les convertisseurs AC-DC basés sur un redresseur à thyristor ou à diode et un hacheur de courant continu sont principalement utilisés pour alimenter les électrolyseurs alcalins et PEM. Pour les applications à courant élevé, particulièrement rencontrées pour les électrolyseurs alcalins, les redresseurs à base de thyristors dominent le marché, y compris les applications industrielles et les applications d'alimentation en gaz. Bien que ces redresseurs soient des technologies matures offrant un rendement énergétique élevé, une grande fiabilité et un bon contrôle du courant, ils souffrent d'une dégradation de la qualité de l'énergie du côté alternatif en injectant de la puissance réactive et en présentant une ondulation élevée du courant.

La génération de puissance réactive est due à l'angle d'allumage pour contrôler le thyristor. En revanche, l'ondulation élevée du courant augmente les pertes dans l'électrolyseur et, par conséquent, la consommation d'énergie spécifique. Le redresseur à base de thyristor à 12 impulsions permet d'augmenter la tension de sortie et le courant grâce à la connexion en série ou en parallèle de deux redresseurs à base de thyristor à six impulsions. Bien qu'il puisse améliorer la qualité de l'alimentation et réduire l'ondulation du courant de sortie, le volume et le coût restent des préoccupations majeures. Pour améliorer la qualité de l'énergie et réduire l'ondulation du courant de sortie, des filtres passifs et des filtres actifs. Cependant, ces solutions augmentent la complexité du système, le coût et le volume. Pour choisir la topologie la plus appropriée en fonction des exigences électriques de l'électrolyseur, une comparaison de la tension continue de sortie en fonction de l'angle d'allumage est présentée à la (**figure**

II.13). Elle est calculée en considérant un rapport de transformation unitaire alimenté par le réseau basse tension.

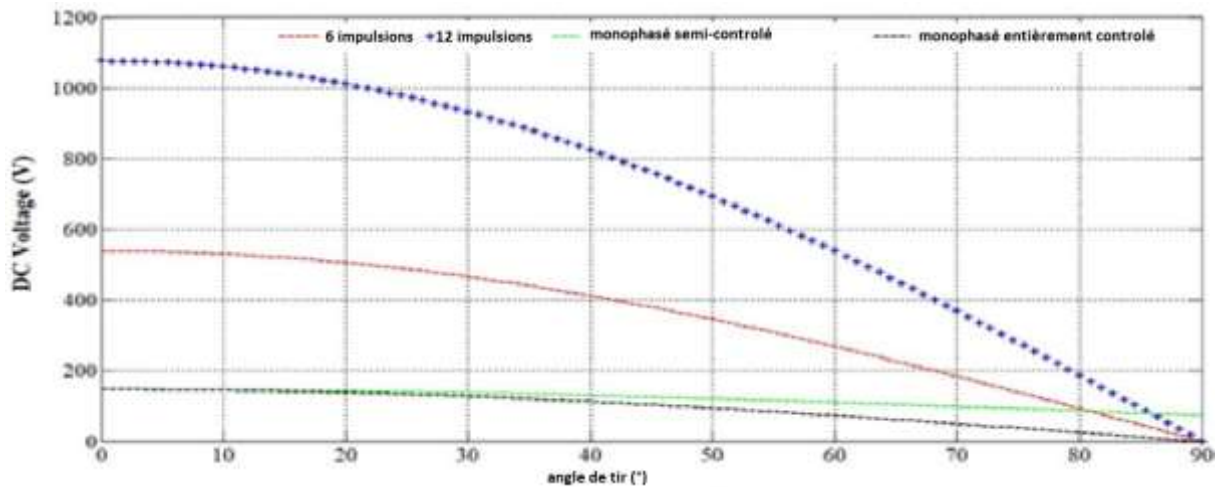


Figure II.13. Comparaison de la tension continue de sortie en fonction de l'angle d'allumage. Diodes) et entièrement commandés (thyristors).

Dans la (figure II.5), on a considéré des redresseurs à thyristors à six impulsions (figure II.6) et à 12 impulsions, ainsi que des redresseurs monophasés semi-commandés (thyristors). Il convient de noter que les redresseurs à thyristors à 12 impulsions sont particulièrement adaptés aux applications à haute tension et à courant élevé, tandis que les redresseurs à thyristors à 6 impulsions conviennent mieux aux applications de moyenne puissance. Quant aux redresseurs monophasés à thyristors, ils sont destinés aux applications de faible puissance. Pour faire face à l'utilisation de filtres actifs et passifs pour améliorer la qualité de l'énergie et réduire l'ondulation du courant de sortie, la combinaison d'un redresseur à diodes à six impulsions connecté à un hacheur de courant continu est une alternative intéressante. En effet, elle permet d'améliorer la qualité de l'énergie en diminuant le contenu harmonique du courant d'entrée. De plus, grâce au convertisseur DC-DC hacheur, le courant de l'électrolyseur peut être contrôlé en offrant de meilleures réponses dynamiques, particulièrement adaptées lorsque l'électrolyseur est couplé à un système de conversion d'une éolienne. En considérant un pont redresseur à diodes à six impulsions, dont la tension de sortie DC est inférieure à 600 V (Figure II.1), les applications de faible et moyenne puissance sont envisagées puisque le convertisseur DC-DC hacheur permet de diminuer cette tension de sortie pour alimenter l'électrolyseur. Cependant, une petite différence entre la tension d'entrée et la tension de sortie du convertisseur DC-DC abaisseur conduit à plus de pertes et à des réductions conséquentes

de l'efficacité énergétique en raison du fonctionnement à haut rapport cyclique. En outre, les convertisseurs DC-DC hacheur classiques ne sont pas fiables en cas de défaillance des commutateurs de puissance et génèrent une ondulation de courant plus importante pour une petite inductance. Pour faire face à ces deux problèmes, des convertisseurs hacheur entrelacés peuvent être utilisés, améliorant la disponibilité du convertisseur en cas de défaillances électriques et diminuant l'ondulation du courant de sortie. Par rapport au convertisseur hacheur entrelacé classique, un convertisseur hacheur entrelacé empilé peut annuler l'ondulation du courant de sortie pour n'importe quelle condition de fonctionnement. Cependant, l'utilisation de ces topologies est limitée par leur rapport d'abaissement et leur contrainte de tension élevée. Pour répondre à ces problèmes, dans un convertisseur hacheur DC-DC entrelacé à trois niveaux peut être utilisé, interfaçant un système de conversion d'énergie éolienne et un électrolyseur (**Figure II.14**).

En effet, la contrainte de tension sur les dispositifs électroniques de puissance peut être réduite tout en conservant une faible ondulation du courant de sortie, ce qui améliore le rapport de réduction, la fiabilité et le rendement énergétique élevé. Lors du couplage de systèmes de conversion de l'énergie éolienne avec des électrolyseurs, les architectures multi-piles ont beaucoup à offrir, notamment du point de vue de la gestion de l'énergie. Deux configurations différentes peuvent être utilisées, à savoir l'architecture en série (**figure II.15**) et l'architecture en parallèle (**figure II.16**). Dans la (**Figure II.18**), en fonction de la puissance disponible de l'éolienne, la puissance peut être partagée entre les électrolyseurs par l'utilisation de commutateurs et de diodes de dérivation. En outre, les commutateurs peuvent être utilisés pour isoler un empilement d'électrolyseurs défectueux, tandis que les commutateurs sont utilisés pour dévier le chemin du courant de l'électrolyseur si l'un des empilements est défectueux. Les diodes doivent être choisies pour résister au courant de l'électrolyseur afin d'éviter leur destruction. Ainsi, la diode de dérivation peut assurer la continuité de service du système multi-piles. Cependant, la simplicité de l'architecture entraîne des faiblesses.

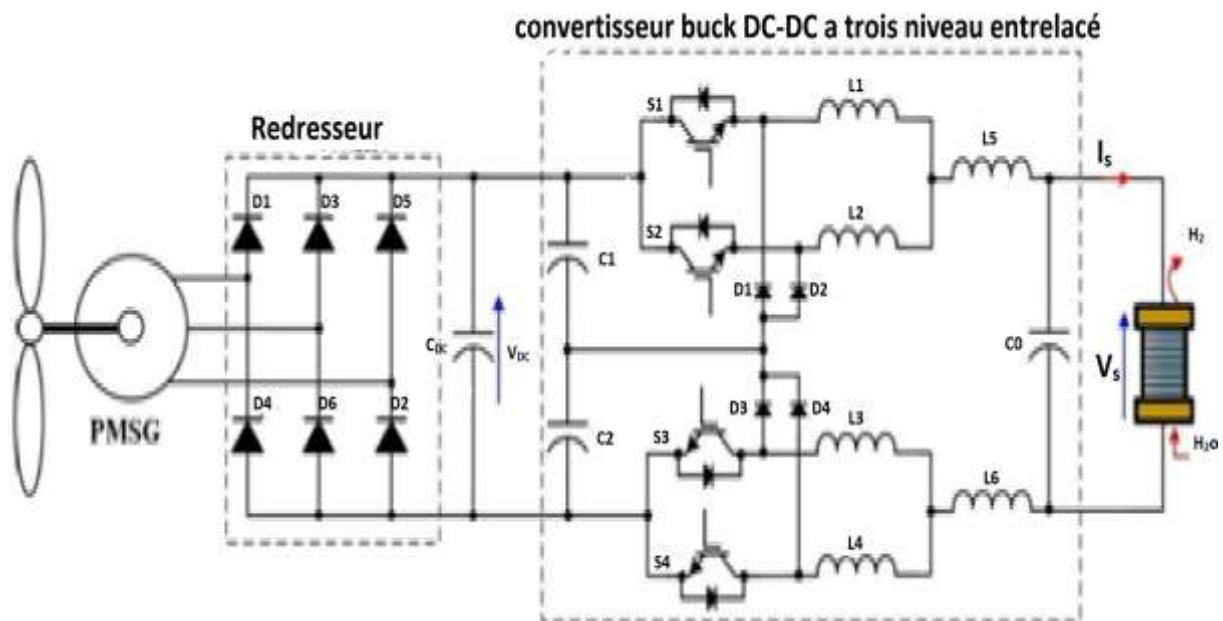


Figure II.14. Voie de production d'hydrogène basée sur un système de conversion de l'énergie éolienne et un convertisseur hacheur DC-DC à trois niveaux entrelacés.

En effet, les électrolyseurs ne peuvent pas être contrôlés séparément et le rendement énergétique de l'électrolyseur est plus faible en raison de l'augmentation de la tension de sortie. D'un autre côté, en choisissant un autre Avec une topologie de convertisseur DC-DC telle que le convertisseur hacheur entrelacé à trois niveaux (**Figure II.17**), l'augmentation de la tension de sortie conduit à une meilleure efficacité énergétique en raison de sa faible conversion en tension abaissée. En comparaison, la configuration parallèle permet de contrôler chaque pile d'électrolyseurs par le biais du convertisseur DC-DC connecté au bus DC. Dans ce cas, l'efficacité énergétique des convertisseurs DC-DC est optimisée grâce à des cycles de service plus faibles. Cependant, cette architecture est plus coûteuse en raison de l'utilisation de plusieurs convertisseurs DC-DC. En fonction de la puissance disponible, les convertisseurs DC-DC sont contrôlés pour alimenter l'électrolyseur à la puissance nominale afin d'optimiser à la fois l'efficacité énergétique et le débit d'hydrogène. Toutes les topologies mentionnées ci-dessus, conçues pour coupler directement un électrolyseur avec un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) alimenté par une éolienne, adoptent des redresseurs à diodes non commandés qui sont des solutions rentables ; dans tous les cas, elles peuvent introduire des pulsations à basse fréquence avec une possible résonance mécanique de l'arbre. Pour cette raison, les redresseurs actifs deviennent également intéressants pour les applications de faible puissance.

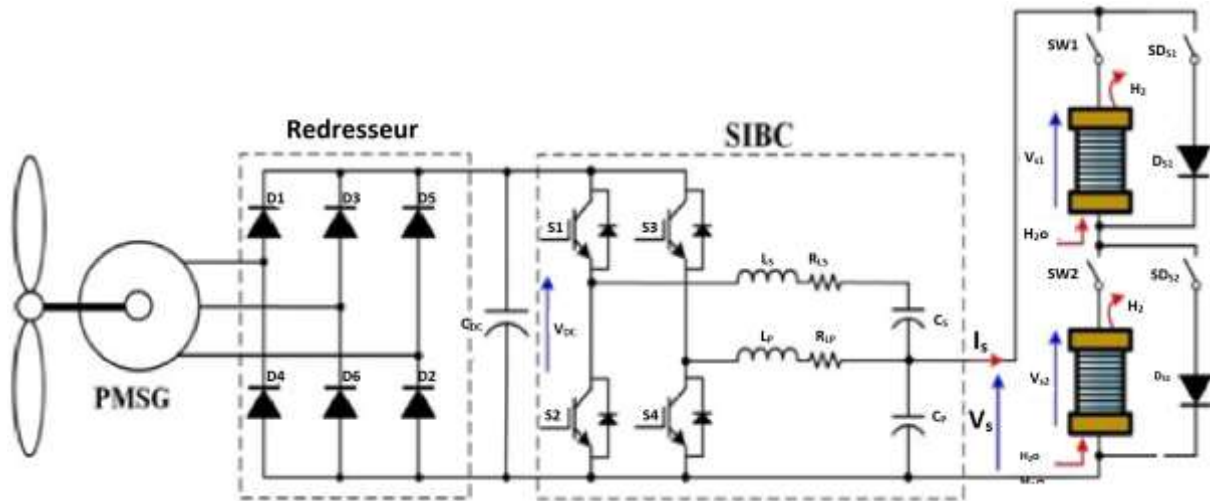


Figure II.15 : Electrolyseur à étages multiples basé sur une configuration en série.

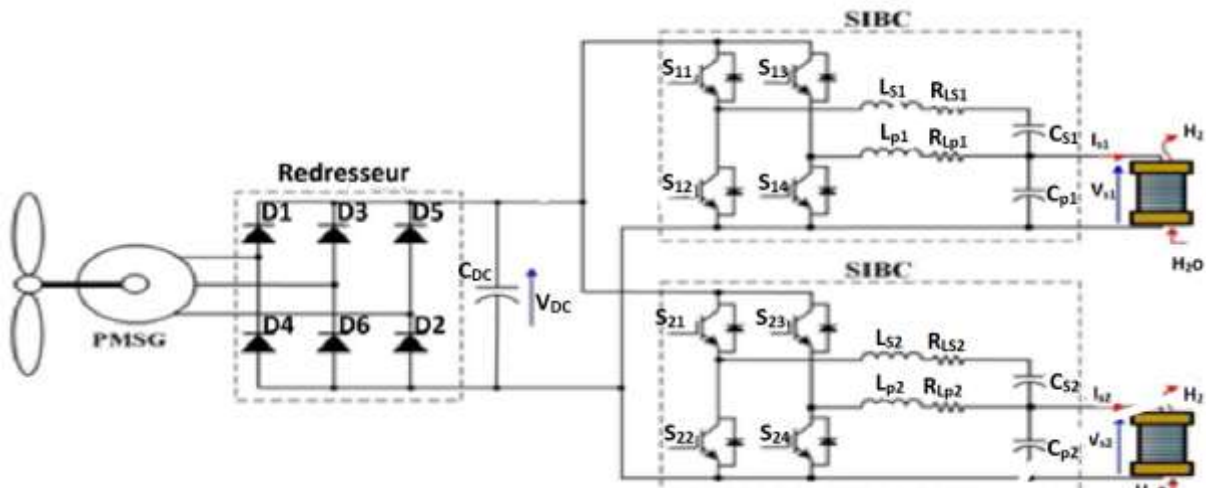


Figure II.16. Electrolyseur à étages multiples basé sur une configuration parallèle.

Enfin, même s'il n'a pas été rapporté d'utilisation pratique dans les applications d'électrolyseur, les redresseurs de source de courant PWM-CSR (est une technique qui prend une tension continue constante.) sont des topologies attrayantes et prometteuses pour les applications futures, comme le montre la (figure II.17). En effet, ils offrent un bon contrôle du courant de sortie et un excellent facteur de puissance. Et une dynamique rapide. En général, ces topologies sont composées de dispositifs GTO (thyristors à déclenchement par la porte) en raison de leur courant et de leur tension nominaux élevés. Cependant, les récents progrès réalisés dans les applications hautes tension et haute puissance pour les IGBT (les transistors bipolaires à grille isolée) ont été significatifs et ont permis leur développement dans les relais PWM-CSR. Pour réduire l'ondulation du courant de sortie, une inductance est nécessaire, tandis que du côté courant alternatif, des condensateurs sont obligatoires pour

filtrer l'ondulation du courant d'entrée. Cependant, ces topologies ne sont pas adaptées aux applications de forte puissance en raison des contraintes de tension et de courant élevées, qui augmentent considérablement les pertes par conduction et réduisent ainsi l'efficacité énergétique. Pour cette raison, les PWM-CSR sont adaptés aux applications moyennes tension.

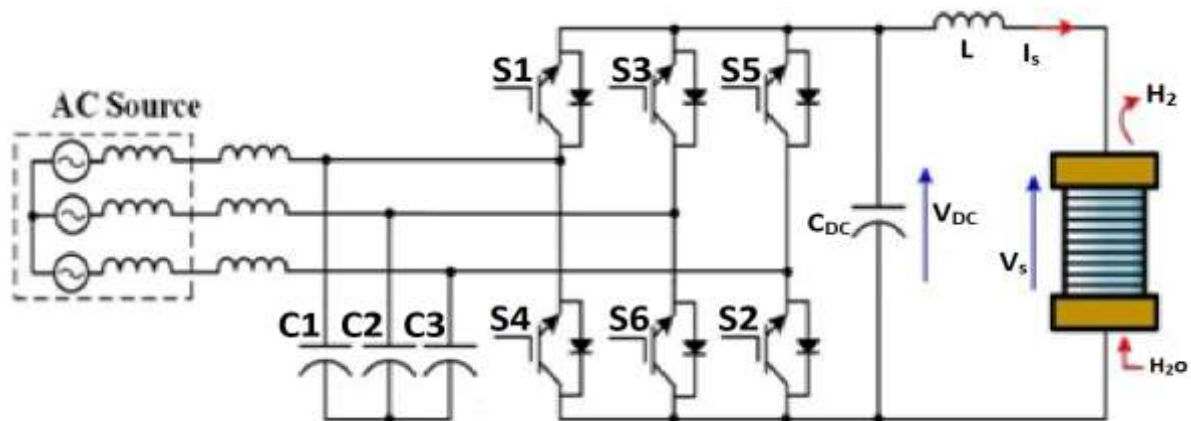


Figure II.17. Redresseurs PWM à source de courant pour les applications d'électrolyseurs.

Les centrales de conversion de forte puissance utilisent des électrolyseurs alcalins dont l'alimentation est basée sur des redresseurs commandés ou des hacheurs IGBT; ces circuits sont contraints par la gestion de courants élevés et sont alimentés par le réseau moyen tension. L'utilisation de thyristor ou d'IGBT rend ces convertisseurs fiables mais implique la génération d'harmoniques vers le réseau et une régulation de tension limitée en sortie. La disponibilité limitée de nouveaux dispositifs de haute puissance pour ces applications influence le développement de nouvelles topologies ainsi que le coût des installations. En revanche, dans la gamme de puissance comprise entre 1 mW et 30 kW, il existe de nombreuses solutions nouvelles et intéressantes. Dans cette gamme, les électrolyseurs alcalins et PEM peuvent être utilisés, même si la plupart des électrolyseurs proches de la limite inférieure sont PEM. De nouvelles topologies telles que les redresseurs actifs assurent un faible impact sur le réseau ou la meilleure exploitation du générateur PMSM pour l'éolienne.

Les redresseurs interfacés par un convertisseur DC/DC donnent une bonne régulation de la tension en minimisant l'ondulation de la tension de sortie. De nombreux convertisseurs DC/DC ont été proposés pour ces applications. Ils peuvent être connectés en parallèle en exploitant la modularité et en augmentant la fiabilité avec un contrôle approprié. Les redresseurs de source de courant (CSR) peuvent également être utilisés en raison du bon contrôle du courant de sortie, de l'excellent facteur de puissance et de la dynamique rapide.

Dans la gamme des faibles puissances, seuls les PEM sont disponibles, les circuits décrits dans la gamme de puissance précédente peuvent être également utilisés et équipés de MOSFETs. Pour les très faibles puissances (environ 1 kW), l'utilisation de redresseurs non contrôlés associés à un simple étage DC/DC permet une réalisation peu coûteuse. A partir de cette discussion, le **(tableau II.2)** fournit un résumé de l'électronique de puissance nécessaire en fonction de la gamme de puissance de l'électrolyseur

Plage de puissance	fournir	conversion	électrolyseur	Noter
>1 mW	La grille	Transformateur avec redresseur à thyristors	alkaline	Harmonique basse fréquence sur le réseau
30 kW < P < 1 mW	mV/lv grille RES	-transformateur pour haute puissance – redresseurs commandés – hacheur IGBT- redresseurs actifs.	Alcaline et PEM	La dynamique de la source et de PEM EL doit être considérée en cas de RES
<30 kW	Lv grille RES	Redresseurs non commandés – redresseurs actifs avec étage DC/DC	PEM	Les circuits à faible puissance sont relativement bon marché

Tableau II.2. Résumé de l'électronique de puissance en fonction de la gamme de puissance.

Conclusion :

Les thyristors ont généralement un rendement plus élevé que les commutateurs IGBT. Cependant, pour répondre à la demande croissante d'alimentation en courant continu d'un système d'électrolyse, il peut être nécessaire de répartir les ponts de thyristors entre plusieurs transformateurs secondaires afin de partager les courants et de minimiser les pertes dans les dispositifs semi-conducteurs, en ayant deux principaux transformateurs connectés en Y pour ancien la structure de redresseur à thyristors à 6 impulsions. La topologie IGBT modulaire peut être configurée pour avoir plusieurs ponts IGBT parallèles derrière un seul secondaire de transformateur, ce qui peut donner lieu à une configuration de transformateur moins complexe et moins déboursée dans les applications à courant élevé.

Chapitre III :
Simulation d'un redresseur
en pont à 6 thyristors

III.1.Introduction

Le redressement est nécessaire pour exécuter une consommation d'énergie contrôlée dans les systèmes d'électrolyseurs d'eau connectés au réseau électrique principal à courant alternatif, car les électrolyseurs d'eau sont des charges à courant continu contrôlées par le courant. Les électrolyseurs d'eau industriels sont caractérisés par des courants continus élevés et des tensions relativement faibles, et les redresseurs basés sur les thyristors ont été les plus courants dans les applications de haute puissance. Le redresseur est responsable de l'efficacité énergétique et de la sécurité de la consommation électrique des électrolyseurs d'eau en fonction de la température de fonctionnement, de la pression et de la densité de courant de l'empilement de cellules électrolytiques.

III.2. Différentes topologies d'alimentation

Les modèles de simulation permettant de comparer les différentes topologies d'alimentation électrique dans les applications industrielles d'électrolyse de l'eau sont implémentés dans l'environnement MATLAB /simulink. L'alimentation en courant alternatif du réseau est de **11kv**, les transformateurs, les redresseurs, les filtres éventuels et le contrôle du courant continu sont inclus. Les topologies des redresseurs simulés sont illustrées par les figures **a** et **b**, qui **a** et **b** représentent la solution la plus courante pour la conversion CA/CC dans les applications de haute puissance et de courant élevé.

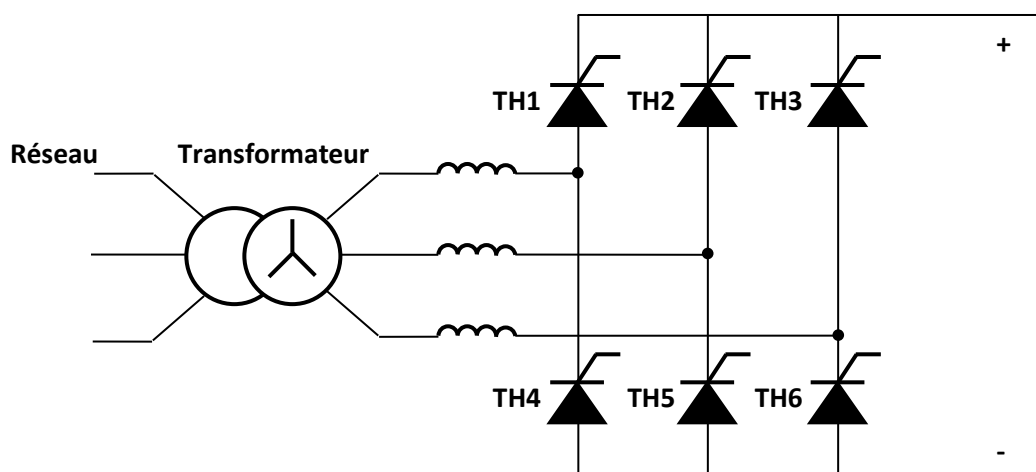


Figure III.1. Pont a thyristor à 6 impulsions.

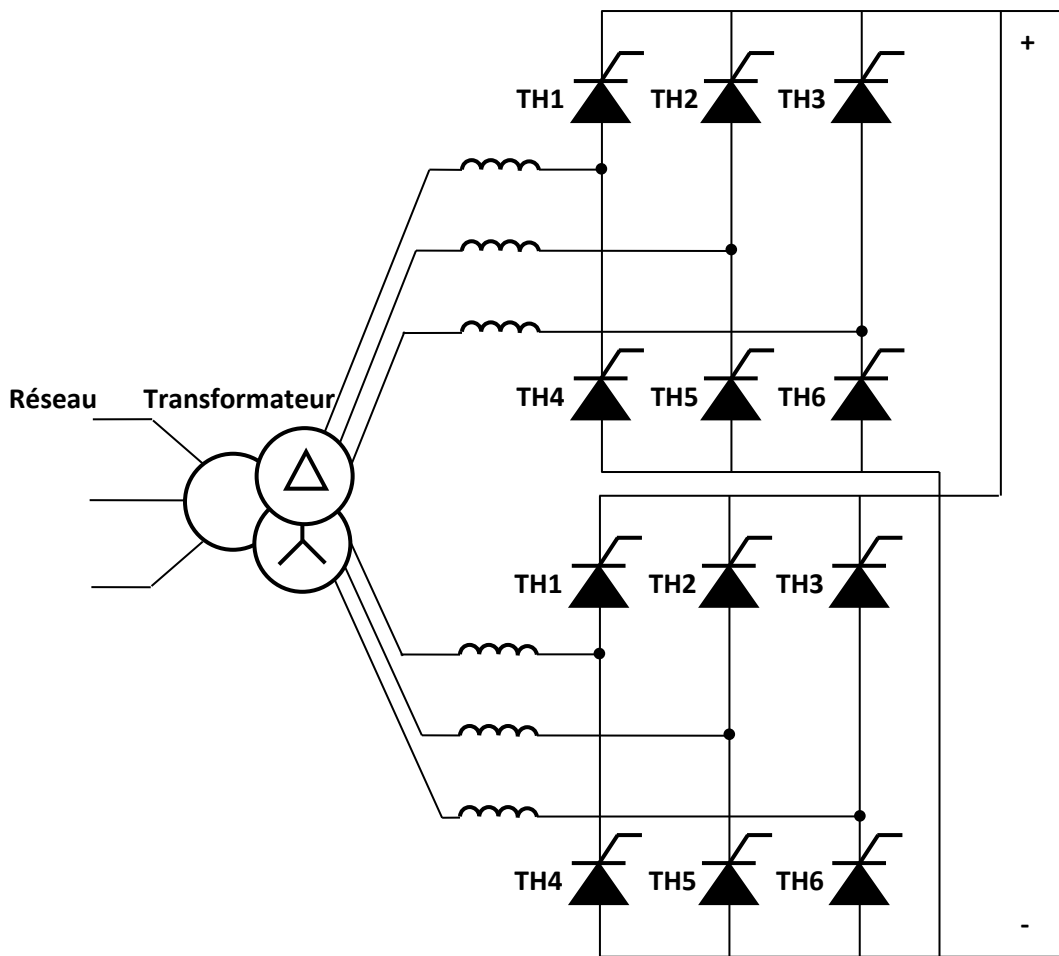
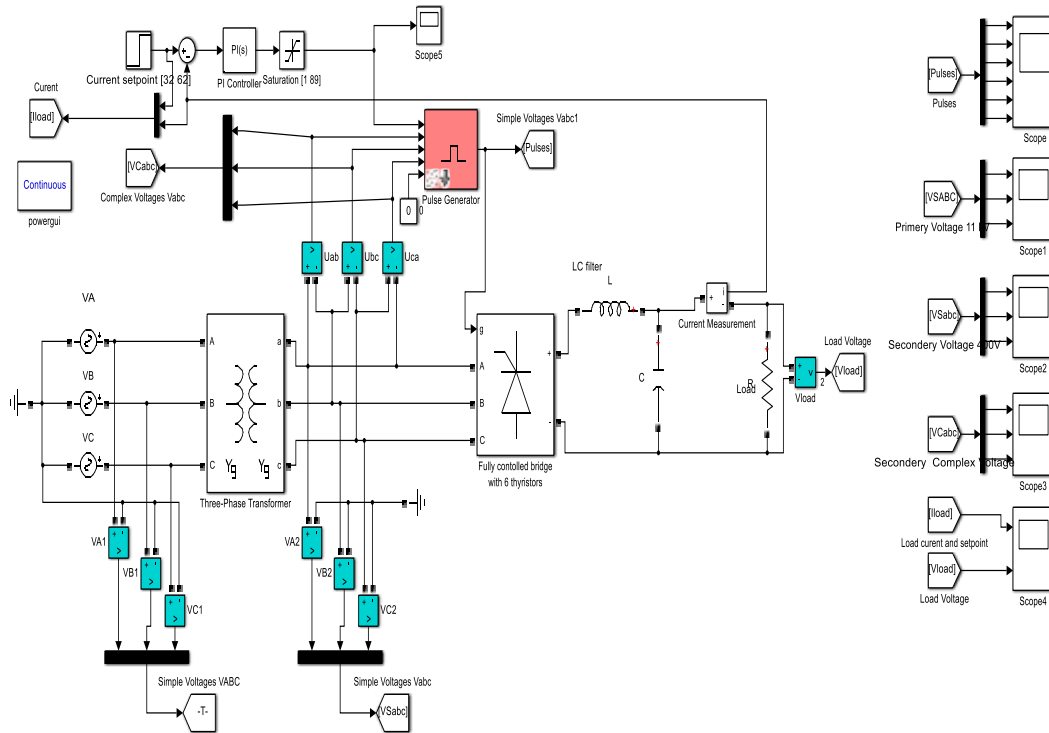


Figure III.2. Pont à thyristor a 12 impulsions.

III.3. Simulation d'un pont de thyristors à 6 impulsions

Le pont de thyristor à 6 impulsions est connecté au réseau électrique de **11kv, 50hz**, par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé **250.10⁶VA** à deux enroulements, dont la résistance et l'inductance de fuite sont fixées à ($R_1=9.68.10^{-6}$; $R_2=1.28.10^{-6}$) respectivement, pour les deux enroulements. En unités **SI**. La saturation du transformateur n'est pas simulée. Le **Y** mis à la terre est sélectionné pour les deux connexions de bobinage à des fins de mesure. Dans la pratique, la connexion en triangle est plus typique sur la distribution électrique moyenne tension. La valeur efficace de la tension de l'enroulement secondaire du transformateur est fixée à **400v**. Un seul bloc similunk de contrôleur proportionnel-intégral (PI) contrôle l'angle d'amorçage des thyristors, pour annuler les harmoniques responsables des parasites hautes fréquences, on utilise un filtre passe bas (**L, C**) en sortie du redresseur.



III.3.1. Blocs de simulation

III.3.1.1. Source triphasé : la valeur de la tension et la valeurs de la fréquence de cette source sont : $V_{SABC}=11KV$; $F=50Hz$

III.3.1.2. Transformateur triphasé (abaisseur) à deux enroulements : ce bloc implémente un transformateur triphasé en utilisant trois transformateurs monophasés. Son rôle est convertit une alimentation haute tension et base intensité en une alimentation base tension et haute intensité.les caractéristiques du transformateur est :

Puissance apparente est $P_n=250.10^6$ VA et la fréquence nominale est $F=50Hz$;

1^{er} enroulement($V_1=11Kv$; $R_1=9.68.10^{-6}$ ohm) ;

2^{ème} enroulement($V_2=400V$; $R_2=1.28.10^{-6}$ ohm).

III.3.1.3.Redresseur a base de thyristor : Ce bloc implémente un pont de dispositifs d'électronique de puissance sélectionnés. Les circuits d'amortissement de la série RC sont connectés en parallèles avec chaque dispositif de commutation. Son rôle est de convertir une alimentation alternative en continu, la tension et la puissance de sortie peuvent être contrôlées par le composant de puissance (thyristor). les caractéristiques du redresseur est : la résistance d'amortissement $R_s=1.10^5$ ohm.

III.3.1.4.Régulateur PI : ce bloc implémente des algorithmes de contrôle PID à temps continu et discret et inclut des fonctionnalités avancées telles que l'anti-enroulement, la réinitialisation externe et le suivi du signal.

Le rôle de régulateur PI dans ce système est contrôlé le courant de sortie par générer un angle d'amorçage souhaitable.

III.3.1.4.1.Synthèse d'un correcteur PI pour la commande du convertisseur à 6 Thyristors

A. Identification

nous allons faire l'identification du système à réguler Pulse Generator + pont à 6 thyristors + filtre LC, pour obtenir une fonction de transfert avec laquelle nous allons pouvoir faire la synthèse d'un correcteur PI en utilisant la méthode empirique.

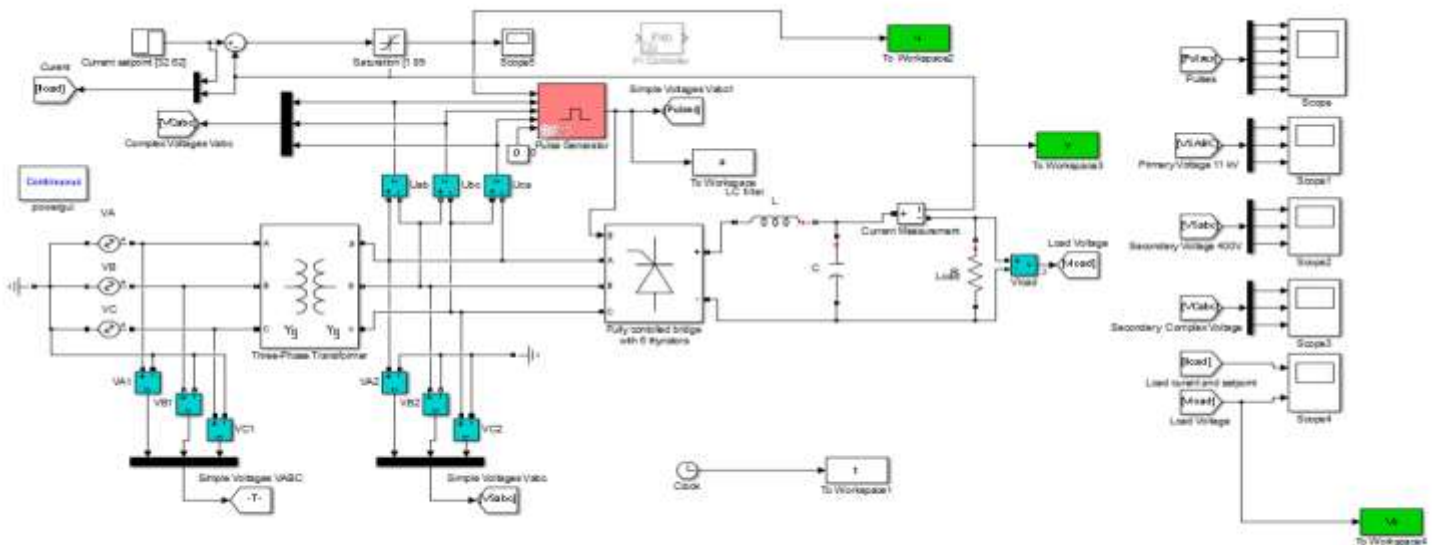


Figure III.3. Simulation d'un Pont a thyristor à 6 impulsions.

Préparation des données

Le signal d'entrée pour l'identification est récolté par un vecteur appelé u au niveau de l'entrée du pulse généré et le signal de sortie appelé y est pris au niveau de la mesure du courant délivré par le convertisseur à la charge.

Procédure d'identification

Après le lancement de la simulation et la récupération des deux vecteurs u et y nous appelons la toolbox d'identification sous matlab en tapant l'instruction « ident »

Nous commençons par importer les données (u, y) puis choisir une méthode d'identification avec son algorithme, nous avons choisis « transfert function model » qui nous permet d'obtenir une fonction de transfert en continu avec la structure choisie qui est deux pôles sans zéro.

Puis nous lançons l'estimation qui nous donne la fonction de transfert estimée, avec la figure de validation pour un pourcentage de similitude de 97%.

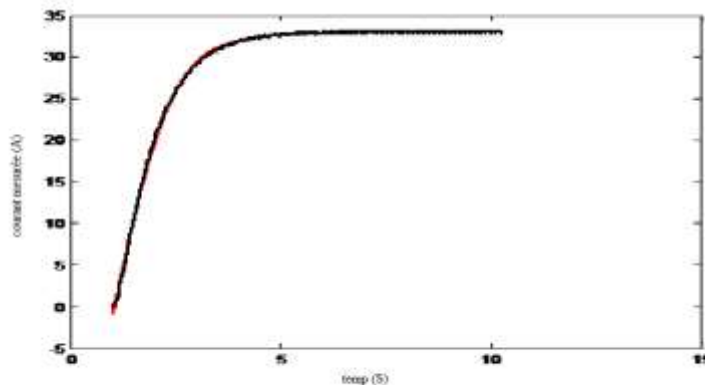


Figure III.4. sortie de modèle mesurée et simulée.

La fonction de transfert identifiée est donné par :

$$G(s) = \frac{1.194}{s^2 + 1.777s + 0.03059}$$

B.Synthèse du correcteur PI par la méthode empirique

Nous allons d'abord mettre la fonction de transfert identifiée sous la forme canonique suivante :

$$G(s) = \frac{k}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

Par identification, nous obtenons :

$$G(s) = \frac{1,194}{(0,5685s + 1)(57,5043s + 1)}$$

On rappelle que la méthode empirique nous offre les relations suivantes pour un correcteur PI, soit :

$$K_p = \frac{\tau_1 + \tau_2}{k\tau_m} \quad \text{et} \quad T_i = \max(\tau_1, \tau_2)$$

Avec k : gain du système et τ_m : la constante de temps désirée en boucle fermée.

En application de ces deux formules pour $\tau_m = 10ms$ nous obtenons :

$$K_p = \frac{0,5685 + 57,5043}{1,194 \times 0,01} = 486,371 \quad \text{et} \quad T_i = \max(0,5685, 57,5043) = 57,5043s$$

Le correcteur PI est donné par :

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = 486,371 \left(1 + \frac{1}{57,5043s} \right)$$

III.3.1.5. Générateur de pulsion : on a utilisé ce bloc pour déclencher les 6 thyristors d'un convertisseur 6 impulsions. La sortie est un vecteur de 6 impulsions (0-1) synchronisées individuellement sur les 6 tensions de commutation. les caractéristiques du générateur est :

La fréquence des tensions de synchronisation $F=50Hz$.

III.3.1.6. filtre LC : pour annuler les harmoniques responsables des parasites hautes fréquence , on utilise un filtre en sortie du redresseur. les caractéristiques du filtre LC passe bas est : l'inductance $L=1$ H et la capacité $C=0.001$ F.

III.3.2. Modèle de simulation sous MATLAB /SIMILUNK

La figure ci-dessous illustre la simulation finale du redresseur en pont à 6 thyristors qui a alimenté par une source de tension triphasé. Le rôle de ce redresseur est généré une courant commandable afin contrôler le débit d'hydrogène que produire par l'électrolyseur.

III.4. Résultats de simulation

III.4.1. la tension simple primaire ($V_{SABC}=11\text{kV}$)

Dans l'intervalle $[0\text{s}, 0.005\text{s}]$ la tension simple primaire égal 0V et augment jusqu'à la valeur maximal $1.1 \cdot 10^4 \text{ V}$ et dans l'intervalle $[0.005\text{s}, 0.01\text{s}]$ la tension simple primaire est diminué jusqu'à 0V , puis il continue a diminué dans l'intervalle $[0.01\text{s}, 0.015\text{s}]$ jusqu'à la valeur minimal $-1.1 \cdot 10^4\text{V}$ et dans l'intervalle $[0.015\text{s}, 0.02\text{s}]$ augment jusqu'à 0V .

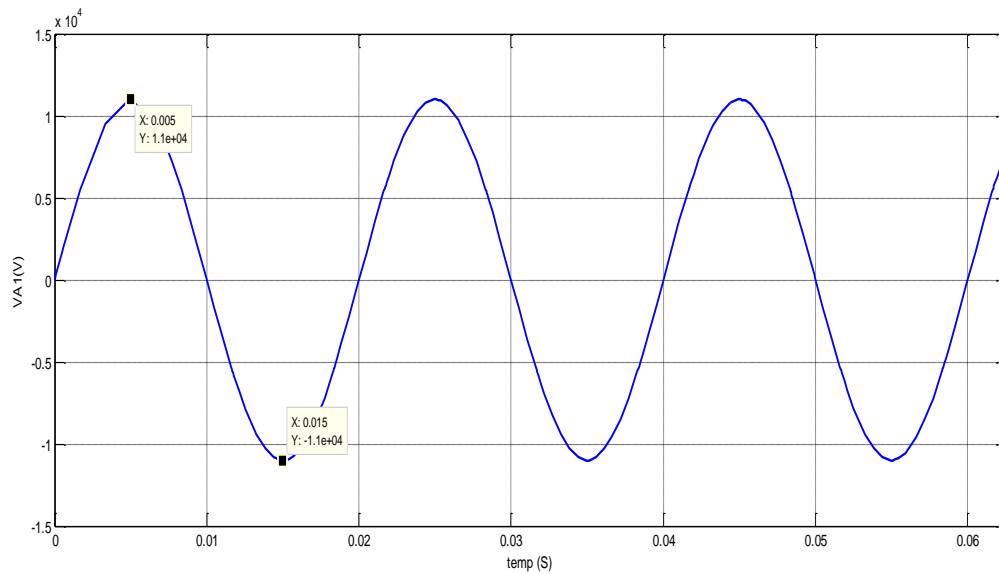


Figure III.5. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps (V_{A1}).

Dans l'intervalle $[0\text{s}, 0.0082\text{s}]$ la tension simple primaire égal 9526V et diminué jusqu'à la valeur $-1.1 \cdot 10^4\text{V}$ et dans l'intervalle $[0.0082\text{s}, 0.018\text{s}]$ la tension simple primaire est augment jusqu'à la valeur $1.1 \cdot 10^4\text{V}$.

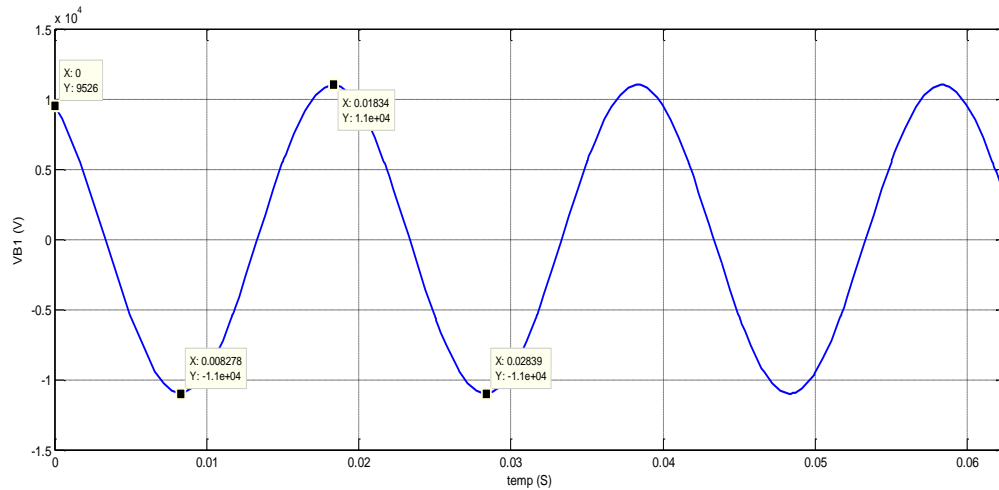


Figure III.6. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps (V_{B1}).

Dans l'intervalle $[0s, 0.0016s]$ la tension simple primaire égale $-9526V$ et diminue jusqu'à la valeur $-1.1 \cdot 10^4V$ et dans l'intervalle $[0.0016s, 0.011s]$ la tension simple primaire est augmenté jusqu'à la valeur maximale $1.1 \cdot 10^4V$, puis il diminue dans l'intervalle $[0.011s, 0.021s]$ jusqu'à la valeur $-1.1 \cdot 10^4V$.

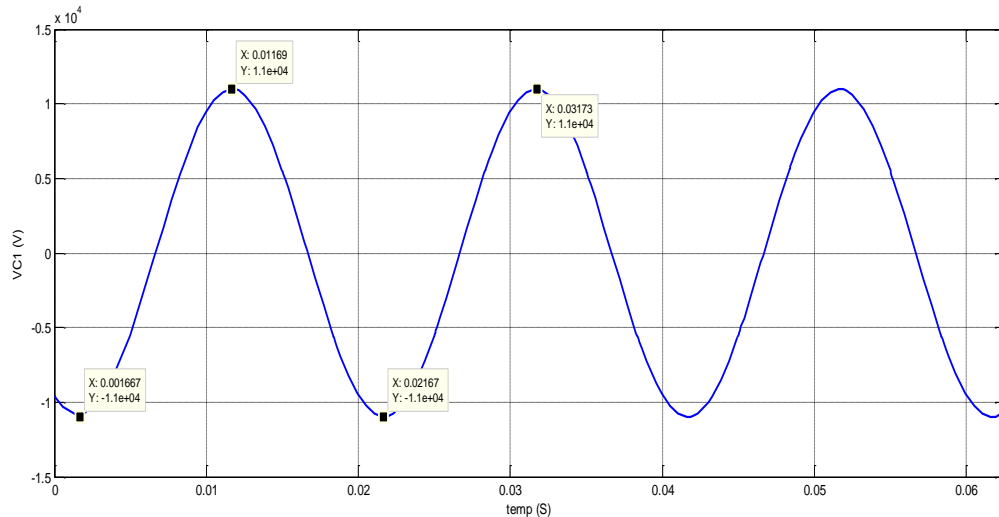


Figure III.7. Formes d'ondes de la tension simple primaire en fonction du temps (V_{C1}).

III.4.2. la tension simple secondaire ($V_{Sabc}=400v$)

Dans l'intervalle $[0s, 0.005s]$ la tension simple secondaire égale $0V$ et augmente jusqu'à la valeur maximale $400 V$ et dans l'intervalle $[0.005s, 0.01s]$ la tension simple secondaire est diminuée jusqu'à $0V$, puis il continue à diminuer dans l'intervalle $[0.01s, 0.015s]$ jusqu'à la valeur minimale $-400V$ et dans l'intervalle $[0.015s, 0.02s]$ augmente jusqu'à $0V$.

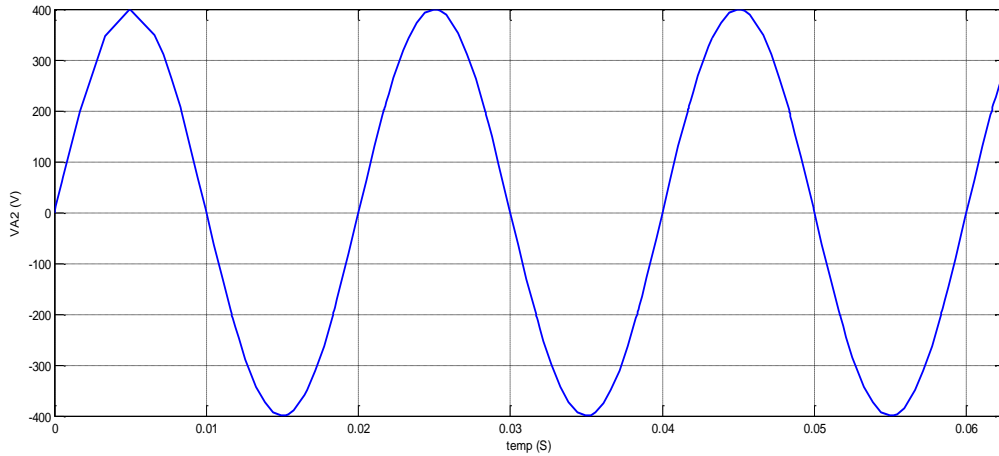


Figure III.8. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps(V_{A2}).

Dans l'intervalle [0s, 0.0083s] la tension simple secondaire égale **346.4V** et diminue jusqu'à la valeur **-400V** et dans l'intervalle [0.0083s, 0.018s] la tension simple secondaire augmente jusqu'à la valeur **400V**.

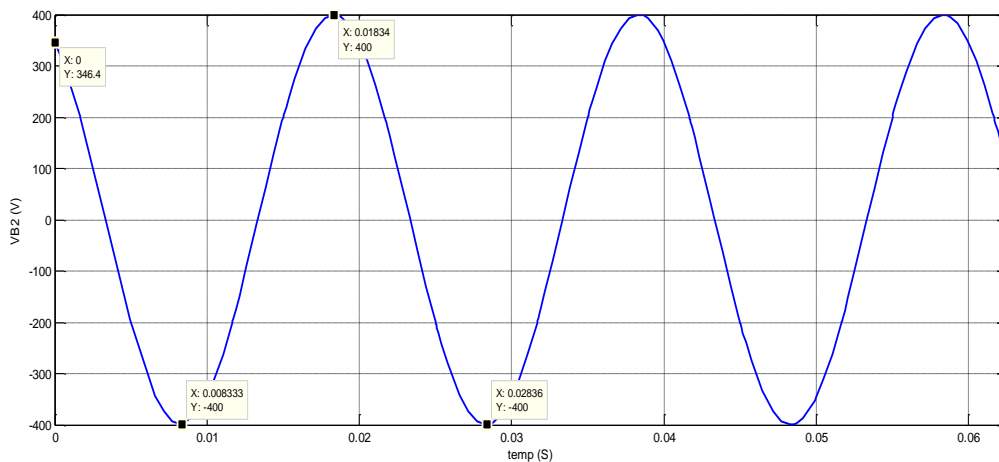


Figure III.9. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps(V_{B2}).

Dans l'intervalle [0s, 0.0016s] la tension simple secondaire égale **-346.4V** et diminue jusqu'à la valeur **-400V** et dans l'intervalle [0.0016s, 0.011s] la tension simple secondaire augmente jusqu'à la valeur maximale **400V**, puis elle diminue dans l'intervalle [0.011s, 0.021s] jusqu'à la valeur **-400V**.

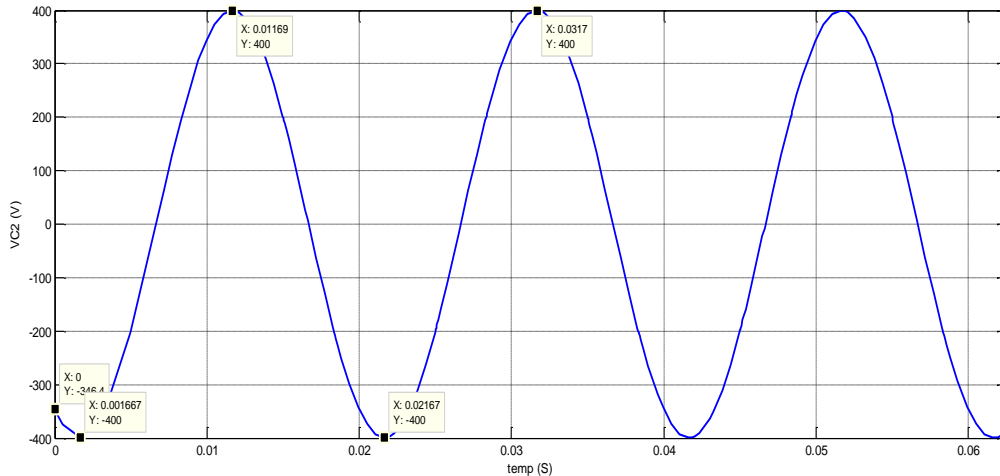


Figure III.10. Formes d'ondes de la tension simple secondaire en fonction du temps (V_{C2}).

On voit qu'à l'aide de Simulink l'oscilloscope visualise les deux tensions primaire et secondaire, la tension primaire (scope1) est plus grande par rapport à la tension secondaire (scope2) ce qui exprime le rôle de transformateur abaisseur.

III.4.3. la tension complexe secondaire ($V_{Cabc}=400*\sqrt{3}$)

Dans l'intervalle [0s, 0.006s] la tension complexe secondaire est égale à **-346.4V** et augmente jusqu'à la valeur maximale **692.7 V** et dans l'intervalle [0.006s, 0.016s] la tension complexe secondaire est diminuée jusqu'à la valeur minimale **-692.7V** et dans l'intervalle [0.016s, 0.026s] la tension complexe secondaire est augmentée jusqu'à la valeur maximale **692.7V**.

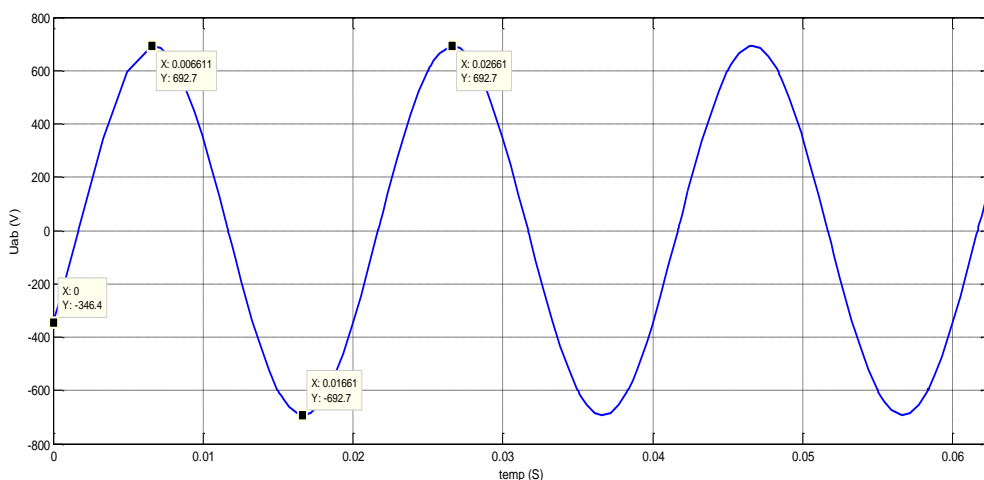


Figure III.11. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps (U_{ab}).

Dans l'intervalle [0s, 0.001s] la tension complexe secondaire égal **692.8V** et diminué jusqu'à la valeur **-692.8V** et dans l'intervalle [0.001s, 0.019s] la tension complexe secondaire est augment jusqu'à la valeur maximal **692.7V**, puis il diminué dans l'intervalle [0.019s, 0.029s] jusqu'à la valeur **-692.7V**.

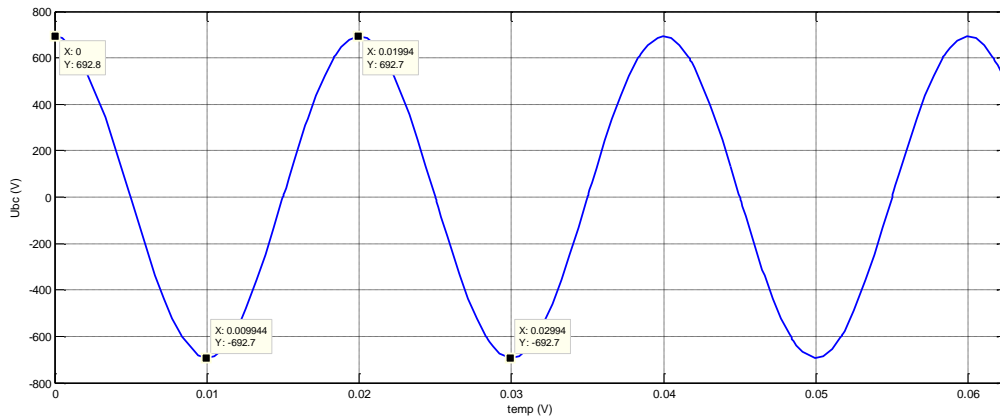


Figure III.12. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps (U_{bc}).

Dans l'intervalle [0s, 0.0033s] la tension complexe secondaire égal **-346.4V** et diminue jusqu'à la valeur **-692.8V** et dans l'intervalle [0.0033s, 0.013s] la tension complexe secondaire est augment jusqu'à la valeur maximal **692.7V**, puis il diminue dans l'intervalle [0.013s, 0.023s] jusqu'à la valeur **-692.7V**.

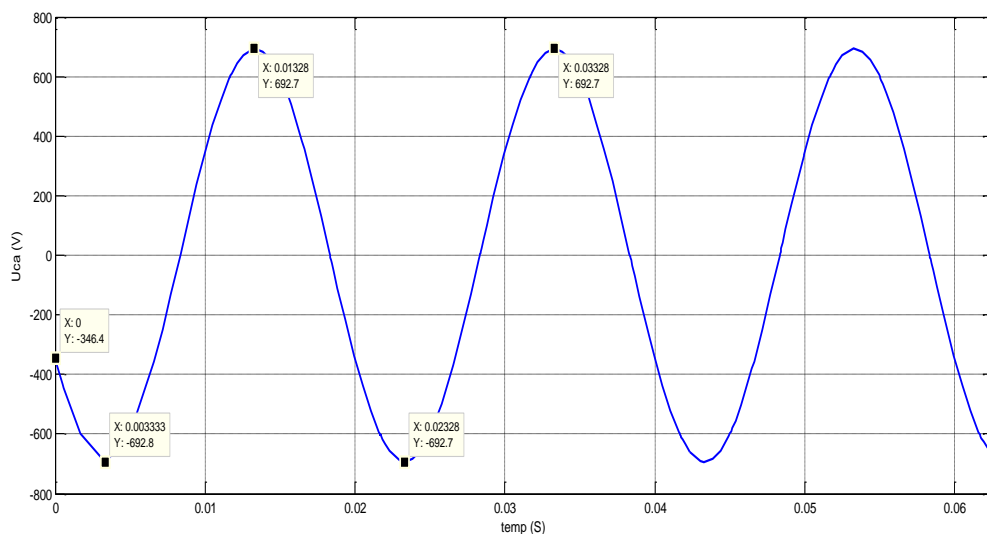


Figure III.13. Formes d'ondes de la tension complexe secondaire en fonction du temps (U_{ca}).

Les tensions composées sont les tensions U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} que l'on peut mesurer entre phases. Les trois tensions mesurées sont égales $V_{Cabc}=400*\sqrt{3}$.

III.4.4. générateur des impulsions

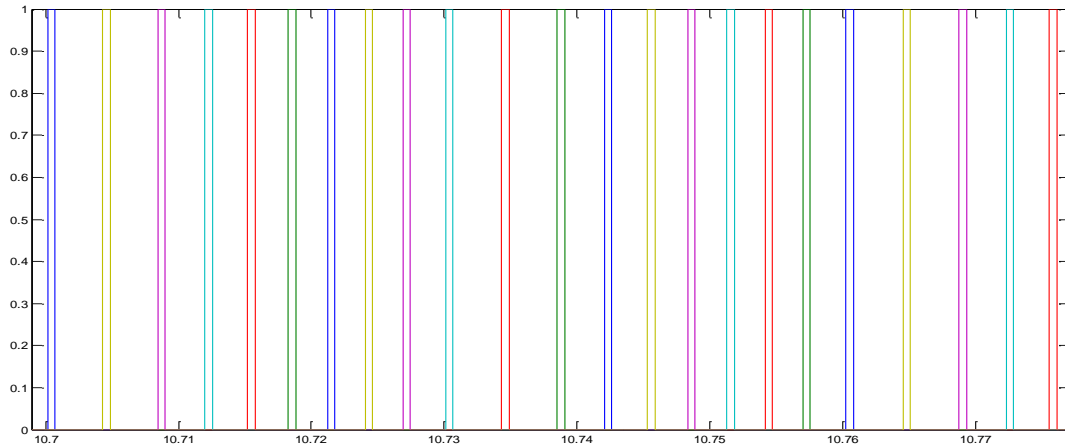


Figure III.14. Les impulsions de commande.

Les impulsions sont générées **10** degrés après l'augmentation de passages par zéro des tensions de commutation.

III.4.5. Angle de commande :

La figure suivante représente la commande qui génère par le régulateur PI.

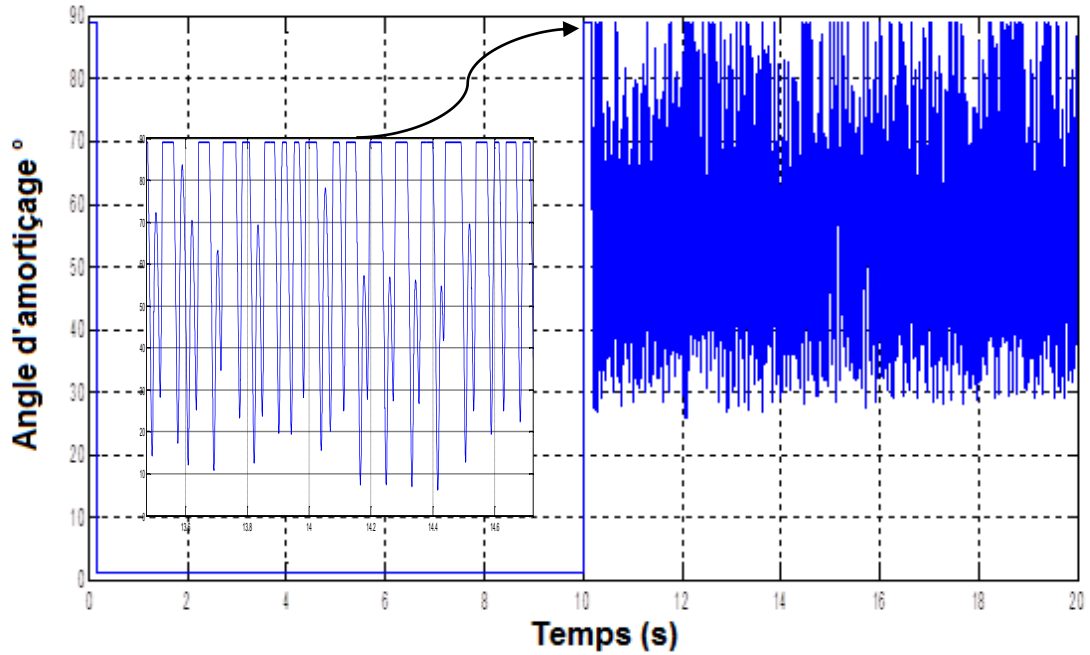


Figure III.15. angle de commande.

nous remarquons une certaine haute fréquence dans le signal d'attaque de l'angle de commande qui représente le signal MLI destiné aux six gâchettes du pont de thyristors.

III.4.6. Tension et courant de sortie

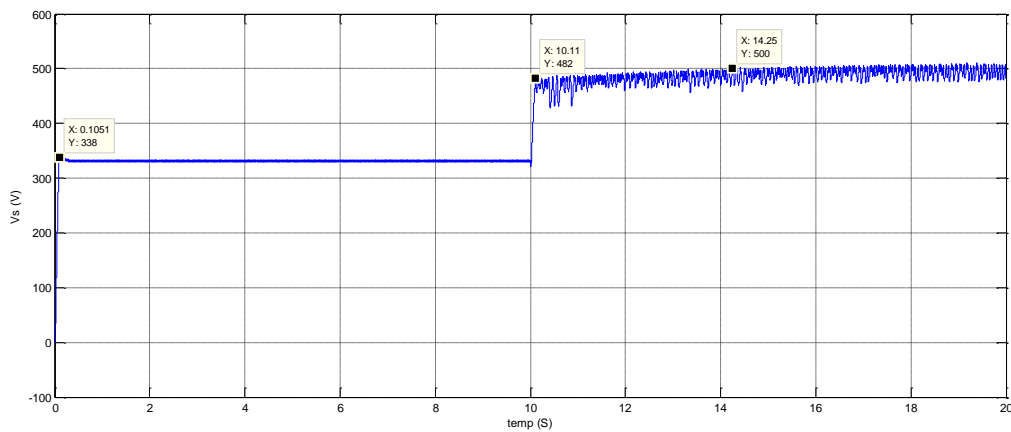


Figure III.16.tension de sortie.

Dans l'intervalle [0s, 10s] la tension de sortie est démarré a zéro jusqu'à la valeur 320v, ensuite il est resté stable dans cet intervalle. Et dans l'intervalle [10s, 20s] la tension a augmenté jusqu'à la valeur 500v et il est resté stable dans cet intervalle.

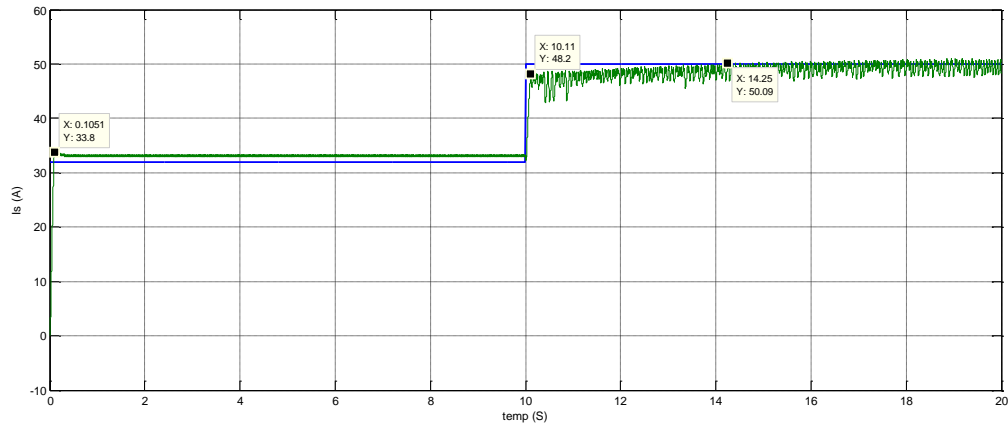


Figure III.17.courant de sortie.

On a commandé dans l'intervalle [0s ; 10s] le courant égale 32A et dans l'intervalle [10s ,20s] le courant égale 50A, alors on a remarqué le courant suivre la consigne.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la simulation d'un pont à thyristors à 6 impulsions sous MATLAB/SIMULINK pour contrôler le courant continue qui alimente un électrolyser, a partir duquel nous avons expliqué le fonctionnement de chaque bloc, ensuite nous avons entré leur caractéristique, et a la fin nous avons expliqué toutes les courbes de simulation nous avons donc obtenu les résultats souhaités.

Conclusion générale

Nous avons présenté dans le cadre de ce mémoire l'étude des convertisseurs dans les applications de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Dans le premier chapitre de l'état de l'art des différentes techniques de la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau Nous avons porté l'attention sur les aspects techniques de la production d'hydrogène, tels que la pollution harmonique lorsque l'électrolyseur est alimenté par le réseau, la connaissance de la dynamique du convertisseur et de l'électrolyseur en cas d'alimentation par des sources d'énergie capables, la besoin d'une chaîne de conversion adaptée aux niveaux de tension, et d'un rendement adéquat.

Dans le deuxième chapitre on a fait une étude sur les différents convertisseurs AC-DC non commandé avec diodes et commandé avec un pont redresseur à thyristors à six impulsions qui offre un rendement énergétique élevé et un courant contrôlé, et ses différents inconvénients qui sont la qualité de puissance et de l'ondulation du courant.

Dans le troisième chapitre Nous avons simulé notre système sur environnement MATLAB/simulink nous avons remarqué que. La tension de l'entrée est plus grande que la tension de sortie ce qui exprime le rôle de transformateur abaisseur, et une tension de l'entrée alternatif qui est qui est une tension de sortie continue ce qui exprime le rôle de redresseur a thyristor, le but de cette simulation est de commandé le courant de sortie pour contrôler la production d'hydrogène, lorsque le courant de sortie est plus grand, la production d'hydrogène est en grande quantité.

Bibliographie

1. Peters, M., Benson, C.S., Cerling, T., Curry, J., Enzel, Y., Finley, J., Gillespie, A., Glantz, M., Soreghan, L., GSA Position Statement. Global Climate Change. U SA. October 2006. *GSA Position Statement. Glob. Clim. Chang. USA* (2006).
2. Turner, J. a. A Realizable Renewable Energy Future. *Science* (80-.). **285**, 687–689 (1999).
3. Bockris, J. O. A hydrogen economy. *Science* (80-.). **176**, 1323 (1972).
4. Ni, M., Leung, D. Y. C. & Leung, M. K. H. A review on reforming bio-ethanol for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* **32**, 3238–3247 (2007).
5. Millet, P. Électrolyseurs de l'eau à membrane acide. Tech. l'ingénieur Réacteurs Chim. référence , (2007).
6. Utgikar, V. & Thiesen, T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. *Int. J. Hydrogen Energy* **31**, 939–944 (2006).
7. Naterer, G., Fowler, M., Cotton, J. & Gabriel, K. Synergistic roles of off-peak electrolysis and thermochemical production of hydrogen from nuclear energy in Canada. *Int. J. Hydrogen Energy* **33**, 6849–6857 (2008).
8. Schroder, V., Emonts, B., Janssen, H. & Schulze, H. P. Explosion limits of hydrogen/oxygen mixtures at initial pressures up to 200 bars. *Chem. Eng. Technol.* **27**, 847–851 (2004).
9. Smolinka, T., Günther, T. & Garcke, J., NOW-Studie, Overview on water electrolysis for hydrogen production and storage. *Tech. report, Fraunhofer ISE* (2011).
10. Cai, Q., Luna-Ortiz, E., Adjiman, C. S. & Brandon, N. P. he Effects of Operating Conditions on the Performance of a Solid Oxide Steam Electrolyser: A Model-Based Study. *Fuel Cells* **10**, 1114–1128 (2010).
11. Grubb, W. T. Ionic migration in ion-exchange membranes. *J. Phys. Chem.* **63**, 55–67 (1959).
12. Barbir, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewables sources

energies. *Sol. Energy* **78**, 661–669 (2005).

13. Medina, P. & Santarelli, M. Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer. *Int. J. Hydrogen Energy* **35**, 5173–5186 (2010).

14. Zhang, J., Zhang, L., Liu, H., Liu, R.-S. & Sun, A. *Electrochemical Technologies for Energy Storage and Conversion. Electrochem. Technol. Energy Storage Convers.* 703 (2011).

15. Millet, P., Ngameni, R., Gregoriev, S. A., Memba, N., Brisset, F., Ranjbari, A., Etiévant, C., PEM water electrolyzer: from electrocatalysis to stack development. *Int. J. Hydrogen Energy* **35**, 5043–5052 (2010).

16. Millet, P., Andolfatto, F. & Durand, R. Design and performance of a solid polymer electrolyte water electrolyzer. *Int. J. Hydrogen Energy* **21**, 87–93 (1996).

17. Kellett, R. M. & Spiro, T. G. *Inorg. Chem.* **24**, 2373–2377 (1985).

18. Krishnan, C. V., Brunshwig, B. S., Creutz, C. & Sutin, N. *J. Am. Chem. Soc.* **107**, 2005–2015 (1985).

19. Razavet, M., Artero, V. & Fontecave, M. *Inorg. Chem.* **44**, 4786–4795 (2005).

20. Sayed, K.; Gronfula, M.G.; Ziedan, H.A. Novel Soft-Switching Integrated Boost DC-DC Converter for PV Power System. *Energies* **2020**, *13*, 749.

21. Guilbert, D.; Guarisco, M.; Gaillard, A.; N'Diaye, A.; Djerdir, A. FPGA based fault-tolerant control on an interleaved DC/DC boost converter for fuel cell electric vehicle applications. *Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, *40*, 15815–15822.

22. Marx, N.; Boulon, L.; Gustin, F.; Hissel, D.; Agbossou, K. A Review of Multi-Stack and Modular Fuel cell Systems: Interests, Application Areas and On-Going Research Activities. Available online: (accessed on 21 April 2020).

23. Monroy-Morales, J.; Hernandez-Angeles, M.; Campos-Gaona, D.; Pena-Alzola, R.; Ordonez, M.; Merida, W. Modeling and control design of a Vienna rectifier based electrolyzer. In Proceedings of the 2016 IEEE

24. Guida, V.; Guilbert, D.; Douine, B. Literature Survey of Interleaved DC-DC Step-Down Converters for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Applications. *Trans. Environ Electr. Eng.* **2019**, *3*, 33.

25. Poonnoy, N.; Mungporn, P.; Thounthong, P.; Sikkabut, S.; Yodwong, B.; Boonseng, A.; Ekkaravarodome, C.; Kumam, P.; Bizon, N.; Nahid-Mobarakeh, B.; et al. Differential Flatness Based Control of 3-Phase AC/DC Converter. In Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS), Bern, Switzerland, 17–19 November 2017.

20. Sayed, K.; Gronfula, M.G.; Ziedan, H.A. Novel Soft-Switching Integrated Boost DC-DC Converter for PV Power System. *Energies* **2020**, *13*, 749.
21. Guilbert, D.; Guarisco, M.; Gaillard, A.; N'Diaye, A.; Djerdir, A. FPGA based fault-tolerant control on an interleaved DC/DC boost converter for fuel cell electric vehicle applications. *Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, *40*, 15815–15822.
22. Marx, N.; Boulon, L.; Gustin, F.; Hissel, D.; Agbossou, K. A Review of Multi-Stack and Modular Fuel cell Systems: Interests, Application Areas and On-Going Research Activities. Available online: (accessed on 21 April 2020).
23. Monroy-Morales, J.; Hernandez-Angeles, M.; Campos-Gaona, D.; Pena-Alzola, R.; Ordonez, M.; Merida, W. Modeling and control design of a Vienna rectifier based electrolyzer. In Proceedings of the 2016 IEEE
24. Guida, V.; Guilbert, D.; Douine, B. Literature Survey of Interleaved DC-DC Step-Down Converters for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Applications. *Trans. Environ Electr. Eng.* **2019**, *3*, 33.
25. Poonnoy, N.; Mungporn, P.; Thounthong, P.; Sikkabut, S.; Yodwong, B.; Boonseng, A.; Ekkaravarodome, C.; Kumam, P.; Bizon, N.; Nahid-Mobarakeh, B.; et al. Differential Flatness Based Control of 3-Phase AC/DC Converter. In Proceedings of the 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS), Bern, Switzerland, 17–19 November 2017.