

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Science et Technologie  
DEPARTEMENT : Génie électrique  
N° :



DOMAINE : Science et Technologie  
FILIERE : Energie renouvelable  
OPTION : Hydrogen Vecteur d'Energie

**Mémoire présenté pour  
l'obtention Du diplôme de  
Master professionnel**

**Par:** Hafri Mohamed El Amin

**Intitulé**

**Emulateur hardware-in-the-loop du système  
holistique de production de H2 vert**

**Sous l'encadrement de :**

Pr.Belkacem Oueld Bouamama	Ecole polytech de lille	Encadrant
Pr.Mohamed Benhmida	Université mohamed boudiaf	Co-encadrant

**Soutenu devant le jury composé de:**

Defdaf Mabrok	Université mohamed boudiaf	Président
Berrabeh Fouad	Université mohamed boudiaf	Examineur
Djerioui Ali	Université mohamed boudiaf	Examineur

**Année universitaire :2024 / 2025**

## Remerciements

Tout d'abord, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant, source de lumière, de patience et de force, qui m'a permis de traverser ce long parcours académique et d'achever ce mémoire.

Je souhaite exprimer mes remerciements les plus sincères et profonds à mes chers parents. À ma maman bien-aimée, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices et son soutien constant. À mon père bien-aimé, dont la présence et le souvenir restent un pilier solide et une source d'inspiration chaque jour. À ma grand-mère chère, qui a laissé dans mon cœur une empreinte de tendresse, de sagesse et d'amour. Votre amour demeure la plus forte des fondations dans ma vie.

À mon frère et à ma sœur, merci pour votre présence, votre encouragement et vos mots réconfortants qui m'ont toujours porté dans les moments de doute et de fatigue.

Un immense merci à mon encadrant, le Professeur Belkacem Ould Bouamama, pour sa bienveillance, sa patience et son expertise. Votre accompagnement, vos précieux conseils et votre confiance m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Je remercie également chaleureusement mon sous-encadrant, Monsieur Benhamida Mohamed, ainsi que le Professeur Mehdi, pour leur soutien, leur disponibilité et les orientations précieuses qu'ils m'ont apportées.

Je n'oublie pas mes professeurs et tous les membres du corps académique qui m'ont transmis des connaissances, encouragé et guidé tout au long de ce parcours. Merci pour votre passion et votre dévouement dans la formation des étudiants.

Enfin, je remercie de tout cœur mes amis et toutes les personnes qui, par leur présence, leurs paroles et leur soutien moral, ont enrichi mon chemin.

Ce mémoire est également le fruit de votre générosité et de votre encouragement.

À vous tous, j'exprime ma profonde gratitude et mon affection éternelle.

## Dédicace

**À toi, mon père, dont la sagesse, la force et l'amour restent une source inépuisable d'inspiration. Ton souvenir est pour moi un pilier solide qui guide chacune de mes étapes.**

**À toi, ma grand-mère, dont la tendresse et la bienveillance m'ont toujours enveloppé d'un amour incommensurable. Ton souvenir demeure gravé dans mon cœur comme un précieux héritage**

## Résumé

Dans le contexte de la transition énergétique et de la recherche de solutions durables, l'hydrogène vert s'impose comme un vecteur énergétique prometteur. Cependant, la conception de plateformes réelles de production d'hydrogène à partir de sources renouvelables (solaire et éolienne) reste complexe, coûteuse et risquée à tester directement.

Ce mémoire présente la conception d'un **émulateur Hardware-in-the-Loop (HIL)** permettant de reproduire en temps réel le comportement d'un **système multiphysique de production d'hydrogène vert**. L'architecture étudiée intègre des sources photovoltaïques et éoliennes, un électrolyseur PEM, une pile à combustible PEM, ainsi qu'un étage de contrôle et de conversion de puissance.

La méthodologie repose sur une **modélisation par Bond Graphs**, permettant une représentation unifiée des phénomènes électriques, électrochimiques et dynamiques du système. Ces modèles sont ensuite traduits en **circuits équivalents électriques**, implémentés dans un environnement de simulation (MATLAB/Simulink) et validés via une maquette physique.

L'objectif est de fournir une plateforme de test souple, modulaire et économique pour l'étude, l'optimisation et la supervision des systèmes de production d'hydrogène vert, tout en ouvrant des perspectives vers l'intégration de nouvelles technologies (stockage, réseau, IA).

D'un point de vue fondamental, l'intérêt scientifique de la présente concerne l'utilisation d'un outil graphique capable non seulement de représenter la complexité et le couplage des phénomènes multiphysiques mais de les traduire par un système électrique facilement réalisable et peu coûteux.

D'autre part des perspectives prometteuses peuvent ensuite être développées : il s'agit de développer cette plateforme pour implémenter des algorithmes de dimensionnement, diagnostic et contrôle. Ce challenge technologique est possible grâce à des propriétés structurelles et causales particulières de l'outil bond graph.

**Les mots-clés :** hydrogène vert, émulateur HIL, Bond Graphs, électrolyseur PEM, pile à combustible, simulation temps réel, modélisation multiphysique, électronique de puissance.

## Abstract

In the context of energy transition, green hydrogen is emerging as a key solution for clean and sustainable energy systems. However, designing and testing real production platforms based on renewable sources (solar and wind) is complex, expensive, and risky.

This thesis presents the development of a **Hardware-in-the-Loop (HIL) emulator** that replicates in real time the behavior of a **multi-physical green hydrogen production system**. The studied architecture integrates photovoltaic and wind sources, a PEM electrolyzer, a PEM fuel cell, as well as power electronics and control stages.

The modeling approach is based on **Bond Graph theory**, which enables unified representation of the electrical and electrochemical phenomena. The resulting models are converted into equivalent electrical circuits, simulated using MATLAB/Simulink, and tested via a physical prototype.

This emulator offers a flexible and low-cost platform for evaluating, optimizing, and supervising hydrogen systems, paving the way for future integration with smart grids, energy storage and AI-based control strategies.

From a fundamental point of view, the scientific interest of this project lies in the use of a graphical tool capable not only of representing the complexity and coupling of multiphysical phenomena but also of translating them into an easily achievable and inexpensive electrical system. Furthermore, promising prospects can then be developed: this involves developing this platform to implement dimensioning, diagnostic, and control algorithms. This technological challenge is possible thanks to the specific structural and causal properties of the bond graph tool.

**Keywords:** green hydrogen, HIL emulator, PEM electrolyzer, PEM fuel cell, Bond Graph, real-time simulation, power electronics, multiphysics modeling.

## الملخص

في إطار التحول الطاقوي والبحث عن حلول مستدامة، يُعد الهيدروجين الأخضر ناقلاً واعدًا للطاقة النظيفة. إلا أن تصميم واختبار منصات الإنتاج الحقيقية المعتمدة على مصادر متجددة (كالشمس والرياح) يمثل تحديات كبيرة من حيث التعقيد والتكلفة والمخاطر. يعرض هذا البحث تصميم محاكي " (HIL) " يقوم بمحاكاة سلوك نظام شامل لإنتاج الهيدروجين الأخضر في الزمن الحقيقي. يتضمن النظام المدروس مصادر طاقة شمسية وريحية، محلل كهربائي من نوع PEM ، خلية وقود PEM، إضافة إلى مراحل التحكم وتحويل الطاقة.

تم بناء النموذج باستخدام نظرية الرسم البياني الترابطي لتمثيل الظواهر الكهربائية والكيميائية بطريقة موحدة. تُحول النماذج إلى دوائر كهربائية مكافئة وتُحاكى باستخدام برنامج MATLAB/Simulink، كما تم التحقق منها من خلال نموذج مادي. يُوفر هذا المحاكى منصة اختبار مرنة ومنخفضة التكلفة، ويفتح آفاقاً لتطوير أنظمة الهيدروجين الذكية المدمجة مع الشبكات والتخزين والتحكم المعتمد على الذكاء الاصطناعي.

من وجهة نظر أساسية، يكمن الاهتمام العلمي لهذا المشروع في استخدام أداة رسومية قادرة ليس فقط على تمثيل تعقيد وترابط الظواهر الفيزيائية المتعددة ولكن أيضاً على ترجمتها إلى نظام كهربائي سهل التحقيق وغير مكلف. علاوة على ذلك، يمكن بعد ذلك تطوير آفاق واعدة: يتضمن ذلك تطوير هذه المنصة لتنفيذ خوارزميات الأبعاد والتشخيص والتحكم. هذا التحدي التكنولوجي ممكن بفضل الخصائص الهيكلية والسببية المحددة لأداة الرسم البياني للروابط.

**الكلمات المفتاحية:** الهيدروجين الأخضر، محاكي HIL، محلل كهربائي PEM ، خلية وقود PEM ، الرسم البياني الترابطي ، المحاكاة الزمن الحقيقي، إلكترونيات القدرة، النمذجة متعددة الفيزياء.

# Sommaire

Glossaire

Liste des figures

Liste des tableaux

<b>Introduction générale</b> .....	14
<b>Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l’art sur l’hydrogène vert et les systèmes multiphysiques</b> .....	17
I. Introduction : .....	17
II. Hydrogène vert : un vecteur d’avenir .....	17
1. Définition : .....	17
2. Propriétés physique de l’hydrogène : .....	17
3. Propriétés énergétique de l’hydrogène .....	18
III. Approche technologique de la production d’hydrogène vert par électrolyse alimentée en énergie renouvelable : .....	20
1. L’électrolyse alcaline (AWE – Alkaline Water Electrolysis).....	20
2. L’électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM – Proton Exchange Membrane).....	21
3. L’électrolyse à haute température (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cell).....	22
IV. Stockage de l’hydrogène : .....	23
1. Stockage gazeux sous pression.....	24
2. Stockage sous forme liquide (cryogénique) .....	24
3. Stockage solide (matériaux absorbants ou réactifs) .....	25
4. Comparaison des technologies .....	25
V. Application : .....	26
1. Microgrids autonomes et sites isolés (off-grid).....	26
2. Mobilité hydrogène (H2Mobility) avec PEM.....	27
3. Stockage d’énergie et stabilisation du réseau .....	27
4. Industrie décarbonée et hydrogène comme matière première .....	27
VI. avantages et limites .....	28
VII. État des lieux de l’hydrogène en Algérie et à l’international .....	29
VIII. Sources renouvelables .....	31
1. Energie solaire.....	31
2. Energie éolienne.....	33
IX. Le Hardware-in-the-Loop (HIL) et la simulation en temps réel.....	35
3. Généralités sur le HIL .....	35
4. Généralités sur la simulation en temps réel .....	36
5. Vers un HIL pour la production d’hydrogène vert.....	37
X. Les systèmes multiphysiques complexes et la modélisation par Bond Graphs.....	38
1. Systèmes multiphysiques complexes .....	38

2. Modélisation par Bond Graph .....	38
<b>a) Analyse fonctionnelle</b> .....	38
Procédure de modélisation des systèmes électriques.....	40
XI. Problématique de recherche .....	44
XII. Objectifs de recherche .....	45
1. Objectif principal.....	45
2. Objectifs spécifiques .....	45
XIII. Conclusion.....	45
<b>Chapitre 2 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié</b> .....	47
I. Introduction : .....	47
II. Architecture fonctionnelle du système .....	47
1. Diagramme de Contexte (Vue macro) :.....	47
2. Diagramme de flux de processus (PFD).....	48
III. Modélisation Bond graph de chaque sous-système.....	50
3. Système Photovoltaïque (PV).....	50
4. Electrolyseur PEM (PEME) .....	57
5. système éolienne : .....	74
IV. Regroupement dans une architecture globale simulable .....	80
1. Modélisation conceptuelle globale : le Bond Graph à mots .....	80
2. Modélisation dynamique globale : le Bond Graph complet .....	81
V. Conclusion : .....	82
<b>Chapitre 3 : Étude comportementale d'un électrolyseur PEM via son modèle électrique équivalent simulé sous MATLAB/Simulink</b> .....	84
I. Introduction : .....	84
II. Environnement de simulation (MATLAB/Simulink).....	84
III. Modèle électrique équivalent de l'électrolyseur PEM ( simulable ) .....	85
IV. Implémentation sous MATLAB/Simulink .....	86
V. Analyse des résultats .....	89
1. Tension de cellule.....	89
2. Courant de cellule.....	89
3. Température de cellule .....	90
4. Débit molaire d'hydrogène.....	90
VI. Conclusion : .....	91
<b>Conclusion générale</b> .....	93
<b>Bibliographie :</b> .....	94
<b>Annexes :</b> .....	97
<b>Perspectives</b> .....	98

## Glossaire

<b>HIL</b>	<i>Hardware-in-the-Loop</i> : méthode de simulation temps réel avec intégration physique de sous-systèmes
<b>PEM</b>	<i>Proton Exchange Membrane</i> : membrane échangeuse de protons utilisée dans les électrolyseurs et piles à combustible
<b>PV</b>	<i>Photovoltaïque</i> : système de conversion de l'énergie solaire en électricité
<b>FC</b>	<i>Fuel Cell</i> (pile à combustible) : convertit l'hydrogène en électricité via réaction électrochimique
<b>Electrolyseur PEM</b>	Dispositif qui décompose l'eau (H <sub>2</sub> O) en hydrogène (H <sub>2</sub> ) et oxygène (O <sub>2</sub> ) sous l'effet d'un courant électrique
<b>Bond Graph</b>	Méthode graphique de modélisation des systèmes multiphysiques basée sur les échanges d'énergie
<b>Se / Sf</b>	Source d'effort ( <i>Se</i> ) / Source de flux ( <i>Sf</i> ) en Bond Graph (tension, courant ou équivalents mécaniques)
<b>R</b>	Élément de résistance – modélise les pertes (résistance, frottement)
<b>C</b>	Élément de capacité – stocke de l'énergie (condensateur, ressort, réservoir)
<b>I</b>	Élément d'inertie – stocke l'énergie via mouvement ou champ magnétique (bobine, masse)
<b>0 / 1</b>	Nœud de type 0 : effort commun (tension) / Nœud de type 1 : flux commun (courant)
<b>TF</b>	<i>Transformer</i> : élément de transformation énergétique avec rapport de transformation
<b>GY</b>	<i>Gyrator</i> : convertisseur entre effort et flux dans différents domaines physiques
<b>e(t)</b>	Tension électrique en fonction du temps
<b>i(t)</b>	Courant électrique en fonction du temps
<b>V</b>	Tension (volts)
<b>I</b>	Courant (ampères)

<b>P(t)</b>	Puissance instantanée (watts)
<b><math>\eta</math></b>	Rendement énergétique (%)
<b>T</b>	Température (°C ou K)
<b>Q</b>	Quantité d'énergie (Joules) ou débit de chaleur selon le contexte
<b>H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O</b>	Molécules : hydrogène, oxygène, eau
<b>t</b>	Temps (s)
<b>R<sub>th</sub></b>	Résistance thermique
<b>E<sub>cell</sub></b>	Tension d'une cellule de pile à combustible
<b>n</b>	Nombre de cellules en série ou d'électrons échangés
<b>F</b>	Constante de Faraday ( $\approx 96485$ C/mol)
<b><math>\Delta G</math></b>	Énergie libre de Gibbs (J)

## Liste des figures

Figure 01 : Schéma descriptif comparatif.....	09
Figure 02 : Schéma en coupe d'un réservoir d'hydrogène de type IV .....	11
Figure 03 : Schéma en coupe d'un réservoir cryogénique d'hydrogène liquide avec échangeurs thermiques et isolation sous vide.....	11
Figure 04 : Évolution de la capacité mondiale installée en électrolyseurs (2015–2030).....	17
Figure 05 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure 06 : Représentation de la génération d'une paire électron-trou par absorption d'énergie photonique [25].....	19
Figure 07 : Séparation des charges sous l'effet du champ électrique de la jonction P-N [24].....	19
Figure 08 : Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.....	21
Figure 09 : Schéma général du Hardware-in-the-Loop (HIL).....	24
Figure 10 : schéma électrique d'un circuit RL.....	28
Figure 11 : Procédure pour la modélisation du circuit RL.....	28
Figure 12 : Comparaison graphique du circuit RL.....	28
Figure 13 : Causalité dans un lien et schéma bloc associé.....	29
Figure 14 : Bond graph du circuit RL.....	31
Figure 15 : diagramme de context de système de production et valorisation d'hydrogène vert.....	35
Figure 16 : Le diagramme de flux de processus correspondant au système étudié.....	36
Figure 17 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque selon le modèle à une diode.....	38
Figure 18 : Représentation Bond Graph de la cellule photovoltaïque selon le modèle à une diode.....	38
Figure 19 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque selon le modèle à deux diodes.....	38
Figure 20 : Représentation par Bond Graph du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque basée sur le modèle à deux diodes.....	39
Figure 21 : Représentation d'une cellule photovoltaïque avec capacité associée à la diode.....	39
Figure 22 : Modèle électrique équivalent simplifié de l'électrolyseur PEM.....	45
Figure 23 : Word Bond Graph du système d'électrolyse PEM considéré.....	47
Figure 24 : Modèle électrochimique d'une cellule d'électrolyse PEM en Bond Graph.....	48
Figure 25 : Modèle thermochimique de la cellule d'électrolyse.....	52
Figure 26 : Modèle global thermo-électrochimique de la cellule d'électrolyse en Bond Graph.....	53
Figure 27: Différents échanges d'énergie entre le stack et son environnement.....	54
Figure 28 : Modèle thermique d'une cellule d'électrolyse PEM en Bond Graph.....	54
Figure 29 : Modèle fluide de la cellule d'électrolyse en Bond Graph.....	54
Figure 30 : Modèle Bond Graph simplifié de la cellule d'électrolyse PEM.....	60
Figure 31 : schéma fonctionnel d'une éolienne.....	62
Figure 32 : Modélisation structurelle et fonctionnelle de la pale.....	62
Figure 33 : Schéma électrique équivalent simplifié de la turbine éolienne.....	63
Figure 34 : Modélisation structurelle d'une pale flexible à trois sections.....	63
Figure 35 : Représentation Bond Graph du modèle aérodynamique.....	65
Figure 36 : Représentation Bond Graph du modèle aérodynamique.....	65
Figure 37 : Illustration conceptuelle d'une éolienne et modélisation Bond Graph associée.....	66
Figure 38 : Schéma global d'assemblage des Bond Graphs représentant une éolienne.....	66
Figure 39 : Assemblage conceptuel des modèles composants vers le système global.....	67
Figure 40 : Modèle Bond Graph global du système.....	68
Figure 41 : Schéma du modèle électrique équivalent de l'électrolyseur PEM.....	73
Figure 42 : Architecture générale du système global sous MATLAB/Simulink.....	74
Figure 43 : Schéma du sous-système thermique de l'électrolyseur PEM.....	75
Figure 44 : Schéma du sous-système électrochimique de l'électrolyseur PEM.....	75
Figure 45 : Schéma du sous-système chimique de l'électrolyseur PEM.....	76

Figure 46 : Interface utilisateur MATLAB pour le lancement de la simulation et affichage des résultats.....	76
Figure 47 : Évolution de la tension de la cellule d'électrolyseur PEM.....	77
Figure 48 : Évolution du courant de la cellule d'électrolyseur PEM.....	77
Figure 49 : Évolution de la température de la cellule d'électrolyseur PEM.....	78
Figure 50 : Schéma du sous-système chimique de l'électrolyseur PEM.....	78

## Liste des tableaux

<b>Tableau 01</b> : principales propriétés physiques de l'hydrogène.....	18
<b>Tableau 02</b> : Comparaison des émissions polluantes selon les types de carburants (NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , particules fines, etc.) [5].....	19
<b>Tableau 03</b> : Comparaison des principales technologies de stockage de l'hydrogène en fonction de leurs paramètres techniques et de sécurité.[15].....	25
<b>Tableau 04</b> : Les variable d effort et de flux pour chaque domaine.....	39
<b>Tableau 04-1</b> : Variables Bond Graph utilisées pour le développement du modèle.....	40
<b>Tableau 05</b> : Règles d'affectation de la causalité.....	43
<b>Tableau 06</b> : Spécifications techniques du dispositif expérimental pris pour base pour le développement du modèle.....	57
<b>Tableau 7</b> : Paramètres de perméation des gaz utilisés au sein du modèle.....	72

# **INTRODUCTION**

## **GÉNÉRALE**

## Introduction générale

La transition énergétique mondiale constitue aujourd'hui un impératif incontournable, dicté à la fois par l'épuisement progressif des ressources fossiles, par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et par la volonté croissante de garantir une sécurité énergétique durable. Dans ce contexte, les énergies renouvelables telles que le solaire, l'éolien ou encore l'hydroélectricité occupent une place de plus en plus centrale dans les politiques énergétiques à l'échelle nationale et internationale. Toutefois, leur caractère intermittent et variable engendre des défis majeurs en termes de stabilité, de stockage et de flexibilité du système énergétique.

Parmi les solutions émergentes, l'hydrogène vert « produit par électrolyse de l'eau grâce à de l'électricité issue de sources renouvelables » s'impose comme un vecteur énergétique stratégique. Il présente des atouts indéniables : il est propre, stockable et polyvalent, puisqu'il peut être mobilisé dans les secteurs du transport, de l'industrie et de la production d'électricité. Les technologies associées, en particulier les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) et les piles à combustible PEM, affichent des performances prometteuses. Cependant, elles soulèvent encore des défis liés aux coûts de production, à la complexité de leur intégration et à leur gestion dynamique au sein de systèmes hybrides.

La réalisation de plateformes physiques complètes, combinant des sources renouvelables avec des unités de production et de stockage d'hydrogène, reste onéreuse et techniquement complexe, tout en exposant à des risques opérationnels significatifs. De plus, le temps requis pour l'expérimentation ralentit l'innovation et la validation de nouvelles stratégies de commande ou d'intégration. Dans cette optique, le recours aux émulateurs Hardware-in-the-Loop (HIL) apparaît comme une alternative prometteuse. Ces outils permettent de reproduire en temps réel le comportement de systèmes énergétiques complexes sans nécessiter de lourdes infrastructures physiques, tout en offrant un cadre flexible et sécurisé pour l'étude et la validation.

La problématique de ce mémoire s'inscrit dans cette perspective et peut être formulée comme suit : **comment concevoir un émulateur HIL capable de reproduire fidèlement, en temps réel et de manière modulaire, le fonctionnement d'un système holistique de production d'hydrogène vert basé sur des sources d'énergie renouvelables, afin de permettre son étude, son contrôle et sa validation virtuelle ? Cette plateforme pourra alors être utilisée en perspective par les industriels et chercheurs pour le test d'algorithmes de dimensionnement, contrôle, diagnostic, optimisation avant passage à une échelle industrielle**

Pour répondre à cette question, plusieurs verrous technologiques et scientifiques doivent être levés :

Comment modéliser un système multiphysique intégrant des sources d'énergie renouvelable intermittentes couplées à un électrolyseur PEM où se déroulent des phénomènes électrochimiques, mécaniques, thermiques... complexes et couplés ?

- Comment exploiter la théorie des Bond Graphs pour obtenir une représentation cohérente et exploitable du système réel décrit par un modèle non linéaire ?
- Quels outils logiciels et matériels mobiliser afin de réaliser une simulation temps réel fiable et évolutive ?
- Enfin, comment garantir que le comportement de l'émulateur soit représentatif des conditions réelles de fonctionnement ?

L'objectif principal de ce travail est de développer une plateforme d'émulation HIL permettant

la simulation dynamique d'un système complet de production d'hydrogène vert. Cette plateforme repose sur une modélisation rigoureuse, fondée sur la méthode des Bond Graphs et traduite en circuits équivalents électriques, et sur une mise en œuvre via des outils de prototypage rapide et de simulation en temps réel. L'approche proposée vise ainsi à fournir une solution modulaire, évolutive et fiable pour analyser, optimiser et valider les stratégies de commande et d'intégration énergétique avant leur déploiement physique.

La conception d'une plateforme d'un système de production de l'hydrogène vert est complexe et coûteuse en raison de sa complexité et nombre de composants. En effet une plateforme multi source est constituée de sources renouvelables (solaire et éolienne) couplées à un électrolyser et une pile à combustible de type PEM et un ensemble de contrôleurs pour la supervision du système.

L'objectif du projet est de réaliser un émulateur hardware-in-the-loop sous forme de circuits électriques de la plateforme composée d'un étage électronique de puissance et d'un étage de contrôle.

Le livrable final sera fourni sous forme d'une maquette électrique émulant le fonctionnement d'une partie ou de l'ensemble du système de production de H<sub>2</sub> vert montrant les mêmes caractéristiques électriques en temps réel. D'un point de théorique, l'étude est basée sur la théorie des bond graphs, de l'électronique de puissance, du contrôle et du prototypage rapide. Le projet est inscrit dans le cadre d'un projet global complexe de l'émulation des systèmes multiphysiques de domaines couplés électrochimique, thermique, thermodynamique... par des circuits équivalents électriques

Le mémoire sera organisé comme suit :Après une introduction générale sur les problématiques de la technologie des systèmes de production de l'hydrogène et l'intérêt des émulateurs temps réel, le premier chapitre sera consacré à un état de l'art sur les travaux existants dans le domaine de la conception des émulateurs pour justifier ensuite l'intérêt des bond graphs comme outil de modélisation multiphysique basée sur l'analogie et leur utilisation pour réaliser un émulateur d'un électrolyseur. Le deuxième chapitre développera la théorie et la méthodologie des Bond graphs pour le prototypage rapide. Le troisième chapitre concerne le développement de la conception de l'émulateur Hardware-in-the-Loop du système global de production de l'Hydrogène vert, enfin la quatrième partie conclura le travail de recherche et expose quelques perspectives

# Chapitre

## N°01

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

### I. Introduction :

Ce chapitre présente un panorama général sur l'hydrogène vert en tant que vecteur énergétique d'avenir. Il aborde sa définition, ses propriétés, ses procédés de production par électrolyse alimentée en énergies renouvelables, ainsi que les technologies de stockage, d'applications et leurs limites. L'analyse inclut également la situation actuelle de l'hydrogène en Algérie et à l'international. Par la suite, les principales sources renouvelables (solaire photovoltaïque et éolienne) sont examinées à travers leur fonctionnement, avantages et inconvénients. Enfin, le chapitre introduit les outils méthodologiques de validation, notamment le **Hardware-in-the-Loop (HIL)**, la simulation en temps réel et la modélisation multiphysique par **Bond Graphs**, qui constituent des approches clés pour l'étude des systèmes complexes.

### II. Hydrogène vert : un vecteur d'avenir

#### 1. Définition :

La première apparition du terme « **hydrogène vert** » ou « **hydrogène renouvelable** » remonte à l'année 1995, dans une publication du **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** [1], où le terme « hydrogène renouvelable » était utilisé comme synonyme d'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables. Par la suite, l'**État de Californie** a proposé en 2006 [2] une définition opérationnelle de l'hydrogène vert, le décrivant comme un hydrogène produit de manière propre et durable à partir de ressources renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne. Au niveau européen, la première mention officielle de l'hydrogène vert est apparue dans un document politique portant sur la mise en place d'une **économie de l'hydrogène respectueuse de l'environnement** au sein de l'Union européenne [3].

De manière générale, on désigne par **hydrogène vert** un hydrogène produit par **électrolyse de l'eau**, à l'aide d'électricité provenant de **sources d'énergie renouvelables** telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique. Ce type d'hydrogène est largement présenté comme une **alternative durable aux combustibles fossiles**, et comme un **levier stratégique** pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs à forte intensité énergétique, notamment **l'industrie et les transports**.

#### 2. Propriétés physique de l'hydrogène :

L'hydrogène, dont le nom provient du grec ancien *hydro* (eau) et *genes* (engendrer), signifiant littéralement « celui qui engendre l'eau », est un élément chimique de symbole H. C'est un gaz incolore, inodore et insipide, qui constitue environ 75 % de la masse de l'univers et plus de 90 % de ses atomes. Il s'agit de l'élément le plus léger du tableau périodique, avec une masse atomique de 1,008 u, ce qui en fait un constituant fondamental de la matière.

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Sur Terre, l'hydrogène ne se trouve que très rarement à l'état libre en raison de sa grande réactivité chimique. Il est principalement présent sous forme combinée avec d'autres éléments : dans l'eau (H<sub>2</sub>O), les hydrocarbures (comme le méthane CH<sub>4</sub>), mais aussi dans de nombreux composés organiques contenant du carbone, de l'azote ou du soufre. Il peut également être détecté en faibles concentrations dans certains gaz volcaniques ou sources géothermiques. [4] Compte tenu de ses propriétés physico-chimiques particulières, notamment sa faible densité et sa haute énergie massique, l'hydrogène est aujourd'hui considéré comme un vecteur énergétique d'avenir. Le tableau 1 ci-dessous présente un résumé de ses principales propriétés physiques.

<b>Masse moléculaire</b>	<b>2.016</b>
<b>Electronégativité</b>	2.1
<b>Densité de masse (phase gazeuse)</b>	0.0838 kg/m
<b>Masse volumique (phase liquide)</b>	70.8 kg/m
<b>Température d'ébullition</b>	20 K
<b>Température de fusion</b>	13.8 K
<b>Chaleur latente de fusion</b>	58.23 KJ/kg
<b>Chaleur latente de vaporisation</b>	449.59KJ/kg
<b>Chaleur latente de sublimation</b>	507.39KJ/kg
<b>Capacité calorifique (phase gazeuse)</b>	14.9KJ/kg K
<b>Capacité calorifique (phase liquide)</b>	9.69KJ/kg K
<b>Valeur de chauffage supérieur</b>	140MJ/kg
<b>Valeur de chauffage inférieur</b>	120MJ/kg

Tableau 01 : principales propriétés physiques de l'hydrogène

### 3. Propriétés énergétique de l'hydrogène

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente de nombreux avantages techniques et environnementaux qui en font un vecteur énergétique particulièrement prometteur pour les transitions énergétiques en cours.

L'hydrogène possède l'une des densités d'énergie massique les plus élevées parmi les combustibles connus. Il libère environ 120 à 142 MJ/kg lorsqu'il est utilisé, ce qui correspond à deux fois l'énergie libérée par l'essence et près de six fois celle du méthanol. Cette caractéristique est illustrée dans la figure I.1, où l'on observe la comparaison entre l'énergie par unité de masse de différents carburants.

Cette propriété confère à l'hydrogène une grande efficacité pour les applications mobiles

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

(transport terrestre, aérien, maritime) et stationnaires (production d'électricité, cogénération, stockage).

Contrairement aux énergies fossiles, qui reposent quasi exclusivement sur la combustion pour être converties en énergie utile, l'hydrogène peut être exploité selon plusieurs voies de transformation. Cette polyvalence technologique en fait un atout stratégique dans les systèmes énergétiques modernes. L'hydrogène peut notamment :

- Être brûlé directement pour produire de la vapeur d'eau (chauffage, propulsion),
- Être converti en chaleur via la combustion catalytique, à température contrôlée,
- Être transformé en électricité dans des piles à combustible (réaction électrochimique sans combustion),
- Être utilisé comme source de chaleur ou dissipateur thermique dans des processus chimiques, Participer à la synthèse d'ammoniac, de carburants de synthèse ou d'hydrogénation industrielle.
- L'hydrogène, lorsqu'il est produit à partir de sources renouvelables (hydrogène vert), est considéré comme un carburant propre, car son utilisation n'émet aucun gaz à effet de serre, à l'exception possible des oxydes d'azote (NOx) lors d'une combustion à haute température dans l'air. En revanche, lors d'une utilisation électrochimique ou catalytique, aucune émission polluante n'est générée, comme le montre le tableau 2.
- L'hydrogène est ainsi en mesure de contribuer significativement à la décarbonation des secteurs difficiles à électrifier, comme la sidérurgie, le transport lourd, ou l'industrie chimique.

Polluant	Hydrocarbure	Charbon	Hydrogène
$CO_2$	72.40	100.00	0.0
$CO$	0.80	0.65	0.0
$SO_2$	0.38	0.50	0.0
$NO_x$	0.34	0.32	0.10

Tableau 02 : Comparaison des émissions polluantes selon les types de carburants (NOx, CO, CO<sub>2</sub>, particules fines, etc.) [5].

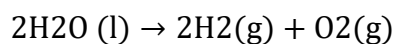
Comme tout vecteur énergétique, l'hydrogène exige le respect de mesures de sécurité spécifiques, notamment en matière de confinement, de ventilation et de détection de fuite. Toutefois, contrairement à d'autres carburants (essence, GPL, diesel), l'hydrogène présente des avantages notables en matière de sécurité :

- Il est non toxique,
- Il se disperse rapidement dans l'air en cas de fuite (car très léger),
- Il n'accumule pas de résidus inflammables,
- Et son seuil de détection (odeur + capteur) permet des dispositifs de sécurité automatisés efficaces.

Ainsi, lorsqu'il est bien maîtrisé, l'hydrogène est considéré comme un carburant à faible risque comparé aux hydrocarbures classiques, tout en offrant une efficacité énergétique et une propriété inégalées.

### **III. Approche technologique de la production d'hydrogène vert par électrolyse alimentée en énergie renouvelable :**

La production d'hydrogène vert repose principalement sur l'électrolyse de l'eau, un procédé électrochimique par lequel l'eau (H<sub>2</sub>O) est dissociée en dihydrogène (H<sub>2</sub>) et en dioxygène (O<sub>2</sub>) sous l'effet d'un courant électrique. Cette méthode devient « verte » lorsque l'électricité utilisée est issue exclusivement de sources renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique. Le schéma global de la réaction est le suivant :



Ce processus se déroule dans une cellule électrolytique comportant deux électrodes (anode et cathode), séparées par un électrolyte qui permet le transport des ions. À l'anode, l'eau est oxydée pour produire de l'oxygène, tandis qu'à la cathode, les protons (ou ions hydroxydes selon le type de cellule) sont réduits pour produire de l'hydrogène.

L'efficacité énergétique du processus varie généralement de 60 à 80 %, selon la technologie employée et les conditions de fonctionnement (température, pression, densité de courant) [6].

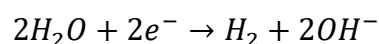
Il existe aujourd'hui trois technologies principales d'électrolyse, différenciées par la nature de l'électrolyte utilisé, la température de fonctionnement, les matériaux d'électrode, et leurs applications industrielles.

#### **1. L'électrolyse alcaline (AWE – Alkaline Water Electrolysis)**

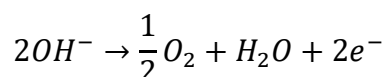
Il s'agit de la technologie la plus ancienne et la plus éprouvée, développée depuis le début du XXe siècle. Elle utilise une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH) ou de sodium (NaOH) comme électrolyte. Les électrodes sont séparées par un diaphragme poreux.

Les réactions électrochimiques sont les suivantes :

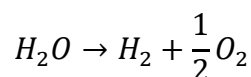
**Cathode (réduction) :**



**Anode (oxydation) :**



**Réaction globale :**



Caractéristiques :

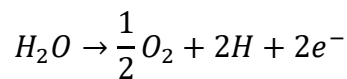
- Température de fonctionnement : 60– 90 °C
- Pression typique : jusqu'à 30 bars
- Rendement : 60– 70 %
- Durée de vie : 60 000– 90 000 heures
- Avantages : Faible coût, maturité technologique
- Limites : Réponse dynamique lente, moins adaptée aux sources renouvelables intermittentes

### 2. L'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM – Proton Exchange Membrane)

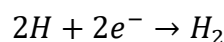
Cette technologie utilise une membrane polymère . Elle est bien adaptée aux applications alimentées par des sources renouvelables en raison de sa flexibilité et de sa réponse rapide aux variations de charge.

Les réactions sont :

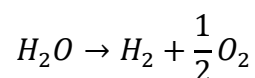
- **Anode (oxydation) :**



- **Cathode (réduction) :**



- **Réaction globale :**



Caractéristiques :

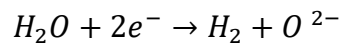
- Température de fonctionnement : 50– 80 °C
- Pression de sortie : jusqu'à 70 bars (sans compresseur)
- Rendement : 65– 75 %
- Densité de courant élevée : jusqu'à 2 A/cm<sup>2</sup>
- Avantages : Compacité, sécurité (pas de liquide corrosif), bonne réactivité
- Limites : Coût élevé (utilisation de platine, iridium), sensibilité à l'eau ultra-pure

### 3. L'électrolyse à haute température (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cell)

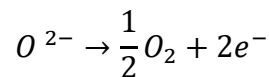
Technologie émergente fonctionnant à haute température (600–850 °C) utilisant un électrolyte céramique conducteur d'oxygène. Elle permet une réduction de l'énergie électrique nécessaire grâce à l'apport de chaleur externe.

Réactions :

- **Cathode :**



- **Anode :**



Caractéristiques :

- Température de fonctionnement : 600–850 °C
- Rendement théorique : > 85–90 %
- Réaction globale : favorisée par l'énergie thermique
- Avantages : Très haute efficacité, valorisation de chaleur fatale
- Inconvénients : Durée de vie limitée, matériaux coûteux, instabilités thermiques
- Applications : Industrie lourde, cogénération, nucléaire couplé[6], [12]

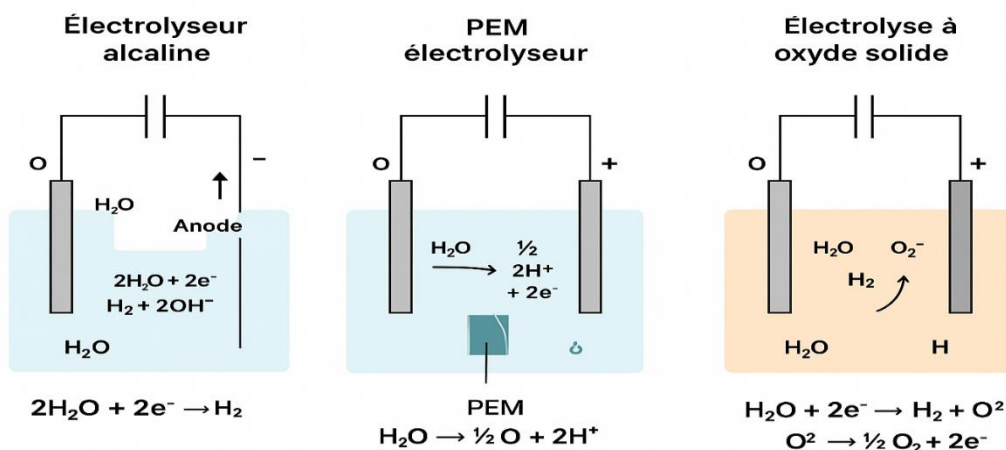


Figure 01 : Schéma descriptif comparatif

### Les électrolyseurs peuvent être alimentés selon trois scénarios principaux :

- Off-grid : uniquement à partir d'une source renouvelable locale (ex. : ferme solaire isolée),
- On-grid : raccordement au réseau avec garantie d'origine renouvelable,
- Hybride : combinaison des deux modes pour fiabiliser l'alimentation électrique.

La flexibilité de l'électrolyse en fait une solution efficace pour absorber les surplus d'électricité renouvelable et participer à la stabilisation des réseaux électriques. L'hydrogène ainsi produit peut être utilisé directement (sur site), stocké (gazeux ou liquide), ou injecté dans les réseaux de gaz naturel (Power-to-Gas).

Enfin, selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), la production d'hydrogène par électrolyse renouvelable pourrait représenter jusqu'à 30 % de la production totale d'hydrogène mondial d'ici 2050, si les politiques de décarbonation sont renforcées [6].

Dans le cadre de ce travail, l'attention se portera plus particulièrement sur la technologie **PEM (Proton Exchange Membrane)** en raison de ses performances dynamiques, de sa densité de courant élevée et de sa compatibilité avec des sources d'alimentation intermittentes. Le projet proposé vise à **concevoir, modéliser et émuler un système complet de production d'hydrogène vert**, basé sur un électrolyseur PEM alimenté de manière hybride par **deux sources d'énergie renouvelable : une installation photovoltaïque et une génératrice éolienne**. Ce couplage présente des défis techniques liés à la variabilité des apports énergétiques, à la gestion de l'électronique de puissance et à l'optimisation de la conversion électrique pour garantir une alimentation stable et efficace de l'électrolyseur. L'approche adoptée consistera à développer une **plateforme Hardware-in-the-Loop (HIL)** qui permettra de simuler en temps réel le comportement de ce système multiphysique, d'en évaluer les performances, et de tester différentes stratégies de commande sans recourir à une infrastructure physique coûteuse. Ce projet s'inscrit dans une démarche de recherche appliquée orientée vers la **flexibilité énergétique**, la **modularité des architectures** hybrides, et la **réduction de l'empreinte carbone** dans la chaîne de valeur de l'hydrogène.

### IV. Stockage de l'hydrogène :

Le stockage de l'hydrogène représente l'un des défis majeurs de sa chaîne de valeur, notamment dans les systèmes de production à base renouvelable. En effet, en raison de sa faible densité volumique à température et pression ambiantes, l'hydrogène occupe un volume très important dans sa forme gazeuse. Pour le transporter, l'utiliser ou le réguler efficacement dans des applications industrielles ou énergétiques, il est donc nécessaire de le stocker de manière sûre, compacte et optimisée.

Il existe aujourd'hui trois grandes catégories de stockage de l'hydrogène : le stockage sous forme gazeuse comprimée, sous forme liquéfiée, et le stockage solide (par absorption ou adsorption). Chacune de ces méthodes présente des avantages, des inconvénients et des domaines d'application spécifiques.

## 1. Stockage gazeux sous pression

C'est la méthode de stockage la plus simple et la plus utilisée à l'échelle industrielle. L'hydrogène est comprimé à des pressions élevées (souvent entre 350 bar et 700 bar) dans des réservoirs cylindriques en acier renforcé ou matériaux composites[6], [7].

- Avantages : technologie mature, mise en œuvre facile, réponse rapide.
- Inconvénients : forte consommation d'énergie pour la compression, risque d'explosion en cas de fuite, volume encore important.
- Applications : stations de ravitaillement, mobilité hydrogène (véhicules, bus), stockage tampon pour électrolyseurs.

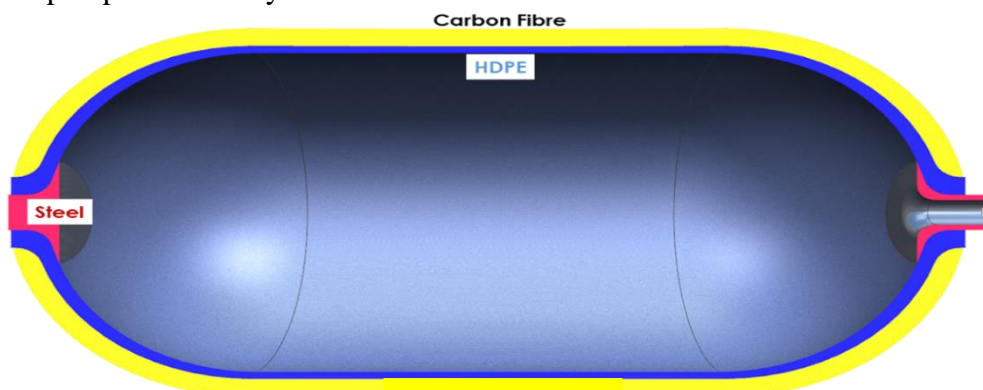


Figure 02 : Schéma en coupe d'un réservoir d'hydrogène de type IV

## 2. Stockage sous forme liquide (cryogénique)

- Le stockage liquide consiste à refroidir l'hydrogène à  $-253\text{ °C}$  (20 K), sa température d'ébullition à pression atmosphérique, pour le transformer en liquide. Cela permet une densité volumique plus élevée ( $\sim 70\text{ kg/m}^3$ )[6], [13].
- Avantages : densité volumique maximale, adapté au transport longue distance.
- Inconvénients : pertes par évaporation (boil-off), coût énergétique élevé ( $\sim 30\%$  de l'énergie stockée), isolation thermique complexe.
- Applications : transports aéronautiques, maritimes, missions spatiales

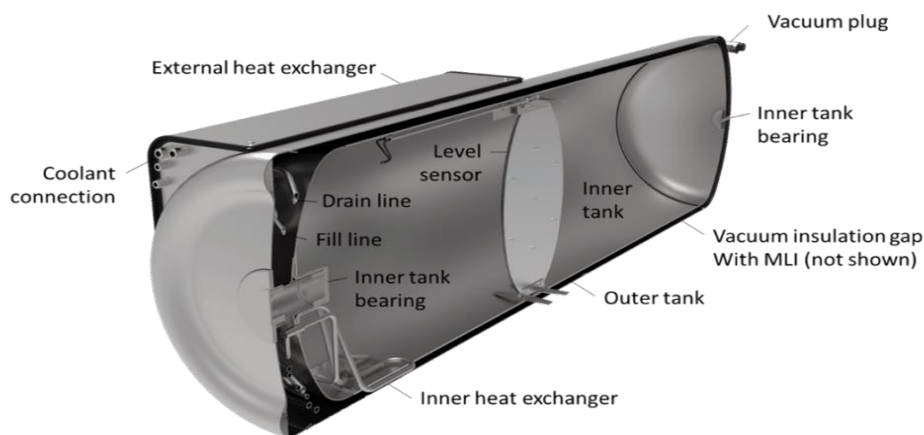


Figure 03 : Schéma en coupe d'un réservoir cryogénique d'hydrogène liquide avec échangeurs thermiques et isolation sous vide

### 3. Stockage solide (matériaux absorbants ou réactifs)

Le stockage solide consiste à fixer les molécules d'hydrogène dans un matériau (métal, hydrure, charbon actif, MOFs) par absorption chimique ou adsorption physique. Ce procédé présente un fort potentiel pour les applications stationnaires et embarquées compactes[6], [14], [15].

- Types de matériaux :
  - Hydrures métalliques ( $MgH_2$ ,  $LaNi_5H_6$ ),
  - Charbon activé / graphène,
  - Structures organométalliques (MOFs),
  - Composites polymères nanostructurés.
- Avantages : sécurité accrue, densité énergétique élevée, faible pression requise.
- Inconvénients : masse élevée, température de fonctionnement parfois élevée, faible cinétique de désorption.
- Applications : drones, systèmes embarqués, micro-stockage intelligent.

### 4. Comparaison des technologies

Technologie	Densité énergétique volumique (MJ/L)	Température	Pression	Maturité	Risques
Gazeux (700 bar)	~5.6	Ambiante	700 bar	Élevée	Fuite/Explosion
Liquide (LH <sub>2</sub> )	~8.5	-253 °C	1 atm	Moyenne	Évaporation cryogénique
Hydrures métalliques	5–12	20–300 °C	1–30 bar	En développement	Chauffage / poids

Tableau 03 : Comparaison des principales technologies de stockage de l'hydrogène en fonction de leurs paramètres techniques et de sécurité.[15]

## V. Application :

L'hydrogène vert, produit par électrolyse à partir d'électricité renouvelable, constitue un vecteur énergétique clé pour de nombreuses applications, tant dans les secteurs industriels que dans la mobilité ou le stockage d'énergie à grande échelle. La combinaison de technologies telles que l'électrolyse PEM, les piles à combustible PEM, et les sources d'énergie renouvelables comme le solaire photovoltaïque et l'éolien permet de mettre en place des systèmes décarbonés et flexibles, capables de fonctionner de manière autonome ou en appui au réseau.

Les applications de ces technologies couvrent aujourd'hui un large spectre allant de la production décentralisée d'électricité à l'alimentation de véhicules hydrogène, en passant par la fourniture de chaleur industrielle ou l'électrification de sites isolés. Leur intégration dans des démonstrateurs à travers le monde confirme leur maturité croissante et leur potentiel dans les scénarios de transition énergétique.

### 1. Microgrids autonomes et sites isolés (off-grid)

Les systèmes combinant panneaux solaires, éoliennes, électrolyseur PEM et pile à combustible PEM permettent de constituer des micro-réseaux autonomes pour l'alimentation électrique de zones éloignées non connectées au réseau.

✓ Exemple réel :

1- projet REFHYNE (Allemagne) [6], [13]

- Localisation : Raffinerie Shell de Wesseling, Rhénanie-du-Nord
- Électrolyseur PEM de 10 MW alimenté en électricité renouvelable
- Objectif : Produire 1 300 tonnes d'hydrogène/an pour usage industriel
- Spécificité : système connecté au réseau, mais capable de fonctionner partiellement en autonomie

2- projet ENERGYPOD (Espagne, 2020) [14]

- Microgrid hybride solaire-éolien-PEM-pile à combustible
- Destiné à un centre logistique isolé (Andalousie)
- Fonctionnement en boucle fermée sans émission

## 2. Mobilité hydrogène (H<sub>2</sub>Mobility) avec PEM

Les piles à combustible PEM sont aujourd'hui la technologie dominante pour les véhicules à hydrogène (voitures, camions, trains, bus), en raison de leur densité de puissance élevée, de leur compacité et de leur temps de réponse rapide.

✓ Exemple réel :

- 1- Toyota Mirai (Japon / Monde) [7], [15]
  - Véhicule équipé d'une pile à combustible PEM (114 kW)
  - Réservoirs à 700 bar, autonomie > 600 km
  - Utilisation croissante au Japon, en Californie et en Europe
- 2- Train hydrogène Alstom Coradia iLint (Allemagne) [6], [15]
  - Train régional 100 % à hydrogène
  - Pile PEM de 200 kW + stockage 350 bar
  - Recharge par électrolyse sur site alimentée par PV et réseau

## 3. Stockage d'énergie et stabilisation du réseau

L'hydrogène vert peut également jouer un rôle essentiel dans la stockage d'énergie renouvelable excédentaire, en particulier dans les régions à fort taux de pénétration solaire ou éolien. Ce stockage est dit Power-to-Hydrogen (P2H), et peut être reconverti en électricité (H2-to-Power) via des piles PEM ou des turbines.

\*\* Exemple réel :

- 1- projet H2RES (Danemark, 2022) [6], [14]
  - Localisation : côte est de Copenhague
  - Électrolyseur PEM de 2 MW alimenté par parc éolien offshore
  - Stockage d'hydrogène pour alimentation station-service + pile PEM pour secours réseau
- 2- projet GRHYD (France – Dunkerque) [13], [15]
  - Injection d'hydrogène dans le réseau de gaz pour usage résidentiel
  - Électrolyseur PEM alimenté par éoliennes locales
  - Étude de faisabilité sur la flexibilité réseau et l'impact CO<sub>2</sub>

## 4. Industrie décarbonée et hydrogène comme matière première

L'hydrogène produit par électrolyse PEM alimentée en renouvelable est de plus en plus utilisé dans des procédés industriels pour remplacer le vaporeformage traditionnel basé sur le gaz naturel (méthane) [7], [14].

\*\* Exemple réel

- 1- projet HYBRIT (Suède)
  - Partenariat SSAB–LKAB–Vattenfall
  - Production d'acier sans énergie fossile

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

- Électrolyse PEM (20 MW pilote, cible : 1 GW) alimentée par éolien et hydroélectricité
- L'hydrogène est utilisé pour réduire le minerai de fer à l'état solide (DRI)

\*\* Le projet proposé dans ce mémoire s'inscrit pleinement dans cette dynamique technologique. Il vise à émuler un système complet de production, de stockage et d'utilisation d'hydrogène vert, reposant sur :

- un électrolyseur PEM alimenté de manière hybride par une source photovoltaïque et éolienne,
- un système de stockage de l'hydrogène sous pression (type 350 bar),
- et une pile à combustible PEM servant à réinjecter l'énergie produite ou à alimenter une charge électrique simulée.

Ce système sera implémenté sous forme de plateforme Hardware-in-the-Loop (HIL) pour simuler le fonctionnement multiphysique en temps réel, optimiser les stratégies de gestion énergétique, et valider le comportement dynamique du couplage PV-éolien-H<sub>2</sub>.

### VI. avantages et limites

- L'hydrogène vert suscite un intérêt croissant au niveau mondial en tant que **vecteur énergétique propre et polyvalent**, capable de contribuer significativement aux objectifs de neutralité carbone. Sa production à partir d'énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien, via électrolyse de l'eau, permet de générer un hydrogène sans émission directe de gaz à effet de serre. Sur le plan environnemental, il constitue donc une alternative prometteuse aux combustibles fossiles, notamment dans les secteurs où l'électrification directe est difficile, comme la sidérurgie, le transport lourd ou les industries chimiques. De plus, l'hydrogène peut être stocké à long terme, transporté, utilisé comme matière première ou reconverti en électricité, ce qui en fait un levier stratégique pour la flexibilité des systèmes énergétiques.
- L'un de ses atouts majeurs réside dans sa densité énergétique massique élevée ( $\approx 120$  MJ/kg), supérieure à celle de nombreux hydrocarbures, bien que sa densité volumique reste faible à l'état gazeux. Son usage dans les piles à combustible, notamment de type PEM, permet une production d'électricité silencieuse, sans combustion ni émission, ce qui le rend particulièrement adapté à des applications embarquées ou urbaines. Des projets comme **HYBRIT (Suède)** dans la production d'acier ou **H2RES (Danemark)** dans le stockage d'énergie montrent que l'hydrogène vert peut s'intégrer efficacement à des écosystèmes industriels ou énergétiques complexes [6][13].
- Il constitue également un excellent moyen de valoriser les surplus d'électricité renouvelable, notamment lors des pics de production solaire ou éolienne, en convertissant cette électricité excédentaire en hydrogène par électrolyse. Cette fonction de **stockage chimique indirect** (Power-to-Gas) offre une solution durable aux problèmes d'intermittence des renouvelables, en permettant de stabiliser le réseau et de décaler l'usage de l'énergie dans le temps.
- Malgré ses avantages, l'hydrogène vert présente encore aujourd'hui plusieurs limites techniques, économiques et logistiques. Le premier obstacle majeur est lié au coût de production élevé, principalement en raison du prix de l'électricité renouvelable et du coût des électrolyseurs (surtout PEM, utilisant des métaux nobles comme le platine et l'iridium). Bien que des progrès significatifs soient attendus, le coût du kg d'hydrogène vert reste actuellement 2 à 5 fois plus élevé que celui de l'hydrogène gris issu du vaporeformage du gaz naturel [6][7].

- La consommation en eau douce pour l'électrolyse peut également poser des limites locales, notamment dans les zones arides, bien que des recherches soient en cours sur l'électrolyse de l'eau de mer et l'utilisation d'eau recyclée. Enfin, le rendement global d'une chaîne hydrogène complète (production → stockage → conversion) reste inférieur à celui du stockage batterie, avec des pertes globales souvent supérieures à 50 %.

### VII. État des lieux de l'hydrogène en Algérie et à l'international

L'hydrogène vert s'impose aujourd'hui comme un levier stratégique dans les politiques énergétiques mondiales. En 2023, la production globale d'hydrogène a été estimée à environ **97 millions de tonnes**, mais **moins de 1 %** de cette production provenait de sources bas-carbone. La majorité reste dominée par l'hydrogène « gris » produit à partir de combustibles fossiles sans captage du CO<sub>2</sub> [6]. Toutefois, les investissements et les projets à grande échelle se multiplient dans l'objectif de verdir cette production. La **capacité mondiale installée en électrolyse** (principalement alcaline et PEM) a atteint **1,4 GW en 2023**, avec plus de **520 GW annoncés d'ici 2030**, bien que seulement **4 %** de cette capacité ait franchi le stade de la décision finale d'investissement (FID) [6][16].

La répartition de cette capacité montre une forte concentration en **Europe (32 %)**, suivie de l'Océanie (21 %), tandis que l'Amérique du Nord progresse lentement. Le nombre de projets annoncés augmente chaque année, mais la majorité en est encore au stade de la planification, freinée par des incertitudes économiques, réglementaires et logistiques [16]. L'hydrogène est désormais au cœur de nombreuses stratégies nationales, tant pour la décarbonation industrielle, que pour la mobilité, la production d'électricité ou encore l'exportation énergétique.

Dans ce contexte international, l'Algérie occupe une position géostratégique privilégiée, en raison de son potentiel solaire et éolien considérable, de ses infrastructures énergétiques existantes, et de sa proximité avec le marché européen. En juillet 2025, le gouvernement algérien a dévoilé un plan d'investissement de 25 milliards USD pour développer une filière nationale de production d'hydrogène vert. L'objectif est d'atteindre une capacité d'exportation de 1 million de tonnes par an à l'horizon 2040, soit l'équivalent de 30 à 40 TWh d'énergie exportée, couvrant potentiellement jusqu'à 10 % de la demande européenne estimée [17].

Ce plan repose sur une répartition énergétique estimée à 70 % d'origine solaire photovoltaïque et 30 % éolienne. Il prévoit la mise en place d'un corridor de transport appelé SouthH<sub>2</sub>, qui traversera la Tunisie, l'Italie, l'Autriche et l'Allemagne, afin d'acheminer l'hydrogène algérien vers l'Europe via des gazoducs existants convertis au H<sub>2</sub> ou mixtes [17][18]. Parallèlement, plusieurs partenariats internationaux ont été signés : notamment entre Sonatrach et les groupes européens Cepsa, Snam, Verbund, VNG, ainsi qu'un protocole de coopération avec **Sasol** en Italie.

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Certaines régions spécifiques du pays sont déjà identifiées comme zones prioritaires de production, comme Tamanrasset ( $\approx 700$  t/an) et Adrar ( $\approx 660$  t/an), en raison de leur très fort ensoleillement. Le coût de production estimé de l'hydrogène vert en Algérie varie entre 1,68 et 2,70 USD/kg, ce qui le place parmi les pays les plus compétitifs au monde [19].

La stratégie nationale repose sur une approche progressive : lancement de projets pilotes (2 à 50 MW), développement de plateformes de démonstration, élaboration d'un cadre réglementaire complet (production, stockage, transport, injection réseau) et préparation du marché intérieur. À long terme, l'Algérie ambitionne d'atteindre 10 GW de capacité installée d'ici 2040. Elle vise à devenir un fournisseur majeur pour l'Europe dans un contexte de diversification énergétique, tout en dynamisant un marché local basé sur l'innovation, la recherche et la formation.

Malgré ces ambitions, plusieurs défis persistent : la conversion technique des gazoducs, la disponibilité des électrolyseurs PEM, les besoins en eau pour l'électrolyse, et surtout, la sécurisation des investissements. Toutefois, les engagements politiques et les avancées technologiques laissent entrevoir une réelle opportunité pour l'Algérie de se positionner comme un acteur de référence dans l'économie mondiale de l'hydrogène.

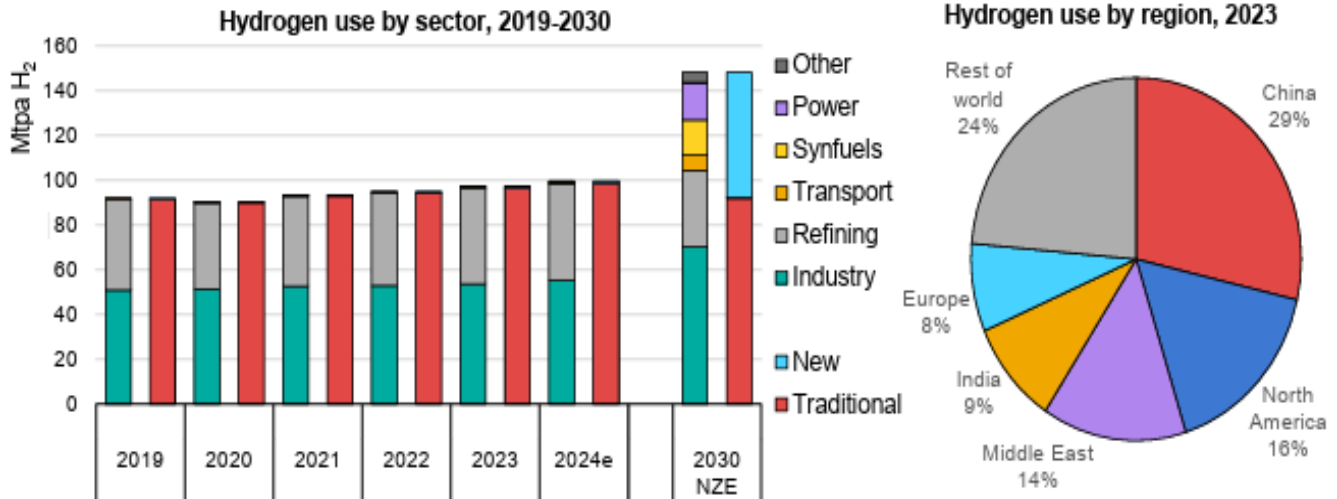


Figure 04 : Évolution de la capacité mondiale installée en électrolyseurs (2015–2030).

Source : IEA, *Global Hydrogen Review*, 2024.

## VIII. Sources renouvelables

### 1. Energie solaire

#### a) définition :

Le terme *photovoltaïque* est issu de la combinaison du mot grec "**photo**", signifiant **lumière**, et du mot "**voltaïque**", dérivé de "**volt**", unité de mesure du potentiel électrique. Il désigne une technologie permettant la **génération d'un courant électrique continu** à partir de matériaux **semi-conducteurs** lorsqu'ils sont exposés à un rayonnement lumineux, en particulier aux **photons solaires**. Ce courant résulte de l'effet photovoltaïque, phénomène physique dans lequel l'énergie des photons incident provoque la libération de charges électriques à l'intérieur du matériau semi-conducteur, produisant ainsi de l'électricité exploitable [20][21].

#### b) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement répandue dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, désigne le processus par lequel l'énergie lumineuse des photons est transformée en énergie électrique au sein d'un matériau semi-conducteur. Ce phénomène repose sur l'absorption de la lumière par la matière, entraînant l'excitation d'un électron. Lorsqu'un photon est absorbé, son énergie est transmise à un électron lié, lui permettant de franchir la bande interdite et de passer d'un niveau d'énergie inférieur, stable, à un niveau supérieur, plus énergétique. Ce transfert génère une paire électron-trou, créant ainsi un déséquilibre de charge dans le matériau.

Ce déséquilibre peut être exploité pour produire un courant électrique lorsqu'un circuit externe est connecté. Toutefois, en l'absence de collecte efficace, cette paire électron-trou peut rapidement se recombiner, restituant son énergie sous forme de chaleur par effet thermique. L'efficacité de la conversion dépend donc de la capacité du dispositif à séparer et collecter ces charges avant leur recombinaison [22].

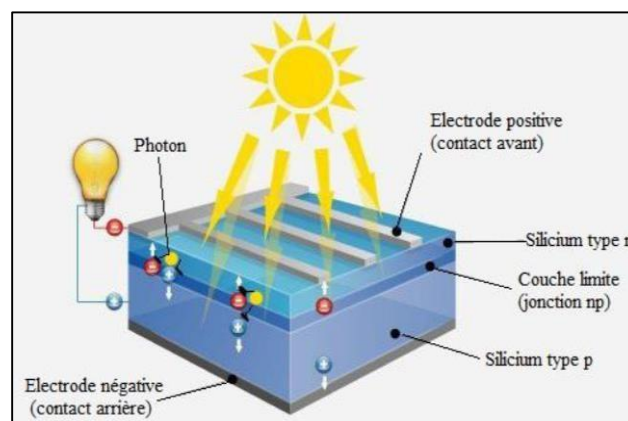


Figure 05 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [23]

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Le silicium, à l'instar des autres matériaux semi-conducteurs, se caractérise par une bande de valence entièrement occupée et une bande de conduction initialement vide. Lorsque le matériau reçoit une énergie suffisante – par exemple sous forme de photons – un électron peut être excité et transféré de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC). Ce phénomène donne lieu à la création d'une paire électron-trou, représentée schématiquement dans la figure I.6 [25].

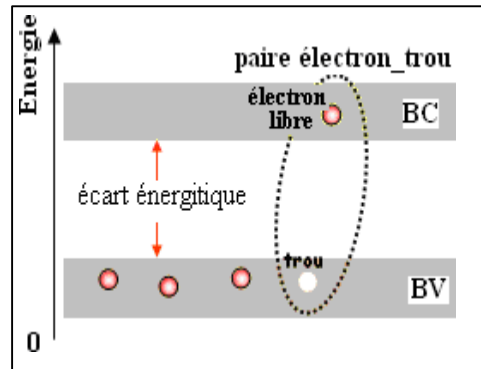


Figure 06 : Représentation de la génération d'une paire électron-trou par absorption d'énergie photonique [25].

Cependant, la seule présence d'électrons dans la bande de conduction ne permet pas, à elle seule, de produire un courant électrique exploitable. Il est indispensable d'établir une différence de potentiel entre les deux extrémités du dispositif, afin de séparer et diriger les charges électriques. Cette dissymétrie est obtenue par la formation d'une jonction P-N, résultant de l'assemblage de deux barreaux de silicium dopés différemment :

- l'un de type N, dopé avec des donneurs d'électrons à une concentration typique de l'ordre de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,
- l'autre de type P, dopé avec des accepteurs générant des trous, à une concentration d'environ  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Le contact entre ces deux régions dopées, associé à des contacts métalliques appropriés, constitue l'élément fondamental d'un dispositif photovoltaïque : la diode semi-conductrice, base de la cellule solaire. La différence de potentiel interne induite par cette jonction permet de collecter les charges générées et de produire un courant électrique lorsqu'un circuit externe est connecté, comme illustré dans la figure I.7 [24].

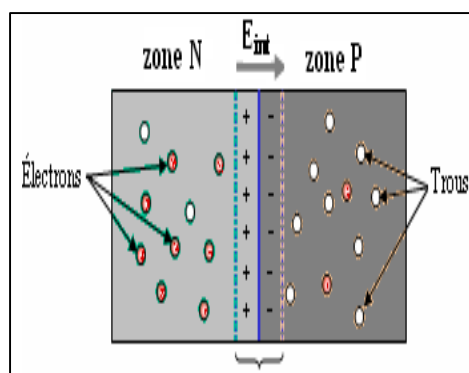


Figure 07 : Séparation des charges sous l'effet du champ électrique de la jonction P-N [24].

### c) Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

#### ● Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique .
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse .
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville .
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez utilisateur .
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle) .
- La durée de vie des panneaux photovoltaïque est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans. )

#### ● Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable .
- Le coût très élevé .
- Faible rendement de conversion .
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente .
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [21].

## 2. Energie éolienne

### a) définition :

L'énergie éolienne correspond à l'exploitation de l'énergie cinétique du vent pour produire de l'énergie mécanique ou électrique. Ce type d'énergie est converti à l'aide de systèmes aérodynamiques appelés éoliennes, qui utilisent les forces exercées par le vent sur des pales pour générer un mouvement de rotation. Cette rotation peut être exploitée directement dans des systèmes mécaniques, ou être convertie en énergie électrique via un générateur, comme c'est le cas dans les aérogénérateurs.

Cette technologie repose sur une ressource naturelle renouvelable, inépuisable à l'échelle humaine et exempte d'émissions polluantes durant son fonctionnement. L'énergie éolienne s'impose ainsi comme un vecteur central de la transition énergétique, notamment dans les zones

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

présentant des régimes de vent réguliers et soutenus. Elle est aujourd'hui largement utilisée dans les systèmes de production autonomes, les micro-réseaux hybrides ou pour l'alimentation directe d'électrolyseurs dans la production d'hydrogène vert [26].

### b) principe de fonctionnement :

Un aérogénérateur, communément appelé éolienne, est un dispositif destiné à capter l'énergie cinétique du vent et à la convertir en énergie électrique. Ce système de conversion repose sur une chaîne de transformation composée principalement d'une turbine (*T*), d'un multiplicateur de vitesse (*M*), d'une génératrice électrique (*GE*) — généralement triphasée —, et d'un système d'électronique de puissance (*EP*) permettant de réguler et d'adapter la puissance délivrée. En fonction de l'application visée, l'aérogénérateur peut être connecté au réseau électrique ou alimenter directement une charge autonome. Un schéma synoptique représentatif de cette structure fonctionnelle est présenté dans la figure I.1.

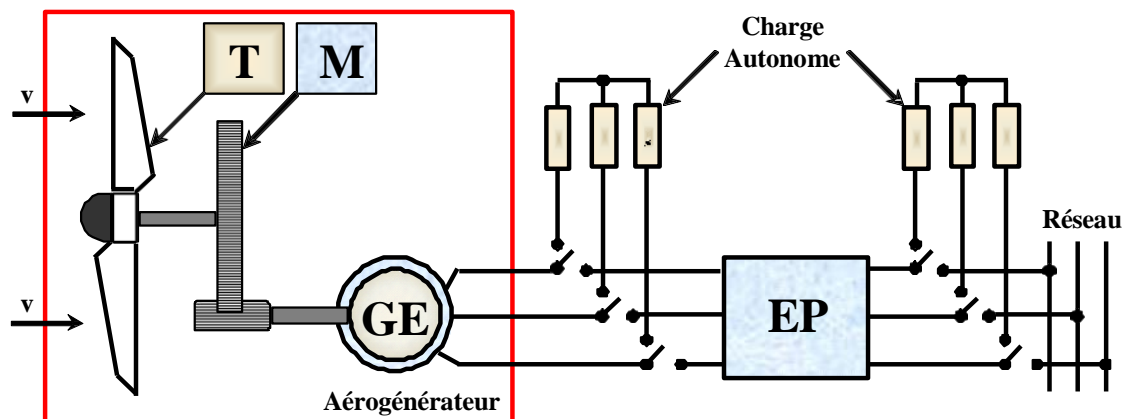


Figure 08 : Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

La puissance disponible dans le vent, notée  $P_v$ , peut être exprimée en fonction de la masse volumique de l'air ( $\rho$ ), de la surface balayée par les pales ( $S_t$ ) et de la vitesse du vent ( $v$ ), selon la relation suivante :

$$P_v = (1/2) \times \rho \times S_t \times v^3 \quad (I.1)$$

Toutefois, cette puissance ne peut être intégralement captée, car cela impliquerait une vitesse nulle du vent en aval de la turbine, ce qui est physiquement irréalisable. La puissance réellement extraite par la turbine, notée  $P_t$ , est donc une fraction de  $P_v$ , déterminée par un coefficient de puissance  $C_p$ , défini par :

$$P_t = C_p \times P_v = C_p \times (1/2) \times \rho \times S_t \times v^3 \quad (I.2)$$

Ce coefficient  $C_p$  dépend de plusieurs paramètres tels que le profil aérodynamique des pales,

la qualité des matériaux, ou encore le système de régulation. Il admet une valeur maximale théorique connue sous le nom de limite de Betz, égale à 0,5926, soit environ 59,3 % de la puissance du vent pouvant être convertie en énergie mécanique [27][28].

Dans le cadre du contrôle des éoliennes, il est courant d'utiliser un autre paramètre, appelé coefficient de couple  $C_m$ , défini par la relation :

$$C_m = T_t / (1/2 \times \rho \times S_t \times R_t \times v^2) \quad (I.3)$$

où  $T_t$  est le couple de la turbine,  $R_t$  son rayon, et  $\Omega_t$  sa vitesse angulaire. Sachant que la puissance mécanique développée est donnée par  $P_t = T_t \times \Omega_t$ , on peut établir une relation entre les coefficients  $C_p$  et  $C_m$ , liée à la vitesse réduite  $\lambda$  (tip speed ratio), définie comme le rapport entre la vitesse périphérique des extrémités de pales et la vitesse instantanée du vent :

$$\lambda = \Omega_t \times R_t / v \quad (I.5)$$

Ainsi, on obtient la relation suivante :

$$C_p = \lambda \times C_m \quad (I.4)$$

Cette modélisation est essentielle pour l'analyse des performances d'une turbine éolienne et l'élaboration de stratégies de commande efficaces, notamment dans les systèmes hybrides intégrant des électrolyseurs pour la production d'hydrogène vert.

## IX. Le Hardware-in-the-Loop (HIL) et la simulation en temps réel

### 3. Généralités sur le HIL

Le **Hardware-in-the-Loop (HIL)** est une approche de test et de validation de systèmes complexes qui combine à la fois des modèles numériques exécutés en temps réel et des composants matériels réels. Cette méthodologie permet de remplacer certains sous-systèmes physiques par des modèles de simulation afin de réduire les coûts, le temps de développement et les risques liés aux essais sur prototypes.

Dans un système HIL, le modèle multiphysique est exécuté sur un simulateur temps réel, tandis que le matériel testé (par exemple un microcontrôleur, un convertisseur de puissance, ou un système de commande) est connecté via des interfaces d'entrée/sortie analogiques et numériques. Les échanges de signaux reproduisent fidèlement ceux que le matériel rencontrerait dans une application réelle, ce qui permet de tester les performances, la robustesse et la fiabilité en toute sécurité [35].

Le HIL est particulièrement répandu dans les domaines où :

- Les **prototypes physiques** sont coûteux ou dangereux (énergies renouvelables, aéronautique, automobile).
- La **validation rapide** des algorithmes de commande est nécessaire.

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

- Les systèmes présentent une forte **complexité multiphysique** (interactions électrothermiques, électromécaniques, électrochimiques).

Les avantages majeurs du HIL incluent :

- **Réduction des coûts** de développement en limitant les prototypes physiques.
- **Sécurité accrue**, car les scénarios critiques ou dangereux peuvent être testés sans risques.
- **Souplesse** dans l'évaluation de multiples stratégies de commande.
- **Accélération du cycle de développement**, en validant plus tôt les choix technologiques.

### 4. Généralités sur la simulation en temps réel

La **simulation en temps réel** est une condition essentielle au fonctionnement du HIL. Contrairement aux simulations classiques exécutées hors ligne, elle doit satisfaire une contrainte stricte :

- Le **temps de calcul** du modèle doit être inférieur ou égal au pas de temps physique du processus étudié.

Par exemple, si un convertisseur de puissance fonctionne à une fréquence de découpage de 20 kHz, le simulateur doit être capable de résoudre les équations du modèle avec une précision suffisante en moins de 50  $\mu$ s par pas de calcul. Cette exigence requiert l'utilisation de calculateurs spécialisés (processeurs DSP, FPGA, ou plateformes temps réel comme dSPACE, OPAL-RT, Typhoon HIL).

La simulation en temps réel repose sur :

- **La discrétisation du modèle** : conversion des équations différentielles en équations algébriques résolues à chaque pas de temps.
- **L'optimisation numérique** : utilisation de solveurs rapides et stables.
- **Le respect des délais de calcul** : aucun retard ne doit s'accumuler, sinon la simulation perd sa synchronisation avec le monde réel.

Applications courantes :

- Test des calculateurs embarqués dans l'automobile (ECU).
- Validation de convertisseurs et systèmes électriques de puissance.
- Recherche sur les réseaux intelligents et les micro-réseaux.
- Étude des systèmes électrochimiques (batteries, piles à combustible, électrolyseurs).

## 5. Vers un HIL pour la production d'hydrogène vert

Dans le cadre de ce mémoire, l'approche HIL sera appliquée au système multiphysique de production et de valorisation de l'hydrogène vert. L'objectif est de développer une plateforme permettant de reproduire en temps réel les phénomènes électriques, électrochimiques, thermiques et hydrauliques associés :

- **Sources renouvelables** : modélisation des panneaux photovoltaïques et éoliennes.
- **Conversion et stockage** : modélisation d'un électrolyseur PEM produisant de l'hydrogène et d'une pile à combustible PEM pour la reconversion en électricité.
- **Interface matérielle** : implémentation sur microcontrôleur (ESP32 ou équivalent) jouant le rôle de calculateur temps réel.
- **Supervision et validation** : création d'une interface de suivi permettant d'observer les variables clés (tension, courant, rendement, température, débit d'hydrogène).

Ce HIL servira comme banc d'essai flexible pour :

- Évaluer des stratégies de commande et de gestion énergétique.
- Tester la robustesse du système face à des variations des ressources renouvelables.
- Simuler des conditions extrêmes ou des défauts afin d'anticiper leur gestion.

En résumé, le résultat attendu est un émulateur HIL multiphysique pour l'hydrogène vert, qui permettra de combiner rigueur scientifique, faisabilité technologique et perspectives d'industrialisation.

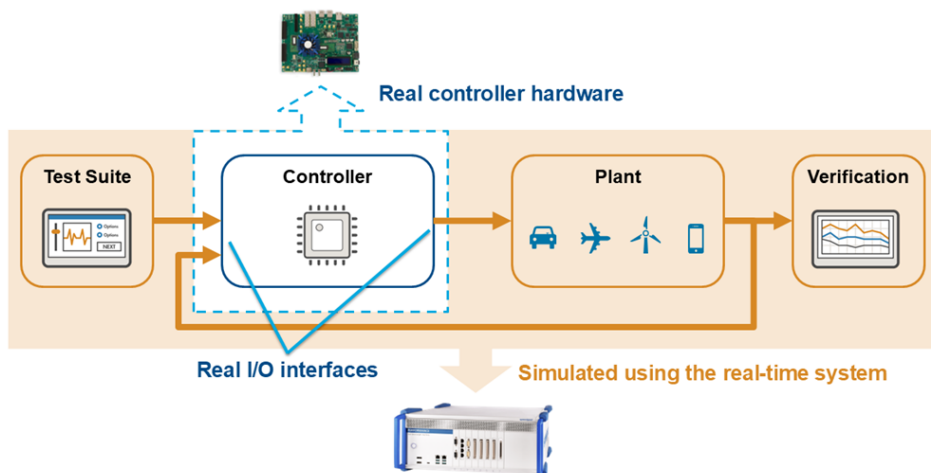


Figure 09 : Schéma général du Hardware-in-the-Loop (HIL)

## X. Les systèmes multiphysiques complexes et la modélisation par Bond Graphs

### 1. Systèmes multiphysiques complexes

Un système multiphysique est défini comme un ensemble de sous-systèmes interagissant entre différentes disciplines physiques : électrique, mécanique, thermique, hydraulique, chimique, etc. Ces systèmes se caractérisent par une forte interdépendance énergétique et une dynamique couplée, rendant leur analyse et leur conception particulièrement complexes [1].

Les systèmes modernes, tels que les chaînes de conversion d'énergie (photovoltaïque–électrolyseur–pile à combustible), les véhicules hybrides, ou encore les réseaux intelligents, illustrent cette complexité multiphysique. Leur modélisation nécessite donc une approche capable de représenter de façon **unifiée** les phénomènes provenant de domaines hétérogènes.

### 2. Modélisation par Bond Graph

La méthode des Bond Graphs constitue une approche graphique de modélisation des systèmes dynamiques, offrant un langage unifié et transversal à l'ensemble des domaines des sciences physiques [Dauphin-Tanguy, 2000]. Elle permet d'intégrer, au sein d'un même schéma, des sous-modèles provenant de disciplines variées – électrique, mécanique, hydraulique, thermique – en assurant une représentation cohérente des échanges d'énergie. Cette démarche facilite la visualisation des relations de cause à effet et garantit le respect des principes de conservation de la puissance.

La construction d'un modèle Bond Graph s'appuie généralement sur trois étapes méthodologiques :

1. **Analyse fonctionnelle** : définition des objectifs et des fonctions principales du système.
2. **Analyse phénoménologique** : identification des phénomènes physiques dominants et des interactions énergétiques.
3. **Analyse comportementale** : élaboration du modèle dynamique détaillé et formulation des équations correspondantes.

#### a) Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle consiste à décomposer le système en **sous-systèmes élémentaires** interconnectés, au sein desquels s'effectuent des échanges de puissance. Les variables de couplage entre ces sous-systèmes, appelées variables de puissance, sont définies par la paire *effort* et *flux*.

Dans une liaison (« bond »), la demi-flèche indique le **sens** du transfert de puissance, tandis que les deux variables associées sont l'effort  $e(t)$  et le flux  $f(t)$ . Le produit de ces deux grandeurs,  $e(t) \cdot f(t)$ , correspond à la puissance instantanée échangée à travers le lien.

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

$$\frac{e(t)}{f(t)} \quad \text{Variables de puissance}$$

On construit le « bond graph à mots » (équivalent au modèle SADT « Structured Analysis and Design Technics »), sous forme de boîtes reliées par des liens BG

Domaine	Effort (e)	Flux (f)	Impulsion p	Déplacement q
<b>Electrique</b>	Tension u (V)	Intensité du courant i (A)	Flux magnétique $\Phi$ (Wb)	Charge q (C)
<b>Mécanique de translation</b>	Force F (N)	Vitesse de translation $\dot{x}$ (m.s <sup>-1</sup> )	Moment J (N.s)	Elongation x (m)
<b>Mécanique de rotation</b>	Couple $\Gamma$ (N.m)	Vitesse angulaire $\omega$ (rad.s <sup>-1</sup> )	Moment angulaire $\Omega$ (N.m.s)	Angle $\Theta$ (rad)
<b>Fluidique</b>	Pression P (Pa)	Débit volumique $V$ (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Impulsion de pression p (N.s/m <sup>2</sup> )	Volume V (m <sup>3</sup> )
<b>Fluidique (Pseudo Bond Graph)</b>	Pression P (N/m <sup>2</sup> )	Débit massique $\dot{m}$ (kg.s <sup>-1</sup> )	Impulsion de pression p (N.s/m <sup>2</sup> )	Masse m (kg)
<b>Thermique</b>	Température T (K)	Flux d'entropie $S$ (J.K <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )	-	Entropie S (J.K <sup>-1</sup> )
<b>Thermique : conduction (Pseudo Bond Graph)</b>	Température T (K)	Flux thermique $Q$ (J.s <sup>-1</sup> )	-	Quantité de chaleur Q(J)
<b>Thermique : convection (Pseudo Bond Graph)</b>	Température T (K)	Flux d'enthalpie $H$ (J.s <sup>-1</sup> )	-	Energie interne U (J)
<b>Chimique (transformation)</b>	Potentiel chimique $\mu$ (J/mol)	Flux molaire $\dot{n}$ (mol.s <sup>-1</sup> )	-	Nombre de moles n
<b>Chimique (cinétique)</b>	Affinité chimique A (J/mol)	Vitesse de réaction $\xi$ (mol.s <sup>-1</sup> )	-	
<b>Chimique (Pseudo Bond Graph)</b>	Concentration C (mol/m <sup>3</sup> )	Flux molaire $\dot{n}$ (mol.s <sup>-1</sup> )	-	Nombre de moles n

Tableau 04 : Variables utilisées en vrai bond graph

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Domaine Physique	Effort (e)	Flux (f)
Electrique	Tension U (V)	Intensité I (A)
Fluidique	Pression P (Pa)	Débit massique $\dot{m}$ (kg.s <sup>-1</sup> )
Thermique (convection et conduction)	Température T (K)	Flux d'enthalpie $H$ (J.s <sup>-1</sup> ) Flux de chaleur $Q$ (J.s <sup>-1</sup> )
Chimique (transformation)	Potentiel chimique $\mu$ (J.mol <sup>-1</sup> )	Flux de matière $\dot{n}$ (mol.s <sup>-1</sup> )
Chimique (cinétique)	Affinité chimique A (J.mol <sup>-1</sup> )	Vitesse de réaction $\xi$ (mol.s <sup>-1</sup> )

Tableau 4-1 : Variables Bond Graph utilisées pour le développement du modèle

### b) Analyse phénoménologique

Les jonctions de type 0 (même effort) et de type 1 (même flux) permettent de généraliser les lois de Kirchhoff à l'ensemble des domaines physiques. Trois éléments fondamentaux, à savoir **R**, **C** et **I**, assurent la modélisation de la transformation de la puissance reçue, soit en énergie dissipée, soit en énergie stockée. Ces éléments obéissent à la convention des récepteurs, interprétée selon l'orientation de la demi-flèche. Quant aux sources idéalisées **Se** (source d'effort) et **Sf** (source de flux), elles représentent respectivement les générateurs de tension et de courant, lesquels suivent la convention des générateurs.

### Procédure de modélisation des systèmes électriques

La construction d'un Bond Graph (BG) dans le domaine électrique repose sur une méthodologie structurée adaptée aux caractéristiques propres de ce champ d'application. La démarche peut être décrite comme suit :

1. **Définition du sens de circulation du courant** : celui-ci est retenu comme orientation de transfert de puissance dans le système.
2. **Identification des nœuds de potentiel** : chaque nœud est représenté par une jonction de type 0.
3. **Placement des jonctions 1** : entre deux jonctions 0, on introduit une jonction 1 à laquelle sont connectés les éléments soumis à la différence de potentiel correspondante.
4. **Connexion des jonctions** : les jonctions sont reliées entre elles par des liaisons, tout en respectant le sens défini pour le transfert de puissance.
5. **Sélection du nœud de référence** : un (ou plusieurs) nœud(s) de référence est choisi, entraînant la suppression de la ou des jonctions 0 associées ainsi que des liens correspondants. Enfin, le schéma est simplifié lorsque cela est possible.

$$\longrightarrow \mathbf{1} \longrightarrow = \longrightarrow \quad \longrightarrow \mathbf{0} \longrightarrow = \longrightarrow$$

# Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Pour montrer chaque étape de la procédure pour les systèmes électriques on présente l'exemple basique d'un circuit  $RL$  (Figure 10).

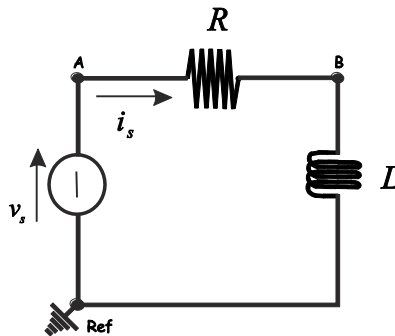


Figure 10 : schéma électrique d'un circuit  $RL$

Pour obtenir le BG on applique la procédure présentée à la (Figure 11).

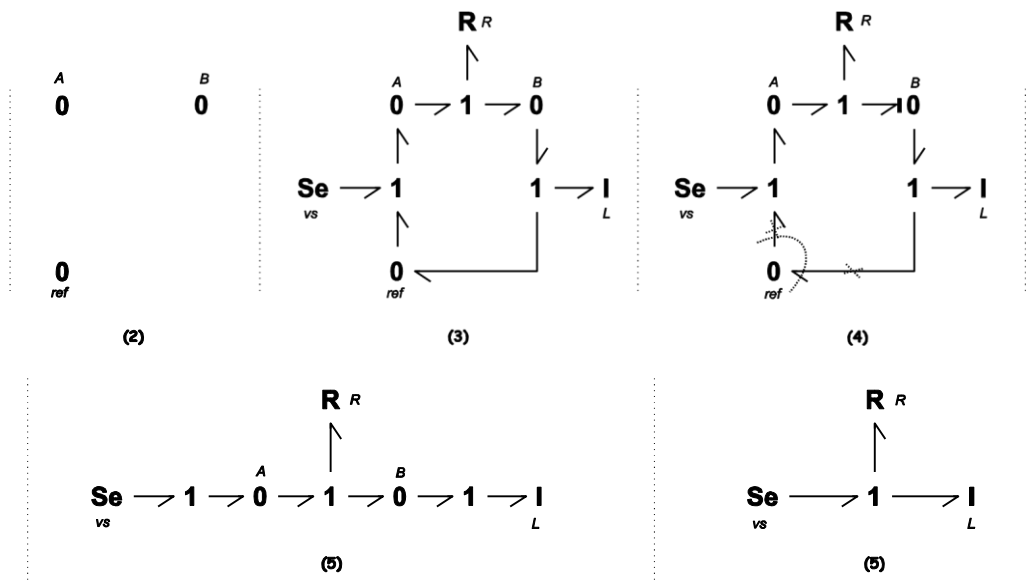


Figure 11 : Procédure pour la modélisation du circuit  $RL$ .

Une comparaison graphique du schéma et du BG est montrée ( Figure 12 ).

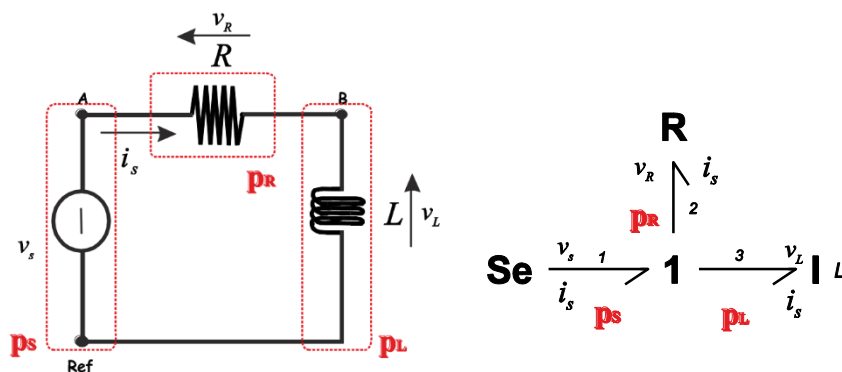


Figure 12 : Comparaison graphique du circuit  $RL$ .

## Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

On voit sur la ( Figure 12 ) que dans le schéma électrique on a les trois éléments qui correspondent aux trois éléments  $S_e$ ,  $R$ ,  $I$  du BG. On associe à chaque lien une puissance instantanée dans une partie bien précise du système. La jonction 1 permet de faire le bilan de puissance  $p_S - p_R - p_I = 0$ .

### c) Analyse comportementale

#### Affectation de la causalité

Indépendamment du sens choisi pour le transfert de puissance, cette étape consiste à construire de manière systématique les équations destinées à la simulation numérique. Elle débute par l'affectation de la causalité, c'est-à-dire la représentation explicite des relations de cause à effet selon une logique algorithmique ou sous forme de schéma-bloc.

La convention adoptée stipule que le trait causal est placé du côté proche de l'élément lorsque l'effort constitue la variable imposée, et du côté **éloigné** lorsque c'est le flux qui est imposé. Cette règle est illustrée dans la Figure 13 : dans la configuration de la (Figure 13a), l'effort est considéré comme une sortie du système A et une entrée du système B, tandis que le flux est, réciproquement, une sortie du système B et une entrée pour le système A.

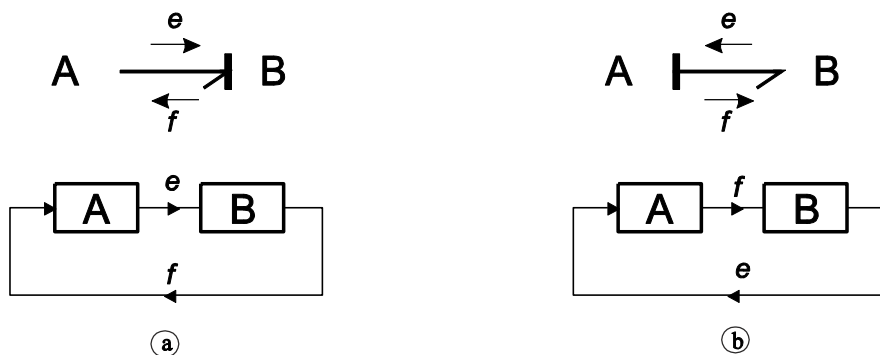


Figure 13 : Causalité dans un lien et schéma bloc associé.

La causalité suit des règles pour les éléments et les jonctions :

- Causalité obligatoire pour les sources.
  - Causalité obligatoire pour les éléments  $R$  avec des lois non inversibles.
  - Causalité intégrale préférentielle pour les  $I$  et  $C$ , éléments de stockage d'énergie.
- Restrictions de causalité pour les jonctions :
- Jonction  $\theta$  : un seul trait causal près du  $\theta$ , ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son effort aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction  $\theta$ ).
  - Jonction  $I$  : un seul trait causal loin du  $I$ , ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son flux aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction  $I$ ).
- Causalité arbitraire pour les éléments  $R$  linéaires pour respecter les restrictions de causalité aux jonctions.

Le Tableau 05 présente les règles d'affectation de la causalité.

# Chapitre N°01 : Fondements théoriques et état de l'art sur l'hydrogène vert et les systèmes multiphysiques

Causalité	Symbole	Loi	Causalité	Symbole	Loi
Restrictions de Causalité		$e_1 = e_i$ $e_2 = e_i$ $\vdots$ $e_n = e_i$	<b>Obligatoire</b>  <b>Intégrale (préférentielle)</b>  <b>Dérivée</b>  <b>Arbitraire (linéaire)</b>  <b>Non arbitraire (non linéaire)</b>	<b>Se</b> $\rightarrow \nearrow$ <b>Sf</b> $\vdash \rightarrow$	$e$ imposé par $Se$ $f$ imposé par $Sf$
		$f_1 = f_i$ $f_2 = f_i$ $\vdots$ $f_n = f_i$		$\vdash \rightarrow$ <b>C</b> $\rightarrow \nearrow$ <b>I</b>	$e = \Psi_c \left( \int f(\tau) d\tau \right)$ $f = \Psi_i \left( \int e(\tau) d\tau \right)$
	$\vdash \rightarrow$ <b>TF</b> $\vdash \rightarrow$ $\rightarrow \nearrow$ <b>TF</b> $\rightarrow \nearrow$ <i>m</i>	$e_1 = m \cdot e_2$ $f_2 = m \cdot f_1$  $e_2 = 1/m \cdot e_1$ $f_1 = 1/m \cdot f_2$		$\rightarrow \nearrow$ <b>C</b> $\vdash \rightarrow$ <b>I</b>	$f = \Psi_c^{-1}(de/dt)$ $e = \Psi_i^{-1}(df/dt)$
	$\vdash \rightarrow$ <b>GY</b> $\rightarrow \nearrow$ $\rightarrow \nearrow$ <b>GY</b> $\vdash \rightarrow$ <i>r</i>	$e_1 = r \cdot f_2$ $e_2 = r \cdot f_1$ $f_1 = 1/r \cdot e_2$ $f_2 = 1/r \cdot e_1$		$\vdash \rightarrow$ <b>R</b> $\rightarrow \nearrow$ <b>R</b>	$e = R \cdot f$ $f = 1/R \cdot e$
				$\vdash \rightarrow$ <b>R</b> $\rightarrow \nearrow$ <b>R</b>	$e = \Psi_r(f)$ $f = \Psi_r^{-1}(e)$

Tableau 05 : Règles d'affectation de la causalité.

De la même manière qu'il y a une procédure pour l'obtention du BG, il y a une procédure pour l'affectation de la causalité.

### c) Procédure d'affectation de la causalité

Procédure :

1. Affecter la causalité (obligatoire) aux sources et aux  $R$  non linéaires et répercuter sur l'environnement.
2. Mettre les  $I$  et  $C$  en causalité intégrale préférentielle et répercuter sur l'environnement.
3. Affecter les causalités aux éléments  $R$  linéaires en respectant les restrictions de causalité aux jonctions.
4. En cas de conflit à une jonction, rechercher l'élément  $I$  ou  $C$  cause du conflit et le mettre en causalité dérivée.

En accord avec la procédure et les règles d'affectation de la causalité, le bond graph acasual de la ( Figure 12 ), devient un bond graph causal ( Figure 14 ).

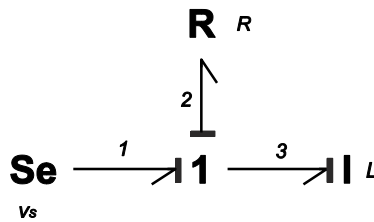


Figure 14 : Bond graph du circuit RL

La causalité dans un BG permet d'obtenir les équations d'état et la fonction de transfert de façon systématique, et de faire différents types d'analyse structurelle.

## XI. Problématique de recherche

La transition énergétique mondiale exige une diversification rapide des sources d'énergie et une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène vert, produit à partir de sources renouvelables via l'électrolyse de l'eau, apparaît comme un vecteur énergétique stratégique en raison de sa polyvalence (stockage d'énergie, mobilité, industrie lourde, production d'électricité). Cependant, le développement et l'intégration des systèmes de production et de conversion d'hydrogène vert présentent plusieurs **défis majeurs** :

- 1. Complexité multiphysique des systèmes hydrogène**
  - Les électrolyseurs et piles à combustible reposent sur des phénomènes électrochimiques, électriques, thermiques et hydrauliques intimement couplés.
  - Une modélisation fidèle de ces interactions reste difficile et nécessite des approches multiphysiques avancées (Bond Graphs, équations de Nernst, Butler-Volmer, bilans énergétiques).
- 2. Variabilité des sources renouvelables**
  - L'intermittence du solaire photovoltaïque et de l'éolien entraîne des fluctuations rapides de puissance qui affectent directement la stabilité du système hydrogène.
  - Le couplage entre sources renouvelables, électronique de puissance et électrolyseur doit être validé par des stratégies de commande robustes.
- 3. Limites des simulateurs numériques classiques**
  - Les logiciels comme MATLAB/Simulink permettent de simuler ces systèmes, mais uniquement de manière hors ligne et souvent simplifiée.
  - Ces simulations ne capturent pas toujours la réponse temps réel ni les incertitudes physiques rencontrées lors d'une expérimentation réelle.
- 4. Besoins d'expérimentation coûteux et contraignants**
  - Les prototypes d'électrolyseurs et de piles à combustible sont onéreux, complexes à manipuler, et nécessitent des conditions de sécurité strictes.
  - Les laboratoires et industriels ont besoin de solutions alternatives fiables pour tester leurs algorithmes de commande et stratégies de gestion énergétique sans risquer d'endommager du matériel réel.

→ Dans ce contexte, l'émulation Hardware-in-the-Loop (HIL) s'impose comme une approche innovante.

Elle permet de reproduire le comportement dynamique d'un système physique en temps réel, en reliant un modèle multiphysique à une plateforme matérielle de commande (microcontrôleurs, DSP, FPGA).

## XII. Objectifs de recherche

### 1. Objectif principal

Concevoir et développer un émulateur Hardware-in-the-Loop (HIL) multiphysique pour un système holistique de production d'hydrogène vert, intégrant des sources renouvelables (PV, éolien), un électrolyseur PEM, une pile à combustible, et l'électronique de puissance associée, en s'appuyant sur la modélisation Bond Graphs et des équivalents électriques.

### 2. Objectifs spécifiques

1. **Étudier et modéliser** le fonctionnement multiphysique des composants clés : électrolyseur PEM, pile à combustible, sources renouvelables, électronique de puissance.
2. **Élaborer un modèle Bond Graphs** représentant les interactions électrochimiques, électriques, thermiques et hydrauliques du système.
3. **Développer des équivalents électriques et circuits simplifiés** permettant l'implémentation du modèle en temps réel.
4. **Concevoir une architecture HIL** intégrant un microcontrôleur (ESP32 ou équivalent) comme unité de traitement et de prototypage rapide.
5. **Valider expérimentalement** l'émulateur par l'application de différents scénarios (variabilité des renouvelables, perturbations, stratégies de commande).
6. **Évaluer la pertinence** de l'émulateur comme outil de recherche, d'enseignement et de développement industriel.

## XIII. Conclusion

L'état de l'art a mis en évidence l'importance de l'hydrogène vert comme solution énergétique durable, tout en révélant les défis liés à son coût, son rendement et son intégration aux réseaux. Les énergies renouvelables, bien qu'indispensables à sa production, restent limitées par leur intermittence. L'étude a également montré que les approches de simulation avancées comme le HIL et les Bond Graphs sont essentielles pour modéliser et optimiser les systèmes multiphysiques. Ces éléments offrent un cadre conceptuel solide et justifient la problématique et les objectifs de recherche présentés à la fin du chapitre.

# **Chapitre**

## **N°02**

### Chapitre 2 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

#### I. Introduction :

Ce chapitre présente l'architecture fonctionnelle d'un système de production d'hydrogène vert et la modélisation de ses principaux sous-systèmes : sources renouvelables, convertisseurs, électrolyseur PEM, stockage et pile à combustible. Chaque composant est décrit à travers l'approche Bond Graph et des schémas électriques équivalents, facilitant l'intégration dans MATLAB/Simulink et la transposition sur microcontrôleur. L'ensemble permet de construire une architecture globale simulable, constituant la base pour la mise en œuvre et la validation Hardware-in-the-Loop.

#### II. Architecture fonctionnelle du système

##### 1. Diagramme de Contexte (Vue macro) :

Le diagramme de contexte illustre la vue macro du système étudié et ses interactions principales avec l'environnement externe, incluant les sources d'énergie, les charges et les flux d'information.

##### d) Définition de SysML

Le **SysML (Systems Modeling Language)** est un langage de modélisation graphique dérivé de l'UML (Unified Modeling Language), spécifiquement conçu pour l'ingénierie des systèmes complexes. Il permet de représenter, à travers différents diagrammes, les aspects structurels, fonctionnels et comportementaux d'un système multiphysique, en intégrant à la fois les flux énergétiques, matériels et informationnels [37][38]. Contrairement à l'UML, principalement orienté logiciel, le SysML est adapté aux systèmes hybrides faisant intervenir à la fois du matériel, des logiciels et des flux physiques [39].

Dans le cadre de la conception d'un émulateur **Hardware-in-the-Loop (HIL)** pour un système de production d'hydrogène vert, la complexité du système étudié (sources renouvelables, électronique de puissance, électrolyseur, stockage, pile à combustible et contrôleur HIL) nécessite une approche méthodologique claire et cohérente. Le choix du SysML se justifie par plusieurs avantages :

- Il permet de représenter **de manière hiérarchisée et modulaire** les sous-systèmes et leurs interactions.
- Il facilite la **communication interdisciplinaire** entre ingénieurs en énergie, automaticiens et informaticiens.
- Il constitue une base solide pour la **transposition vers des environnements de simulation** (MATLAB/Simulink) et l'implémentation temps réel sur microcontrôleur (Arduino).

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Ainsi, l'utilisation du SysML garantit une représentation fidèle de l'architecture fonctionnelle et un support robuste pour la modélisation Bond Graph et la simulation HIL.

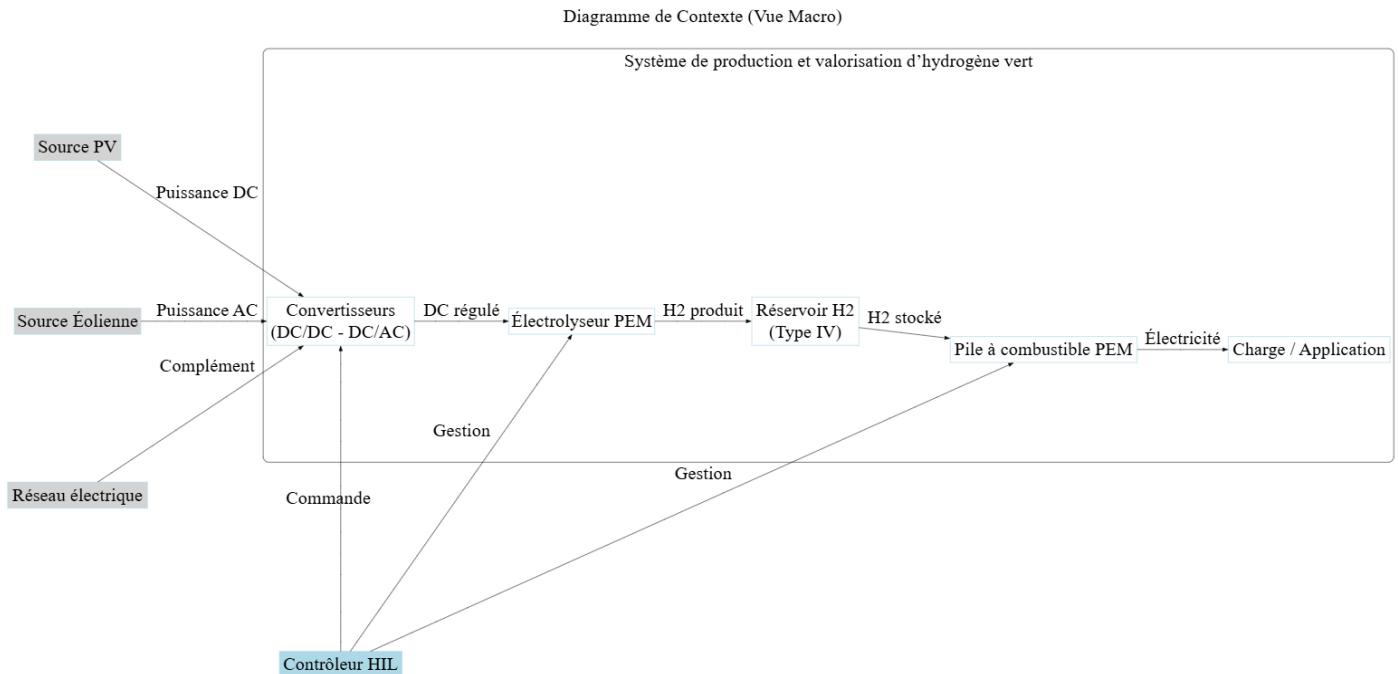


Figure 15 : diagramme de contexte de système de production et valorisation d'hydrogène vert

## 2. Diagramme de flux de processus (PFD)

### a) Définition de la méthodologie PFD

Le **diagramme de flux de processus (PFD, *Process Flow Diagram*)** est une méthode de modélisation graphique largement utilisée en ingénierie des procédés et dans les systèmes énergétiques complexes. Il permet de représenter de manière synthétique les différents sous-systèmes, leurs interactions ainsi que les flux d'énergie et de matière qui circulent entre eux [1]. Contrairement aux schémas électriques ou mécaniques détaillés, le PFD adopte une vision systémique et fonctionnelle du procédé étudié, ce qui le rend particulièrement adapté à la conception et à la validation de systèmes multiphysiques.

Dans le cadre de ce travail, l'utilisation d'un PFD se justifie par la nécessité de **clarifier les échanges énergétiques et informationnels** au sein du système de production et de valorisation de l'hydrogène vert. Cette approche permet non seulement de **structurer les relations fonctionnelles** entre les différentes composantes (sources renouvelables, électrolyseur, stockage, pile à combustible, charges), mais aussi d'identifier les **interfaces critiques** avec l'environnement (rejets thermiques, oxygène produit, consommation d'hydrogène).

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

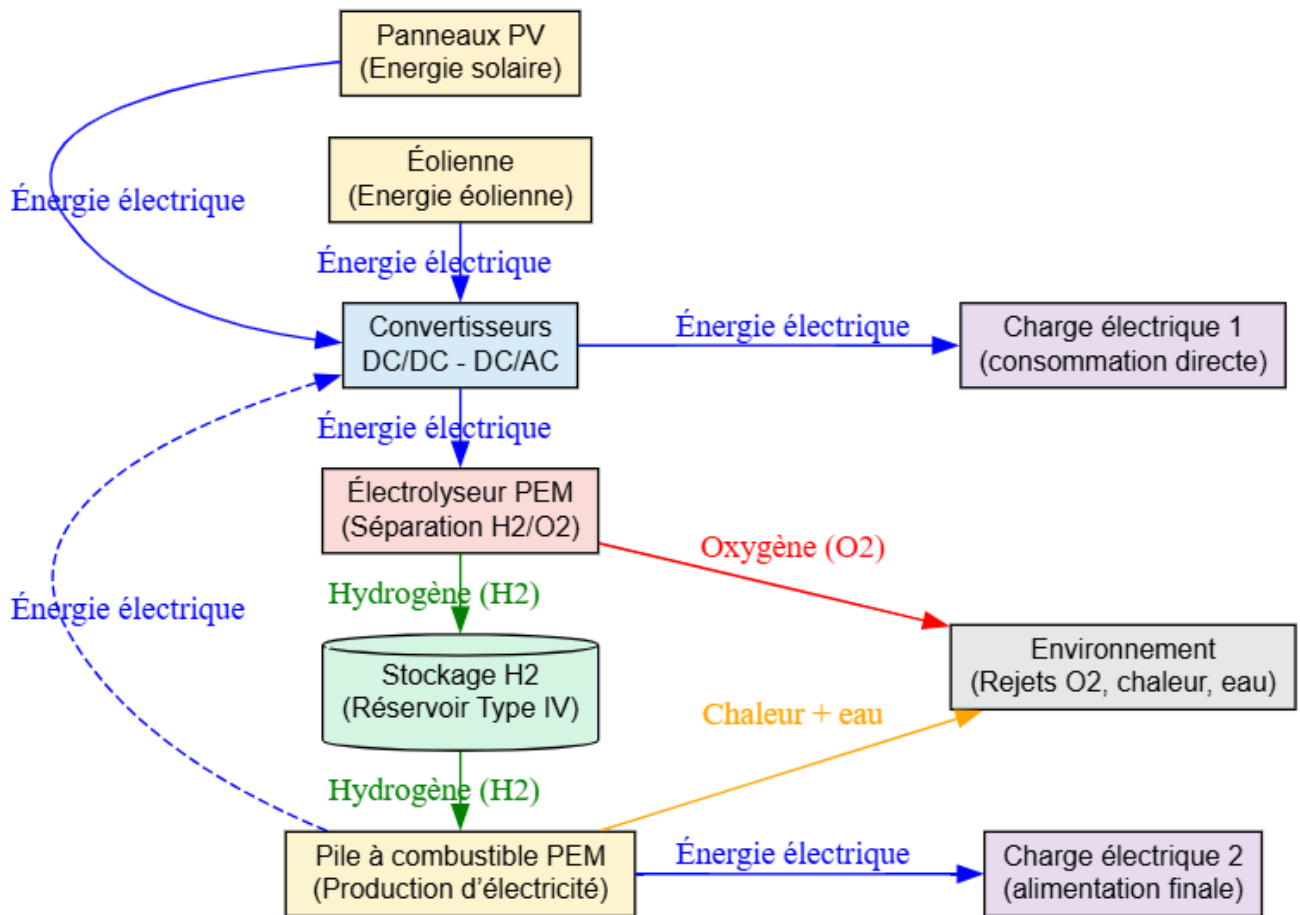


Figure 16 : Le diagramme de flux de processus correspondant au système étudié

La (Figure 16) présente le diagramme de flux de processus correspondant au système étudié. On distingue plusieurs blocs fonctionnels organisés selon la chaîne énergétique :

- **Les sources renouvelables** : panneaux photovoltaïques (PV) et éolienne, qui transforment respectivement le rayonnement solaire et l'énergie cinétique du vent en électricité.
- **Les convertisseurs d'électronique de puissance (DC/DC et DC/AC)**, qui assurent l'adaptation des niveaux de tension et de courant afin d'alimenter l'électrolyseur PEM ou les charges électriques directes.
- **L'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane)**, chargé de scinder l'eau en hydrogène (H<sub>2</sub>) et oxygène (O<sub>2</sub>) à l'aide de l'électricité fournie. L'hydrogène est dirigé vers le réservoir, tandis que l'oxygène est rejeté dans l'environnement.
- **Le stockage d'hydrogène (réservoir Type IV)**, qui permet de conserver l'énergie sous forme chimique pour une utilisation différée.
- **La pile à combustible PEM**, qui reconvertisse l'hydrogène stocké en électricité, produisant simultanément de la chaleur et de l'eau. Cette électricité peut ensuite alimenter une charge électrique secondaire.
- **Les charges électriques**, représentées par deux blocs distincts :
  - une charge alimentée directement par le convertisseur,
  - une charge alimentée par la pile à combustible.
- **L'environnement**, qui reçoit les sous-produits du système (oxygène, chaleur et eau).

### III. Modélisation Bond graph de chaque sous-système

#### 3. Système Photovoltaïque (PV)

La **méthode des graphes de liaisons (Bond Graph)** constitue un outil particulièrement adapté à la représentation et à l'analyse des cellules photovoltaïques, en raison de leur comportement hautement non linéaire et de leur complexité intrinsèque. Cette approche permet de décomposer un système global en plusieurs sous-systèmes interagissant par des échanges d'énergie, ce qui facilite la compréhension et la modélisation de son fonctionnement. Dans ce travail, l'accent est mis sur l'élaboration d'un modèle Bond Graph décrivant le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque à travers trois configurations distinctes. Le **modèle à simple diode (Single Diode Model)** est couramment représenté par une source de courant placée en parallèle avec une diode, associée à une résistance série et à une résistance de shunt, toutes deux de nature parasite.

La présence simultanée de la résistance de shunt et de la résistance de la diode engendre une ambiguïté au niveau de la structure causale. En effet, si une causalité conductrice est attribuée à la résistance de shunt, la résistance de la diode se voit elle aussi contrainte par une causalité spécifique. Cette interaction génère une **boucle algébrique (Algebraic Loop)** entre les deux résistances, puisque le flux circulant dans la résistance de shunt dépend directement du potentiel imposé par la résistance de la diode.

La résistance de la diode est alors déterminée à partir de l'expression implicite suivant [40]:

$$R_d = V_d / I_d \quad (1)$$

$$I_d = I_s (e^{V_d / nV_T} - 1) \quad (2)$$

$$V_d = (I_{ph} - I_d - I) R_{sh} \quad (3)$$

Le **graphe de liaisons équivalent** d'une cellule photovoltaïque est représenté par une **source de flux**  $MSF = I_{ph}$ , dont la valeur varie en fonction de l'irradiation solaire incidente et de la température. La diode, quant à elle, est modélisée par une résistance non linéaire modulée, dont la caractéristique courant-tension est fortement dépendante de la température ambiante.

La figure suivante illustre le **circuit électrique équivalent** de chaque configuration, accompagné de sa représentation en **Bond Graph**. Nous présentons ci-après le cas du **modèle à une diode (Single Diode Model)**.

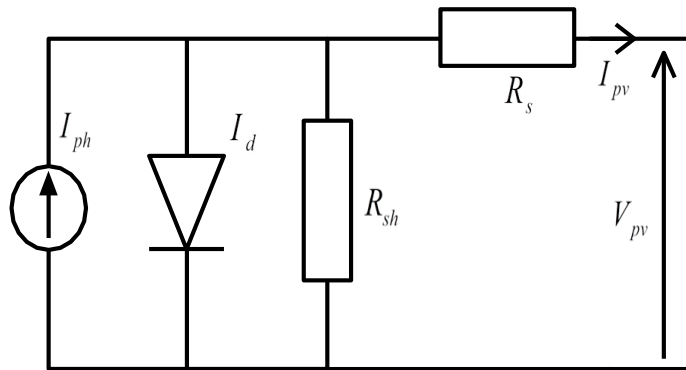


Figure 17 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque selon le modèle à une diode [40]

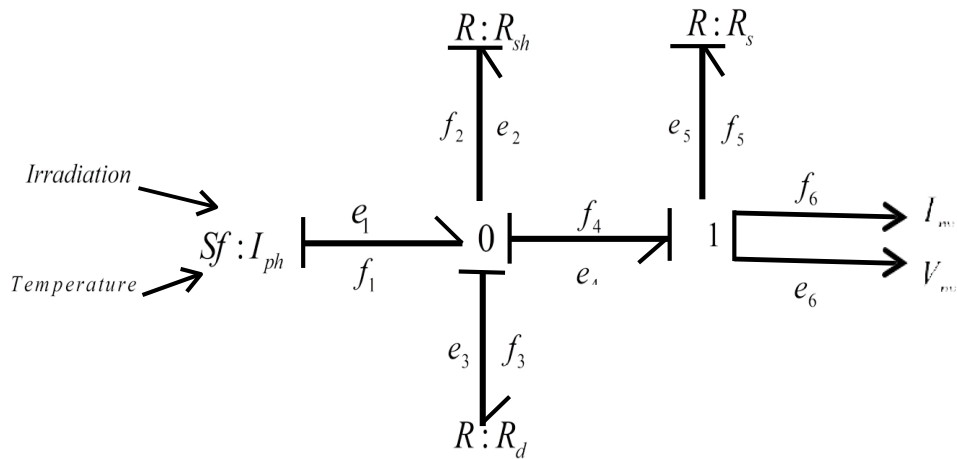


Figure 18 : Représentation Bond Graph de la cellule photovoltaïque selon le modèle à une diode [40]

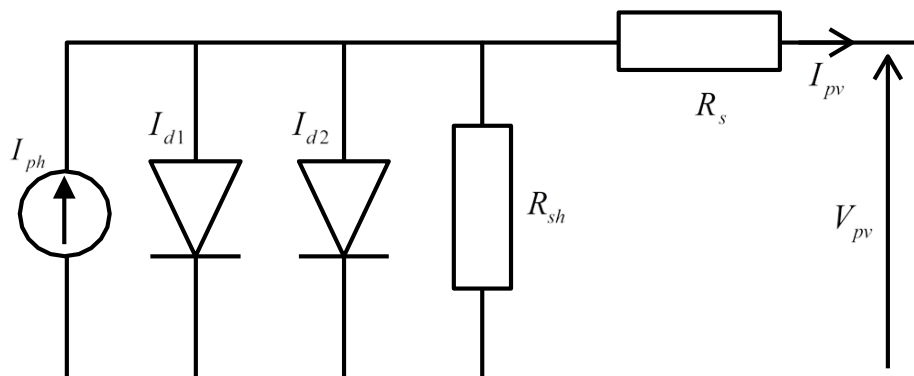


Figure 19 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque selon le modèle à deux diodes.

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Pour le modèle à double diode, le circuit électrique équivalent ainsi que la représentation par Bond Graph sont illustrés respectivement dans les figures 19 et 20. En ce qui concerne le modèle capacitif, la figure 21 présente le circuit équivalent dynamique, tandis que la figure 22 en montre la représentation sous forme de Bond Graph. [41]

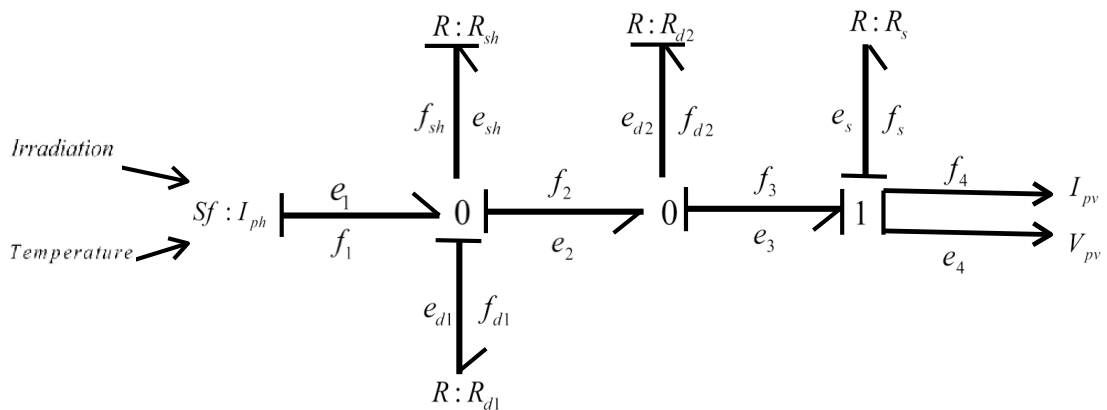


Figure 20 : Représentation par Bond Graph du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque basée sur le modèle à deux diodes.

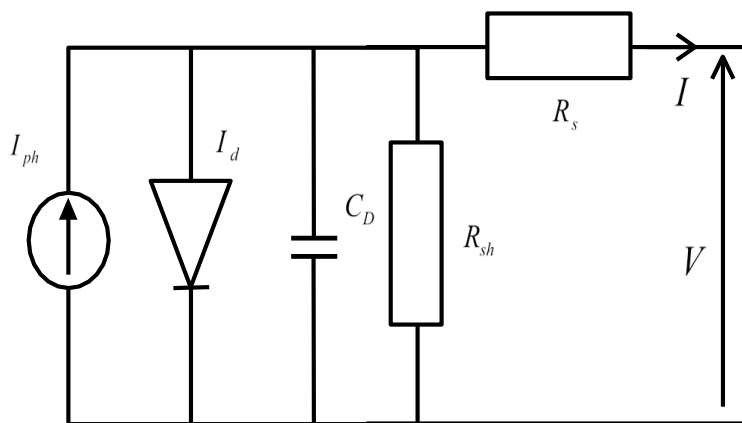


Figure 21 : Représentation d'une cellule photovoltaïque avec capacité associée à la diode.

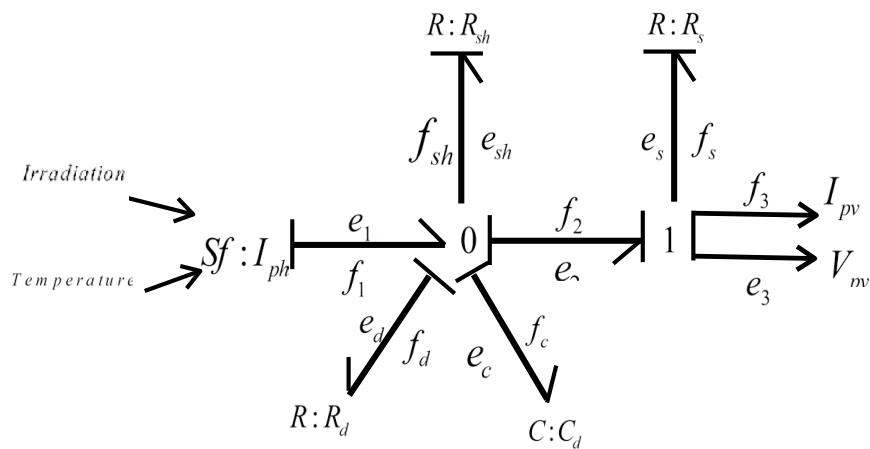


Figure 21-a : Modélisation par Bond Graph d'une cellule photovoltaïque intégrant la capacité de la diode.

Les modèles électriques de cellules photovoltaïques présentés dans la (figure 17) sont largement répandus dans la littérature, en raison de leur simplicité et de leur validation pour une large gamme de cellules photovoltaïques. La représentation en Bond Graph admet deux affectations de causalité différentes. Toutefois, la présence de la résistance de la diode et de la résistance de shunt introduit une incertitude dans la structure causale, générant ainsi des problèmes non linéaires liés à des équations implicites. Ces difficultés apparaissent notamment lors de l'attribution d'une causalité de conductance à  $R_d$  dans les équations (2) et (3), ou d'une causalité de résistance pour ce même  $R_d$ . [42]

$$\begin{cases} V_d = V_T \text{Log} \left( \frac{I_d}{I_s} + 1 \right) \\ I_d = I_{ph} - I_{sh} - \frac{V_d}{R_{sh}} \end{cases} \quad (4)$$

où  $I_{ph}$  représente le courant photo-généré, équivalent au courant de court-circuit  $I_{sc}$ .  $I_s$  désigne le courant de saturation inverse de la diode, tandis que  $V_T$  correspond à la tension thermique, et  $I_{sh}$  traduit le courant traversant la résistance de shunt.

Afin de résoudre le problème de la double boucle de causalité, la source de courant est associée au courant de la diode et remplacée par une unique source de flux. Un modèle simplifié en négligeant la résistance parasite, ce qui permet d'éviter les équations implicites et de faciliter considérablement l'exploitation du modèle du générateur photovoltaïque dans un objectif de commande.

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

À partir des jonctions « 0 » et « 1 » de la représentation en Bond Graph du modèle photovoltaïque (Fig. 18), et en appliquant les règles des Bond Graphs , on peut déterminer les équations régissant chaque jonction.

$$\text{Jonction " 0 " } \begin{cases} e_1 = e_2 = e_3 = e_4 \\ f_1 - f_2 - f_3 - f_4 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Jonction " 1 " } \begin{cases} f_4 = f_5 = f_6 \\ e_4 - e_5 - e_6 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Les lois constitutives des éléments sont exprimées par les équations suivantes :

$$f_1 = I_{ph} \quad (7-a)$$

$$f_6 = I_{pv} \quad (7-b)$$

$$f_2 = \frac{e_2}{R_{sh}} \quad (7-c)$$

$$e_6 = V_{pv} \quad (7-d)$$

$$e_5 = R_s I_{pv} \quad (7-e)$$

$$e_3 = V_T \log\left(\frac{f_2}{I_s} + 1\right) \quad (7-f)$$

De ce fait :

$$e_3 = V_T \log\left(\frac{f_1 - f_2 - f_6}{I_s} + 1\right) \quad (8)$$

À partir des jonctions « 0 » et « 1 » ainsi que de l'équation (7-c)

$$e_3 = V_T \log\left(\frac{f_1 - \frac{e_5 + e_6}{R_{sh}} - f_6}{I_s} + 1\right) \quad (9)$$

En combinant les équations (7-a), (7-d) et (7-e), il est possible de déduire l'expression analytique de la tension de sortie du module photovoltaïque.

$$V_{pv} = V_T \text{Log} \left( \frac{I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} - \frac{R_s I_{pv}}{R_{sh}} - I_{pv}}{I_s} + 1 \right) - R_s I_{pv} \quad (10)$$

À partir des équations précédentes, le courant photovoltaïque  $I_{pv}$  peut s'exprimer de la manière suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (11)$$

Les équations du modèle mathématique à double diode du module photovoltaïque s'expriment comme suit [40] [43] :

$$f_1 = I_{ph} \quad (12)$$

- Première jonction « 0 »

$$f_1 = f_{sh} + f_{d1} + f_2 \quad (13)$$

- Deuxième jonction « 0 »

$$e_{sh} = R_{sh} + f_{sh} \quad (14)$$

$$f_{d1} = I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{e_{d1}}{n_1 V_T} \right) - 1 \right] \quad (15)$$

$$f_{d2} = I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{e_{d2}}{n_2 V_T} \right) - 1 \right] \quad (16)$$

- Au niveau de la jonction « 1 »

$$e_3 = e_s + e_4 \quad (17)$$

$$e_s = R_s f_s \quad (18)$$

Le courant photovoltaïque est noté  $f_4$  et la tension correspondante est  $e_4$ . Ainsi, l'équation courant-tension s'écrit comme suit :

$$f_4 = Sf + I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{e_4 - R_s f_{d1}}{n_1 V_T}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{e_4 - R_s f_{d2}}{n_2 V_T}\right) - 1 \right] + \frac{e_4 + R_s f_s}{R_{sh}}$$

$$I_{pv}(f_4) = I_{ph}(Sf) + I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V_{pv}(e_4) - R_s I_{pv}(f_4)}{n_1 V_T}\right) - 1 \right] + I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V_{pv}(e_4) - R_s I_{pv}(f_4)}{n_2 V_T}\right) - 1 \right] + \frac{V_{pv}(e_4) + R_s I_{pv}(f_4)}{R_{sh}}$$

De nombreux travaux de recherche simplifient le modèle à diode unique en considérant que la résistance de shunt est très élevée et que la résistance série est négligeable. Ces résistances peuvent ainsi être omises dans la modélisation du générateur photovoltaïque. Les nouvelles expressions de la tension et du courant, dérivées des équations (11) et (12), s'écrivent alors comme suit [40] [44]:

$$V_{pv} = V_T \log\left(\frac{I_{ph} - I_{pv}}{I_s} + 1\right) - R_{sh} I_{pv} \quad (21)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[ e^{\frac{V_{pv}}{n V_T}} \right] - 1 \quad (22)$$

#### **4. Electrolyseur PEM (PEME)**

##### **a) Description du système d'électrolyse PEM**

Un système d'électrolyseur de type PEM constitue le cadre de référence retenu pour la modélisation présentée dans ce travail. Toutefois, l'objectif n'est pas de se limiter à une configuration particulière, mais de développer un modèle générique capable de représenter diverses architectures et puissances, et ainsi applicable à des systèmes de plus grande échelle.

L'architecture fonctionnelle d'un électrolyseur PEM se caractérise par une recirculation de l'eau sur les deux compartiments, anode et cathode, conformément aux schémas présentés dans le Chapitre 1. Les spécifications techniques détaillées de ce système ainsi que ses conditions opératoires sont résumées au sein du Tableau 6. Certains composants restent spécifiques à chaque stack, notamment le circuit de refroidissement qui repose sur la circulation d'un fluide caloporteur couplé à un échangeur thermique, garantissant ainsi le maintien des conditions thermiques optimales.

À l'inverse, plusieurs sous-systèmes sont communs à l'ensemble de l'installation. On retrouve en particulier : l'unité de purification de l'eau par osmose inverse, le réservoir de stockage d'eau déminéralisée, le circuit d'évacuation de l'oxygène produit, ainsi que l'unité de purification de l'hydrogène. Cette dernière comprend une colonne de séchage, des vannes de régulation et un dispositif de dépressurisation destiné à stabiliser la pression de sortie du gaz.

Le contrôle d'un électrolyseur PEM repose sur la régulation coordonnée de plusieurs grandeurs physiques essentielles : (i) la température des stacks, assurée par l'action du système de refroidissement ; (ii) la pression de l'hydrogène, pilotée par des vannes de régulation ; (iii) les niveaux d'eau dans les séparateurs, ajustés par des dispositifs de commande dédiés ; (iv) la tension électrique des stacks, maîtrisée par le convertisseur associé ; (v) les débits de recirculation de l'eau, régulés par les pompes hydrauliques.

Ainsi, le modèle proposé vise à reproduire fidèlement le comportement multiphysique de ce type de système, tout en conservant une structure suffisamment flexible pour être adaptée à différentes configurations technologiques et puissances installées.

<b>Technologie d'électrolyse</b>	PEM
<b>Puissance nominale</b>	27 kW
<b>Nombre de stacks</b>	2
<b>Nombre de cellules par stack</b>	48
<b>Surface des cellules</b>	130 cm <sup>2</sup>
<b>Débit de production nominal d'hydrogène</b>	5 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
<b>Densité de courant nominal</b>	0.92 A.cm <sup>-2</sup>
<b>Température nominale</b>	55 °C
<b>Pression d'hydrogène nominale</b>	13 bars
<b>Plage de fonctionnement</b>	10-100 %

Tableau 06 : Spécifications techniques du dispositif expérimental pris pour base pour le développement du modèle

### b) Développement du modèle :

Dans le cadre de cette étude, des modèles pseudo-Bond Graph ont été élaborés pour chacun des composants constituant le système complet d'électrolyse. Le formalisme Bond Graph présente l'avantage de proposer une approche unifiée permettant d'intégrer plusieurs niveaux de modélisation au sein d'un même schéma graphique : (i) le niveau technologique, représenté par le Word Bond Graph (Bond Graph à mots), qui met en évidence l'architecture globale du système ainsi que la nature des échanges de puissance entre ses sous-systèmes ; (ii) le niveau physique, à travers la modélisation des phénomènes multiphysiques par des éléments spécifiques du formalisme ; (iii) le niveau mathématique, qui consiste à exprimer les équations constitutives des différents éléments afin de décrire le comportement dynamique du système ; (iv) enfin, le niveau algorithmique, qui définit les modalités de calcul et d'implémentation des équations obtenues.

Grâce à cette structuration hiérarchique et à l'intégration de la causalité, il devient possible de déduire de manière systématique des modèles dynamiques sous forme d'équations d'état ou de schémas blocs exploitables en simulation. Ainsi, une fois le modèle Bond Graph du système établi, celui-ci est transcrit en schéma blocs et implémenté sous Simulink®.

En complément de cette représentation multiphysique, et afin de faciliter la transposition vers un environnement de simulation électrique, un schéma électrique équivalent de l'électrolyseur PEM est également proposé. Celui-ci permet de représenter de façon simplifiée les phénomènes électrochimiques en les traduisant par des composants électriques classiques (sources de tension, résistances, capacités). La Figure 22 illustre ce modèle équivalent, qui constituera une base pratique pour la mise en œuvre des simulations[45].

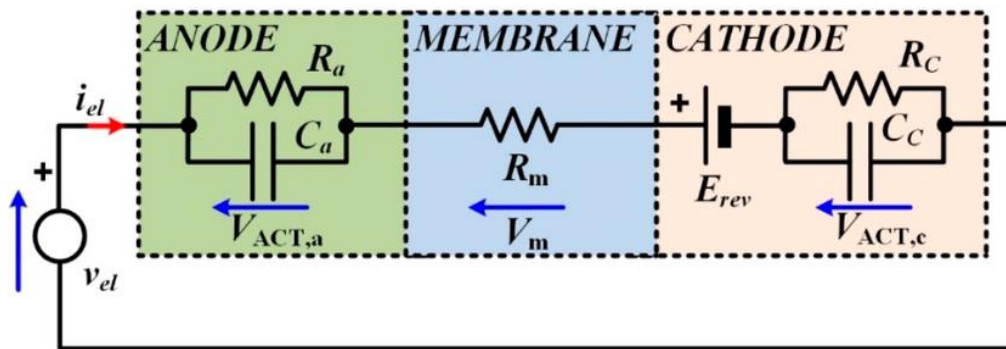


Figure 22 : Modèle électrique équivalent simplifié de l'électrolyseur PEM

### c) Word Bond Graph

La première étape de la démarche de modélisation par Bond Graph consiste à établir le *Bond Graph à mots* du système étudié. Ce schéma permet de décomposer le système en ses différents sous-composants et de caractériser la nature des échanges énergétiques qui les relient. Le *Bond Graph à mots* correspondant au système d'électrolyseur PEM est présenté dans la Figure 23. Dans cette représentation, les lignes bleues traduisent les échanges fluidiques associés à l'eau liquide, tandis que les lignes rouges illustrent les transferts thermiques. Une part importante de ces transferts thermiques est directement couplée avec les échanges fluidiques de l'eau liquide. Par ailleurs, les lignes vertes indiquent les échanges thermo-

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

fluidiques liés aux flux d'hydrogène circulant dans le système, alors que les lignes orange correspondent aux échanges thermo-fluidiques associés aux flux d'oxygène[45] [46].

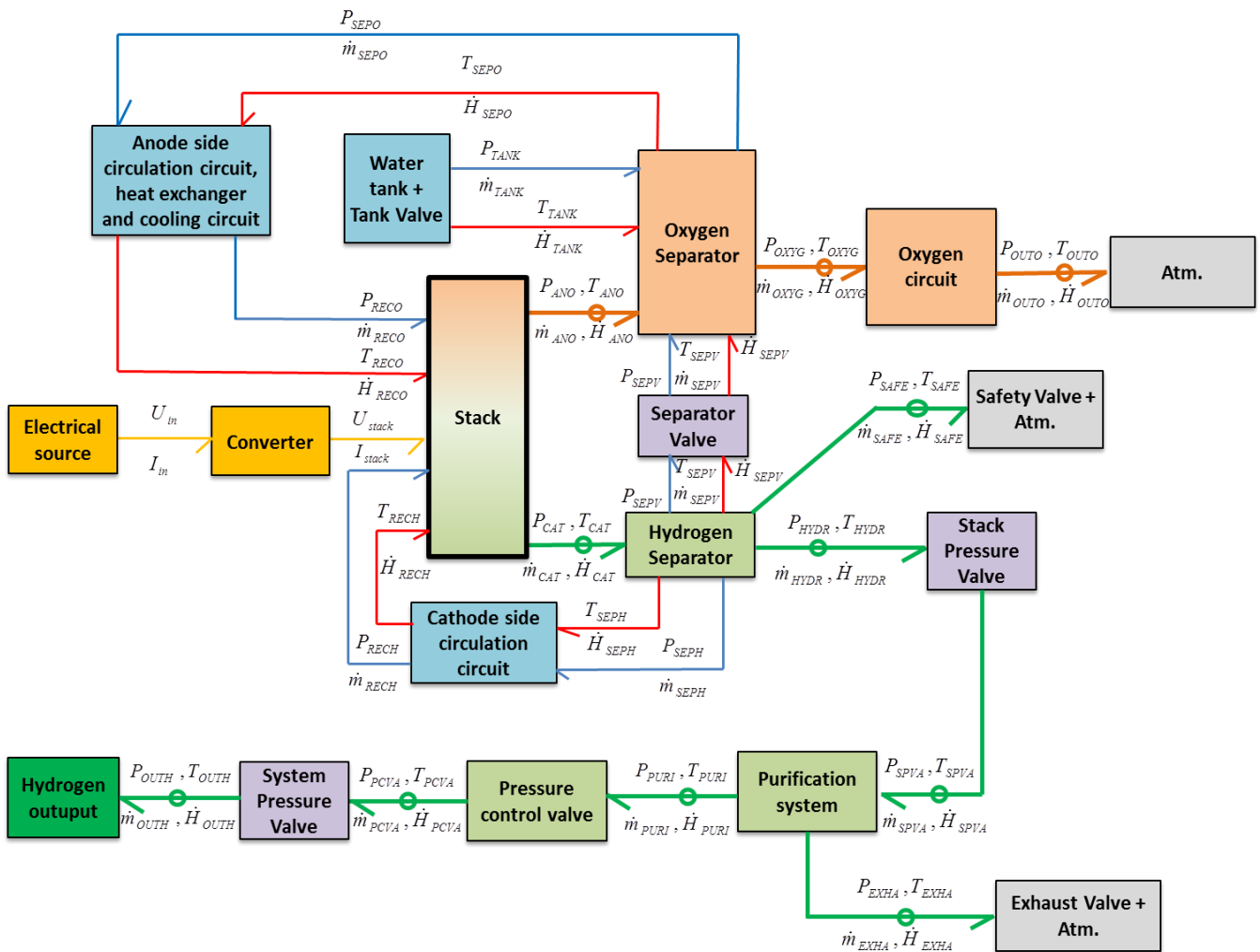


Figure 23 : : Word Bond Graph du système d'électrolyse PEM considéré

Dans les étapes suivantes, les modèles sont élaborés pour chaque composant du système à partir d'une description énergétique des phénomènes, en s'appuyant sur les éléments du formalisme Bond Graph (niveau physique). Ces représentations permettent ensuite de déduire les équations constitutives correspondantes (niveau mathématique). L'intégration de la causalité, qui précise l'orientation des calculs et l'enchaînement des relations (niveau algorithmique), rend possible la traduction de ces modèles sous forme de schémas-blocs exploitables en simulation. Cette méthodologie de modélisation est appliquée à l'ensemble des composants du système identifiés dans le *Word Bond Graph*.

### d) Modèle bond graph du système d'électrolyse

#### Hypothèses générales

L'élaboration d'un modèle repose nécessairement sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices permettant de rendre la modélisation exploitable tout en conservant une représentation réaliste du système. Dans le cadre du développement du modèle d'électrolyseur PEM, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Le modèle est formulé sous la forme d'équations différentielles ordinaires, en supposant des paramètres localisés.
- Les pompes, refroidisseurs et ventilateurs sont assimilés à des sources de flux idéales.
- Les gaz ainsi que leurs mélanges sont considérés comme des gaz parfaits.
- Les phénomènes liés à la formation et à la dynamique des bulles ne sont pas pris en compte. On considère que le débit de circulation d'eau, imposé par les pompes, est suffisant pour éliminer ces effets, qu'il s'agisse du recouvrement, de la limitation de diffusion ou encore de l'influence sur le régime d'écoulement dans les canaux des stacks et des séparateurs.
- Bien que non représenté sur les schémas Bond Graph, l'équilibre liquide-vapeur est pris en considération dans le modèle, notamment au niveau du stack, des séparateurs et de l'unité de purification. On suppose que le système fonctionne à saturation, c'est-à-dire que la pression de vapeur dans ces composants est égale à la pression de vapeur saturante.

#### Cellule moyenne équivalente

Dans ce modèle, le stack est assimilé à une cellule unique, en posant l'hypothèse que l'ensemble des cellules présente un comportement moyen équivalent (hypothèse de la cellule moyenne équivalente). De ce fait, la répartition du courant ainsi que celle des débits de liquide entre les différentes cellules sont considérées comme homogènes. Cette hypothèse, largement adoptée dans la plupart des travaux, demeure valide lorsque le nombre de cellules est suffisamment élevé et que l'écart de comportement des cellules périphériques reste négligeable au regard du fonctionnement global du stack. En conséquence, les modèles Bond Graph développés dans cette section se limitent à la représentation d'une cellule unique [46].

### e) Modèle électrochimique

Compte tenu des temps de réponse électrochimiques d'un stack d'électrolyse PEM, généralement inférieurs à 50 ms, les phénomènes électriques et électrochimiques sont assimilés à des processus quasi-instantanés. En effet, les régimes transitoires associés à ces phénomènes s'avèrent extrêmement rapides au regard des pas de temps utilisés pour la simulation dans le cadre du modèle. De ce fait, ils sont représentés par des équations algébriques, sans recours à des équations différentielles, puisqu'aucun effet d'accumulation n'est retenu. Dans l'approche Bond Graph, le comportement électrique du stack est ainsi modélisé à l'aide de résistances électriques non linéaires, génératrices d'entropie et traduisant les différentes sources d'irréversibilités, ainsi que d'un élément transformateur, chargé de représenter la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique (conversion électrochimique, Figure 24) [45] [46].

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

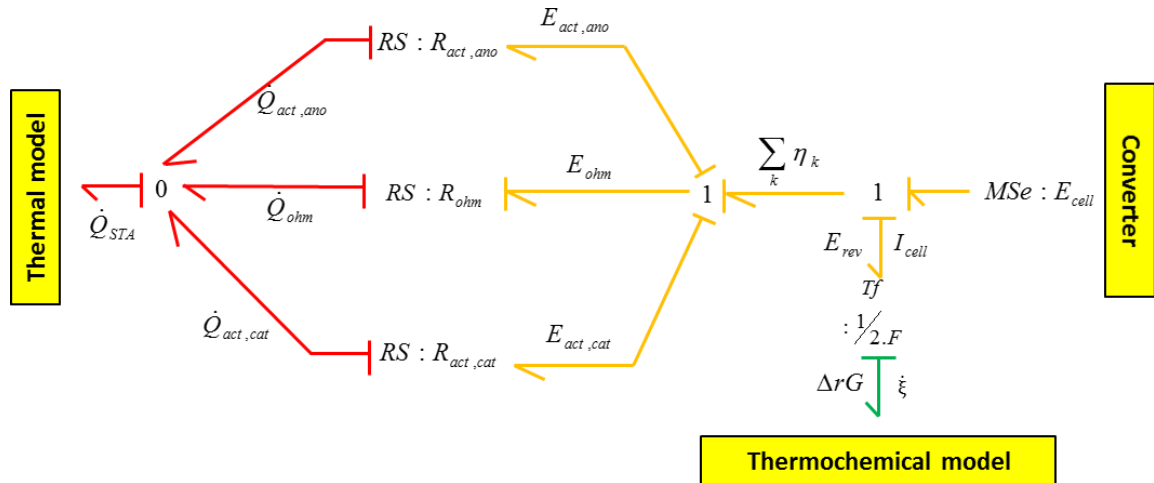


Figure 24 : Modèle électrochimique d'une cellule d'électrolyse PEM en Bond Graph

Les jonctions “1”, intégrées conformément à la causalité du modèle Bond Graph, conduisent directement à l'établissement des équations (23), (24) et (25).

$$\sum_k \eta_k = E_{cell} - E_{rev} \quad (23)$$

$$E_{ohm} = \sum_k \eta_k - E_{act,ano} - E_{act,cat} \quad (24)$$

$$E_{ohm} = E_{cell} - E_{rev} - E_{act,ano} - E_{act,cat} \quad (25)$$

En effet, à courant non nul, la tension de cellule est composée de deux termes, le potentiel réversible  $E_{rev}$ , donné par le modèle thermochimique et les différentes surtensions  $\sum_k \eta_k$ . Les principaux mécanismes de dissipation au sein d'une cellule d'électrolyse PEM sont les suivants : (i) les surtensions d'activation  $E_{act,k}$  lié à la cinétique des réactions électrochimiques au niveau des deux électrodes ; (ii) les surtensions ohmiques  $E_{ohm}$  liées au transport des ions dans l'électrolyte et des électrons dans les électrodes ; (iii) la surtension de diffusion liés aux transports des espèces électro-actives vers ou depuis les sites actifs au niveau desquels se déroulent les réactions électrochimiques. Cette dernière surtension n'apparaît qu'à forte densité de courant et n'est par conséquent, pas considérée au sein de ce modèle. Ces différents termes, et leur description mathématique sont présentés au sein des paragraphes suivants.

### Transformateur électrochimique et potentiel réversible

L'élément transformateur permet de représenter la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Il permet ainsi de représenter la loi de Faraday<sup>12</sup>. Par conséquent, la vitesse de réaction  $\xi'$  est déduite du courant électrique au sein de la cellule, et le potentiel réversible est calculé à partir de l'enthalpie libre de la réaction de dissociation de l'eau  $\Delta_r G$  (équations (26) et (27)).

$$\xi' = I_{cell}/(2.F) \quad (26)$$

$$E_{rev} = (\Delta_r G)/(2.F) \quad (27)$$

Le potentiel réversible représente la tension minimale qu'il est nécessaire d'appliquer entre les électrodes d'une cellule d'électrolyse afin de permettre le déclenchement de la réaction de dissociation de l'eau. Son expression analytique résulte d'un bilan énergétique établi sur le système thermodynamique considéré (le stack) . Dans le cadre de ce travail, ce potentiel est déterminé à partir du modèle thermochimique et formulé à travers l'équation (28).

$$E_{rev} = E_{rev}^0 + \frac{RT}{2.F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (28)$$

Soient  $E_{rev}^0$  le potentiel réversible standard,  $T$  la température,  $R$  la constante des gaz parfaits,  $P_{H_2}$  la pression de l'hydrogène,  $P_{O_2}$  la pression de l'oxygène,  $a_{H_2O}$  et l'affinité chimique de l'eau.

Le premier terme correspond au potentiel réversible standard, défini pour une température donnée, tandis que le second traduit l'écart induit par les conditions opératoires réelles par rapport aux conditions standards. À 298 K, la valeur du potentiel réversible standard est de 1,229 V. Celle-ci varie avec la température, et sa détermination pour une température différente de la valeur de référence peut être effectuée à l'aide des relations de Kirchhoff, comme exprimé dans l'équation (29).

$$E_{rev}^0(T) = \frac{\Delta_r G^0(T)}{2.F} = \frac{\Delta_r H^0(T_0) - T_0 \cdot \Delta_r S^0(T_0) + \int_{T_0}^T \Delta_r C_p^0(T).dT - T \cdot \int_{T_0}^T \frac{\Delta_r C_p^0(T)}{T}.dT}{2.F} \quad (29)$$

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Soient  $\Delta rG^0$  l'enthalpie standard de réaction à la température  $T_0$ ,  $\Delta rS^0(T_0)$  l'entropie standard de réaction à la température  $T_0$  et  $\Delta rC_p^0(T)$  la capacité calorifique standard de réaction à la température  $T$ .

Diverses corrélations empiriques, fondées ou non sur des données issues de tables thermodynamiques, permettent d'évaluer la variation du potentiel réversible standard en fonction de la température [38–42,75,76,83,85,86,88]. Parmi celles-ci, le présent modèle retient l'expression la plus couramment adoptée dans la littérature [75,76,85], dont la formulation est donnée par l'équation (30).

$$E^0(T) = 1,5184 - 1,5421 \cdot 10^{-3} \cdot T + 9,523 \cdot 10^{-5} \cdot T \cdot \ln(T) + 9,84 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \quad (30)$$

Les développements présentés dans les paragraphes suivants visent à établir les équations constitutives des éléments  $R_s$  du modèle Bond Graph. Ces éléments correspondent à une catégorie particulière d'éléments dissipatifs  $R$ , générateurs d'entropie. Ils permettent de quantifier les phénomènes de dissipation thermique (création d'entropie) associés aux différentes irréversibilités présentes au sein de la cellule d'électrolyse, conformément à l'équation (31).

$$\dot{Q}_k = \eta_k \cdot I_{cell} \quad (31)$$

### Surtensions d'activation

Les surtensions d'activation sont directement associées à la cinétique des réactions de transfert de charge électronique se produisant au niveau des sites actifs des électrodes. En s'appuyant sur la théorie du complexe activé appliquée aux deux demi-réactions électrochimiques, il est possible de formuler l'équation de Butler-Volmer, présentée dans l'équation (32). [45]

$$J_{cell} = J_k \left[ \frac{C_{PE}}{C_{PS}} \cdot \exp\left(\frac{\alpha_k \cdot z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT_{STACK}}\right) - \frac{C_{RE}}{C_{RS}} \cdot \exp\left(-\frac{(1-\alpha_k) \cdot z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT_{STACK}}\right) \right] \quad (32)$$

Avec  $C_{PE}$ ,  $C_{RE}$ ,  $C_{PS}$  and  $C_{RS}$  les différentes concentration en produits (P) et réactifs (R) respectivement à proximité des sites réactifs (E) et au sein des couches de diffusion (S),  $\alpha_k$  et  $J_k$  respectivement le coefficient de transfert de charge et la densité de courant d'échange de la demi-réaction se produisant à l'électrode  $k$ ,  $z$  le nombre d'électrons impliqués dans la demi-réaction.

Dans un premier temps, il est supposé que la diffusion des espèces n'intervient pas comme facteur limitant dans le déroulement de la réaction électrochimique. Ainsi, les concentrations à proximité immédiate des sites actifs sont considérées identiques à celles présentes dans l'électrolyte, ce qui conduit à négliger les surtensions de diffusion dans le modèle (équation (33)). Cette hypothèse reste pertinente tant que la densité de courant

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

demeure modérée, le phénomène de limitation diffusionnelle n'apparaissant généralement qu'à des valeurs élevées (typiquement supérieures à  $2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Or, la densité de courant maximale retenue dans le cadre de ce système est de  $0,92 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , ce qui justifie la validité de cette approximation.

$$J_{cell} = J_k \left[ \exp\left(\frac{\alpha_k \cdot z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT_{STACK}}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\alpha_k) \cdot z \cdot F \cdot E_{act,k}}{RT_{STACK}}\right) \right] \quad (33)$$

La seconde hypothèse consiste à considérer les coefficients de transfert de charge égaux à 0.5. En d'autres termes, on suppose que le processus de transfert électronique de charge est symétrique. C'est une hypothèse communément admise afin d'obtenir l'équation de Butler-Volmer sous une forme réduite. Ainsi l'équation (34) est obtenue afin de calculer les surtensions d'activation. C'est l'équation intrinsèque des éléments RS non linéaires  $R_{act,ano}$  et  $R_{act,cat}$ .

Les densités de courant d'échange pour chaque électrode sont des paramètres de calage du modèle et la température du stack est donnée par le modèle thermique du stack.

$$E_{act,k} = \frac{R \cdot T_{STACK}}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J_{cell}}{2 \cdot J_k} \right) \quad (34)$$

### Surtensions ohmiques

Les surtensions ohmiques sont associées aux phénomènes de transport électronique et ionique, ainsi qu'à la résistance non nulle des matériaux constitutifs de la cellule face à ces mécanismes de conduction. Elles trouvent leur origine dans divers éléments tels que l'électrolyte, les électrodes, les plaques bipolaires ou encore les résistances de contact. Leur caractérisation est réalisée à travers l'élément  $R_S$   $R_{ohm}$ . Conformément à la causalité du modèle, cet élément permet de déterminer l'intensité du courant en fonction des surtensions ohmiques  $E_{ohm}$  (équation (25)) et de la résistance ohmique globale de la cellule  $R_{ohm}$  (équation (35)) [45] [46].

$$I_{cell} = \frac{E_{ohm}}{R_{ohm}} \quad (35)$$

La résistance ohmique de la cellule est composée de la résistance de la membrane PEM et d'autres contributions (équation (98)).

$$R_{ohm} = \frac{L_{PEM}}{\sigma_{PEM} \cdot A_{PEM}} + R_{autres} \quad (36)$$

Avec  $L_{PEM}$  l'épaisseur de la membrane PEM,  $A_{PEM}$  sa surface et  $R_{autres}$  la résistance ohmique équivalente des autres contributions de la cellule hormis celle de la membrane.

Les autres contributions ohmiques sont agrégées au sein d'une seule et unique résistance  $R_{autres}$ , qui est un paramètre de calage du modèle électrochimique. Le taux d'humidité de la

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

membrane est considéré comme constant et fixé à une valeur de 16 (usuellement compris entre 14 et 21).

$$\sigma_{PEM} = (0.5139 \cdot \lambda - 0.326) \exp \left[ 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (37)$$

Finalement l'équation globale de la courbe de polarisation du stack d'électrolyse ainsi obtenue est exposée au sein de l'équation (38).

$$E_{cell} = E_{rev}^0 + \frac{R \cdot T_{STACK}}{2 \cdot F} \ln \left( \frac{P_{H_2} \cdot \sqrt{P_{O_2}}}{a_{H_2O}} \right) + \frac{R \cdot T_{STACK}}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J_{cell}}{2 \cdot J_{ano}} \right) + \frac{R \cdot T_{STACK}}{F} \sinh^{-1} \left( \frac{J_{cell}}{2 \cdot J_{cat}} \right) + \left( \frac{L_{PEM}}{\sigma_{PEM} \cdot A_{PEM}} + R_{others} \right) I_{cell} \quad (38)$$

### f) Modèle thermochimique

Le modèle thermochimique du stack est présenté au sein de la Figure 25.

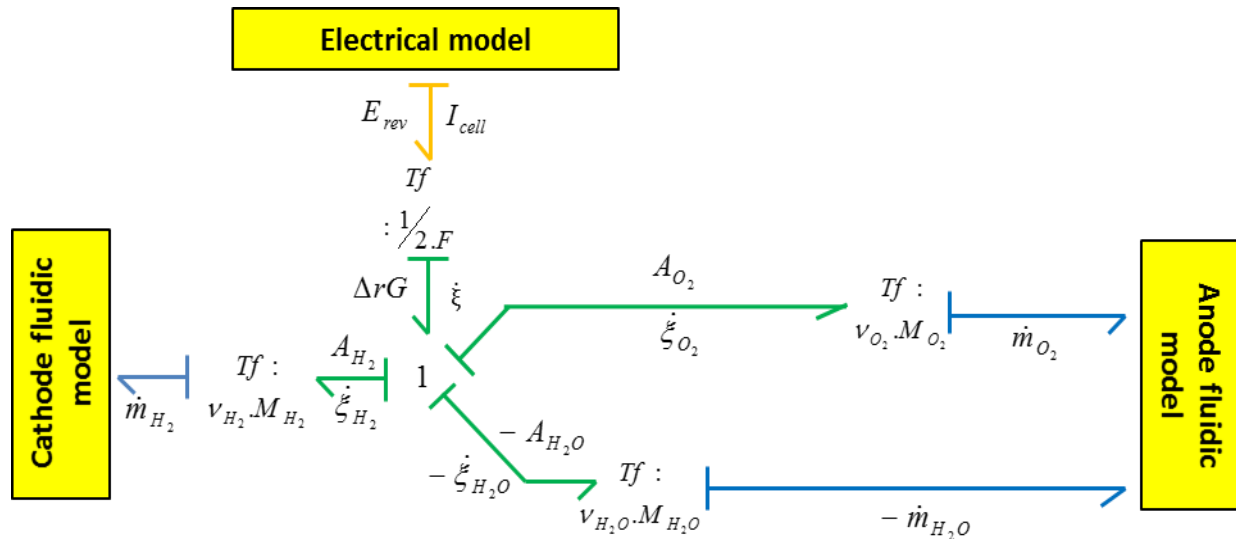


Figure 25 : Modèle thermochimique de la cellule d'électrolyse

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Les éléments transformateurs TF du modèle thermochimique permettent de calculer les débits massiques des espèces produites et consommées par la réaction (équation (39)). Finalement, le modèle global thermo-électrochimique du stack est présenté au sein de la Figure 26.

$$\dot{m}_i = \nu_i \cdot M_i \cdot \frac{I_{cell}}{2 \cdot F} \quad (39)$$

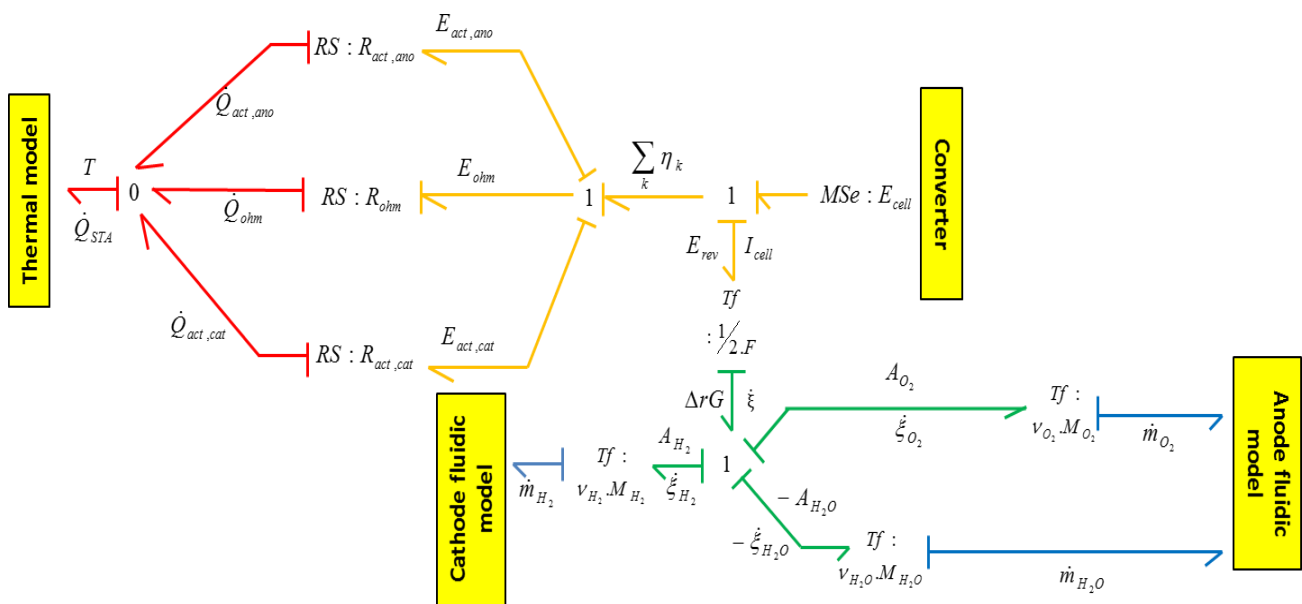


Figure 26 : Modèle global thermo-électrochimique de la cellule d'électrolyse en Bond Graph[45]

### g) Modèle thermique

L'augmentation de la température du stack entraîne une diminution du potentiel réversible. Par ailleurs, les processus d'activation électrochimique, de transport ionique et électronique, ainsi que de transfert de matière, sont tous thermo-activés. Ainsi, l'augmentation de la température contribue globalement à la réduction de la tension de cellule. Afin de prendre en compte cette influence sur le comportement thermochimique du stack, et par conséquent sur son rendement, un modèle thermique a été élaboré et couplé au modèle électrochimique (Figures 26 et 28) [45].

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

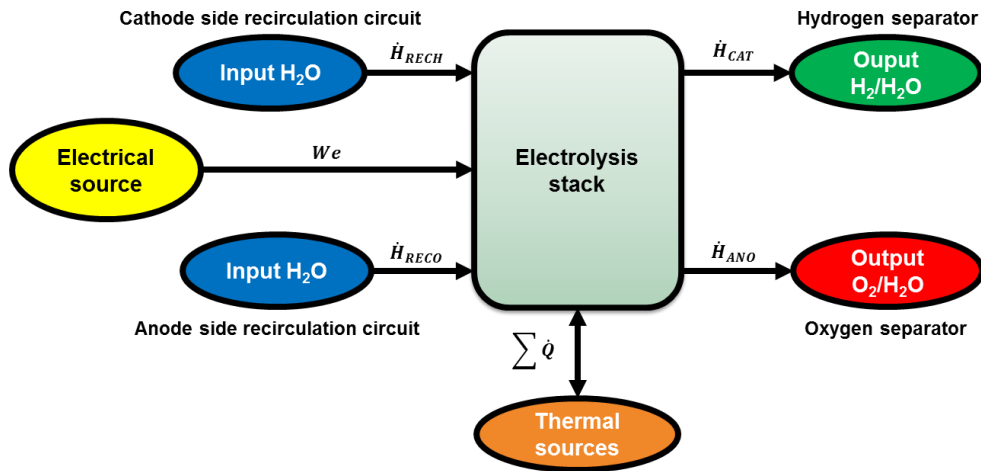


Figure 27: Différents échanges d'énergie entre le stack et son environnement

En accord avec les hypothèses générales, ce modèle thermique est à paramètres localisés. Une seule capacité thermique, supposée constante, est considérée pour le stack. En conséquence, la température du stack est supposée homogène. Par ailleurs, on considère que l'évaporation de l'eau au sein du stack possède un impact négligeable sur l'évolution de sa température. Etant donné les différents échanges d'énergie entre le stack d'électrolyse et son environnement (la Figure 27), le modèle Bond Graph ainsi obtenu est représenté au sein de la Figure 28 .

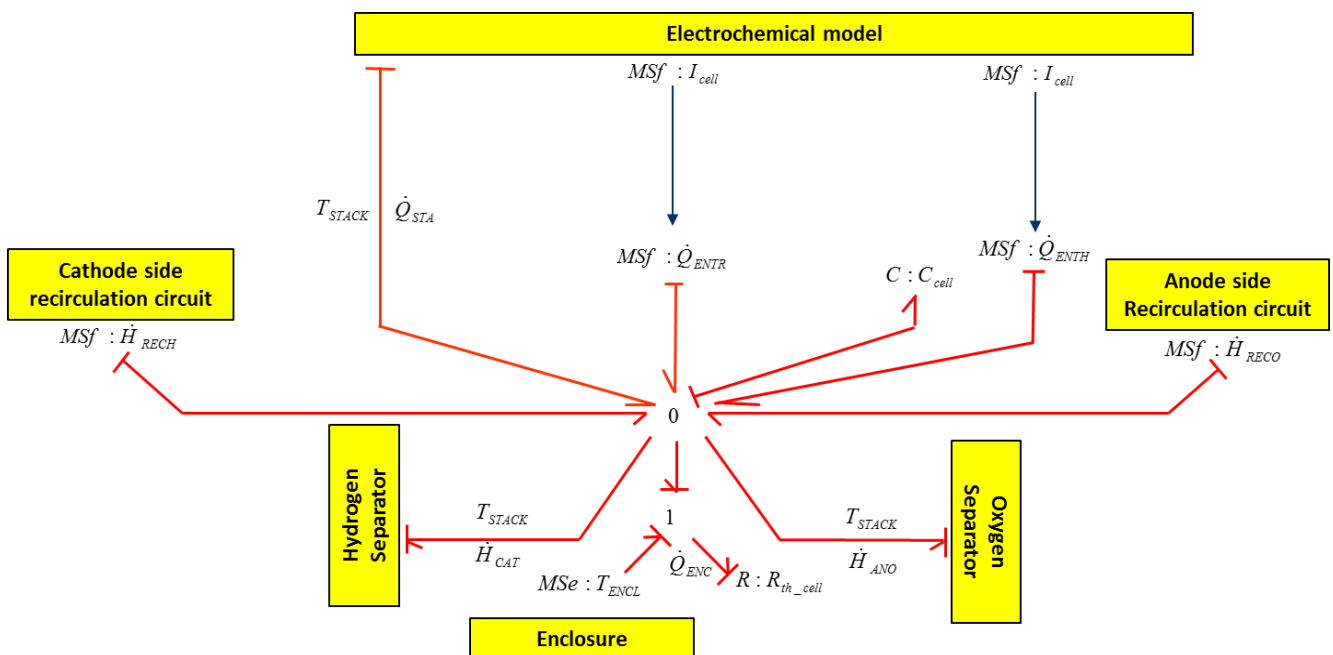


Figure 28 : Modèle thermique d'une cellule d'électrolyse PEM en Bond Graph [45]

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Les équations constitutives de la jonction « 0 » et l'élément C, associé à la causalité intégrale de ce dernier permet l'écriture de l'équation (40)

$$T_{STACK} = \frac{1}{C_p} \int (\dot{H}_{RECH} + \dot{H}_{RECO} - \dot{H}_{CAT} - \dot{H}_{ANO} + \dot{Q}_{STA} + \dot{Q}_{ENTH} + \dot{Q}_{ENTR} - \dot{Q}_{ENC}) dt \quad (40)$$

Les flux d'enthalpies liés aux entrées et sortie de matière à la fois côté anode et côté cathode ( $\dot{H}_{RECH}, \dot{H}_{RECO}, \dot{H}_{CAT}$  and  $\dot{H}_{ANO}$ ) dépendent des différents flux molaires  $\dot{n}_i$  et de l'enthalpie molaire  $H_i$  des différentes espèces impliquées (équation (41)).

$$\begin{aligned} \dot{H}_{RECH} + \dot{H}_{RECO} - \dot{H}_{CAT} - \dot{H}_{ANO} = & \dot{n}_{H_2O}^{RECH} \cdot H_{H_2O}^{RECH} + \dot{n}_{H_2O}^{RECO} \cdot H_{H_2O}^{RECO} \\ & - \dot{n}_{H_2O}^{CAT} \cdot H_{H_2O}^{CAT} - \dot{n}_{H_2}^{CAT} \cdot H_{H_2}^{CAT} - \dot{n}_{O_2}^{CAT} \cdot H_{O_2}^{CAT} - \dot{n}_{H_2O}^{ANO} \cdot H_{H_2O}^{ANO} \\ & - \dot{n}_{H_2}^{ANO} \cdot H_{H_2}^{ANO} - \dot{n}_{O_2}^{ANO} \cdot H_{O_2}^{ANO} \end{aligned} \quad (41)$$

Pour chaque espèce  $i$ , l'enthalpie molaire dépend de la température et de la capacité thermique de l'espèce en question (équation (42))

$$H_i = H_i^0 + Cp_i \cdot T_i \quad (42)$$

En considérant que les températures de sortie du stack, à la fois côté anode et côté cathode, sont toutes deux égales à la température du stack, l'écriture des bilans de matières en stationnaire permet de faire apparaître l'enthalpie standard de réaction (équations (43) et (44)).

$$\begin{aligned} \dot{H}_{RECH} + \dot{H}_{RECO} - \dot{H}_{CAT} - \dot{H}_{ANO} = & \dot{n}_{H_2O}^{RECH} \cdot Cp_{H_2O} \cdot (T_{RECH} - T_{STACK}) + \dot{n}_{H_2O}^{RECO} \cdot Cp_{H_2O} \cdot (T_{RECO} - T_{STACK}) \\ & - \frac{I}{2F} \cdot (H_{H_2} + 0.5H_{O_2} - H_{H_2O}) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_{RECH} + \dot{H}_{RECO} - \dot{H}_{CAT} - \dot{H}_{ANO} = & \dot{n}_{H_2O}^{RECH} \cdot Cp_{H_2O} \cdot (T_{RECH} - T_{STACK}) + \dot{n}_{H_2O}^{RECO} \cdot Cp_{H_2O} \cdot (T_{RECO} - T_{STACK}) \\ & - \frac{I}{2F} \cdot \Delta rH \end{aligned} \quad (44)$$

Le terme de production de chaleur lié aux phénomènes irréversibles se produisant au sein du stack  $\dot{Q}_{STA}$  est déduit des éléments  $R_s$  du modèle BG électrochimique (équations (45), (46) et (47)).

$$\dot{Q}_{STA} = \dot{Q}_{ohm} + \dot{Q}_{act,ano} + \dot{Q}_{act,cat} \quad (45)$$

$$\dot{Q}_{STA} = E_{ohm} \cdot I_{cell} + E_{act,ano} \cdot I_{cell} + E_{act,cat} \cdot I_{cell} \quad (46)$$

$$\dot{Q}_{STA} = (E_{cell} + E_{rev}) \cdot I_{cell} \quad (47)$$

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

Deux éléments sources de flux modulées représentant des sources de flux de chaleur sont intégrées afin de représenter : (i) l'énergie thermique transportée par les différentes espèces consommées et produites durant la réaction et (ii) la nature endothermique de la réaction. Le terme  $Q'_{ENTH}$  permet de prendre en compte l'énergie transportée par l'eau consommée par la réaction d'une part, et l'hydrogène et l'oxygène produit d'autre part. Il est obtenu en écrivant les différents flux d'enthalpies des espèces impliquées dans la réaction. Il est représenté en Bond Graph par une source de flux modulée par le courant électrique de la cellule (équations (48), (49) et (50)).

$$Q'_{ENTH} = n'_{H_2} \cdot \Delta H_{H_2} + n'_{O_2} \cdot \Delta H_{O_2} - n'_{H_2O} \cdot \Delta H_{H_2O} \quad (48)$$

$$Q'_{ENTH} = \frac{I_{cell}}{2 \cdot F} (\Delta H_{H_2} + 0.5 \Delta H_{O_2} - \Delta H_{H_2O}) \quad (49)$$

$$Q'_{ENTH} = \frac{I_{cell}}{2 \cdot F} \cdot \Delta rH \quad (50)$$

L'énergie thermique échangée au sein du stack durant la réaction électrochimique, c'est-à-dire la chaleur entropique réversible, est représentée par une source de flux  $Q'_{ENTR}$ . Cette source est modulée par le courant électrique de la cellule. Ce terme permet de prendre en compte le caractère endothermique de la réaction d'électrolyse de l'eau (équations (51), (52) et (53)).

$$Q'_{ENTH} = n'_{H_2O} \cdot \Delta S_{H_2O} - n'_{H_2} \cdot \Delta S_{H_2} - n'_{O_2} \cdot \Delta S_{O_2} + n'_{H_2O} \cdot \Delta S_{H_2O} \quad (51)$$

$$Q'_{ENTH} = \frac{I_{cell}}{2 \cdot F} (\Delta S_{H_2O} - \Delta S_{H_2} - 0.5 \Delta S_{O_2}) \quad (52)$$

$$Q'_{ENTH} = -\frac{I_{cell}}{2 \cdot F} \cdot \Delta rS \quad (53)$$

L'équation constitutive de l'élément R au sein du modèle thermique permet de calculer les pertes thermiques  $Q'_{ATM}$  du stack vers l'enceinte du système d'électrolyse (équation (54)).

$$Q'_{ATM} = \frac{T_{STACK} - T_{ENCL}}{R_{th-cell}} \quad (54)$$

Avec  $T_{ENCL}$  la température de l'enceinte et  $R_{th-cell}$  la résistance thermique du stack vers l'enceinte. En recombinaison les équations (40), (44), (47), (50), (53) et (54) le bilan thermique suivant est obtenu (équations (55), (56) et (57)).

$$T_{STACK} = \frac{1}{C_p} \int \left( n'_{H_2O}^{RECH} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_{RECH} - T_{STACK}) + n'_{H_2O}^{RECO} \cdot C_{p_{H_2O}} \cdot (T_{RECO} - T_{STACK}) - \frac{I}{2 \cdot F} \cdot \Delta rH + (E_{cell} - E_{rev}) \cdot I + \frac{I}{2 \cdot F} \cdot \Delta rH - \frac{I}{2 \cdot F} \cdot T_{STACK} \cdot \Delta rS - \frac{T_{STACK} - T_{ENCL}}{R_{th-cell}} \right) \cdot dt \quad (55)$$

$$T_{\text{STACK}} = \frac{1}{C_p} \int \left( n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECH}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECH}} - T_{\text{STACK}}) + n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECO}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECO}} - T_{\text{STACK}}) + I \cdot \left( E_{\text{cell}} - \frac{\Delta rG + T \cdot \Delta rS}{2.F} \right) - \frac{T_{\text{STACK}} - T_{\text{ENCL}}}{R_{\text{th-cell}}} \right) \cdot dt \quad (56)$$

$$T_{\text{STACK}} = \frac{1}{C_p} \int \left( n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECH}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECH}} - T_{\text{STACK}}) + n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECO}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECO}} - T_{\text{STACK}}) + I \cdot \left( E_{\text{cell}} - \frac{\Delta rH}{2.F} \right) - \frac{T_{\text{STACK}} - T_{\text{ENCL}}}{R_{\text{th-cell}}} \right) \cdot dt \quad (57)$$

Au sein de l'équation (58), la tension thermoneutre  $E_m$  apparaît.

$$E_m = \frac{\Delta rH}{2.F} \quad (58)$$

Finalement, l'équation (59) est obtenue. Cette équation, tirée du modèle Bond Graph présenté au sein de la Figure 28 possède la même forme que les bilans thermiques relevés dans la littérature.

$$T_{\text{STACK}} = \frac{1}{C_p} \int \left( n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECH}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECH}} - T_{\text{STACK}}) + n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{RECO}} \cdot C_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{\text{RECO}} - T_{\text{STACK}}) + I \cdot (E_{\text{cell}} - E_{tn}) - \frac{T_{\text{STACK}} - T_{\text{ENCL}}}{R_{\text{th-cell}}} \right) \cdot dt \quad (59)$$

## h) Modèle fluide et de transfert de matière

Les phénomènes fluidiques et de transfert de matière au cœur de la cellule jouent un rôle déterminant sur l'efficacité et le comportement global du système, et ne peuvent donc être négligés. Pour cette raison, un modèle spécifique a été élaboré afin de représenter ces phénomènes et a ensuite été couplé aux modèles électrochimique et thermique précédemment développés. Dans ce cadre, plusieurs hypothèses ont été formulées.

Le cœur de cellule est représenté par trois sous-systèmes : le compartiment anode, le compartiment cathode et la membrane. Aucune accumulation fluide n'est prise en compte dans ces sous-systèmes, ce qui implique que les gaz produits sont considérés comme étant évacués de manière continue, instantanée et homogène depuis les sites actifs des électrodes vers les canaux de distribution, puis de ces derniers vers les sorties du stack. Ainsi, les phénomènes de transfert de matière intégrés dans le modèle concernent uniquement ceux traversant la membrane PEM : (i) le transport d'eau par électro-osmose de l'anode vers la cathode et par diffusion de la cathode vers l'anode ; (ii) la perméation croisée des gaz, à savoir le passage de l'hydrogène de la cathode vers l'anode et celui de l'oxygène de l'anode vers la cathode. Le modèle fluide Bond Graph du stack, élaboré sur la base de ces hypothèses, est présenté à la Figure 29 [45] [47].

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

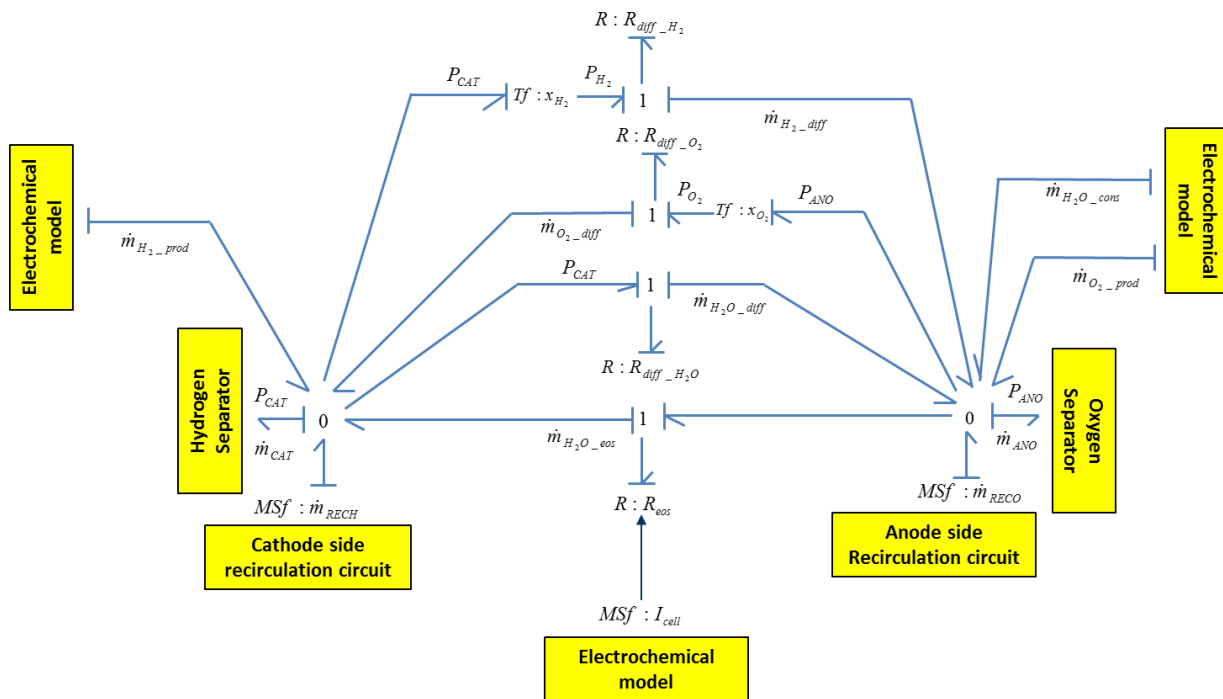


Figure 29 : Modèle fluidique de la cellule d'électrolyse en Bond Graph

L'équation constitutive des jonctions 0 permet d'en déduire les équations (60) et (61).

$$\dot{m}_{cat} = \dot{m}_{RECH} + \dot{m}_{H_2\_PROD} + \dot{m}_{O_2\_diff} + \dot{m}_{H_2O\_cons} - \dot{m}_{H_2\_diff} - \dot{m}_{H_2O\_diff} \quad (60)$$

$$\dot{m}_{ANO} = \dot{m}_{RECO} + \dot{m}_{O_2\_PROD} + \dot{m}_{H_2\_diff} + \dot{m}_{H_2O\_diff} - \dot{m}_{O_2\_diff} - \dot{m}_{H_2O\_cons} \quad (61)$$

Avec  $\dot{m}_{i\_diff}$  le flux de diffusion de l'espèce  $i$  à travers la membrane échangeuse de proton,  $\dot{m}_{i\_prod}$  le flux de production d'hydrogène et d'oxygène,  $\dot{m}_{H_2O\_cons}$  le débit d'eau consommé par la réaction et  $\dot{m}_{H_2O\_eos}$  le flux d'électroosmose. Comme démontré précédemment, les termes de production et de consommation sont directement issus du modèle Bond Graph électrochimique du stack, conformément à la loi de Faraday (équation (62))

$$\dot{m}_i = v_i \frac{I_{cell}}{2.F} M_i \quad (62)$$

Avec  $I_{cell}$  l'intensité du courant du stack et  $M_i$  la masse molaire de l'espèce  $i$ .

Les termes de diffusion  $\dot{m}_{i\_diff}$  associés à chaque espèce  $i$  sont déduits des éléments résistifs du modèle Bond Graph. Ils sont proportionnels à la différence de pression partielle  $\Delta P_i$  entre les deux faces de la membrane PEM (équation (63)).

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

$$m'_{i\_diff} = \frac{\Delta P_i}{R'_{i\_diff}} \quad (63)$$

Comme indiqué au précédent, les flux de perméation résultent de la solubilité et de la diffusivité non nulles des gaz dans l'eau et dans la membrane PEM. Ainsi, le coefficient  $R'_{i\_diff}$  introduit dans l'équation (63) dépend à la fois des constantes de Henry  $H$  propres à chaque espèce  $i$ , des coefficients de diffusion  $D_i$ , ainsi que de l'épaisseur de la membrane PEM  $L$  (équation (64)).

$$R'_{i\_diff} = \frac{H_i}{D_i} \cdot L \quad (64)$$

De nombreuses corrélations empiriques sont disponibles dans la littérature pour l'estimation des constantes de Henry et des coefficients de diffusion. Dans le cadre du présent modèle, les valeurs retenues sont celles proposées par le modèle développé par Chandesris *et al.* [120], et récapitulées dans le Tableau 7.

	Oxygène	Hydrogène
Diffusivité ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$4,2 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-18380/RT}$	$4,1 \cdot 10^{-7} \cdot e^{-2602/T}$
Constante de Henry ( $\text{mol}^{-1} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m}^3$ )	$\frac{1}{1,62 \cdot 10^{-6} \exp(603/T)}$	$\lambda \cdot M_{H_2O} \cdot 1,09 \cdot 10^{-5} \exp(77/T)$

Tableau 7 : Paramètres de perméation des gaz utilisés au sein du modèle

En pratique, une fraction de l'hydrogène et de l'oxygène traversant la membrane est respectivement réoxydée et réduite. La proportion effective de gaz de perméation atteignant la sortie du stack dépend à la fois de la conception de l'assemblage membrane-électrode — en particulier de l'intégration éventuelle de catalyseurs favorisant ces réactions secondaires — et des conditions opératoires. Toutefois, en l'absence d'informations précises permettant d'évaluer quantitativement ces phénomènes, le modèle considère que l'ensemble des flux de perméation parvient intégralement en sortie du stack.

Par ailleurs, le flux d'électroosmose résulte de l'entraînement des molécules d'eau par les protons migrant de l'anode vers la cathode à travers la membrane. Contrairement aux phénomènes diffusifs, ce flux est indépendant de l'épaisseur de la membrane et constitue le mécanisme dominant de transfert d'eau. Il dépend directement de l'intensité du courant ainsi que du nombre de molécules d'eau entraînées par proton, défini par le coefficient d'électroosmose  $n_{eos}$  (équation (65)). Les valeurs rapportées dans la littérature varient de 0,27 à 5. Dans le présent modèle, ce coefficient est fixé de manière arbitraire à 2, faute de pouvoir en déterminer expérimentalement la valeur.

$$m'_{H_2O\_eos} = v_i \frac{I}{2 \cdot F} M_{H_2O} \quad (65)$$

i) Modèle Bond Graph complet du stack d'électrolyse

Le modèle Bond Graph (BG) complet du stack est présenté à la Figure 30. Afin de préserver la lisibilité, les phénomènes de transfert de matière à travers la membrane PEM, bien qu'intégrés au modèle, n'y sont pas explicitement représentés. Une fois le modèle BG du stack établi, la même méthodologie de modélisation est appliquée à chacun des composants décrits dans le Bond Graph a Mots, à savoir : le convertisseur, les séparateurs, les circuits de recirculation, le circuit de refroidissement, les unités de purification des gaz, ainsi que les vannes et autres organes périphériques.

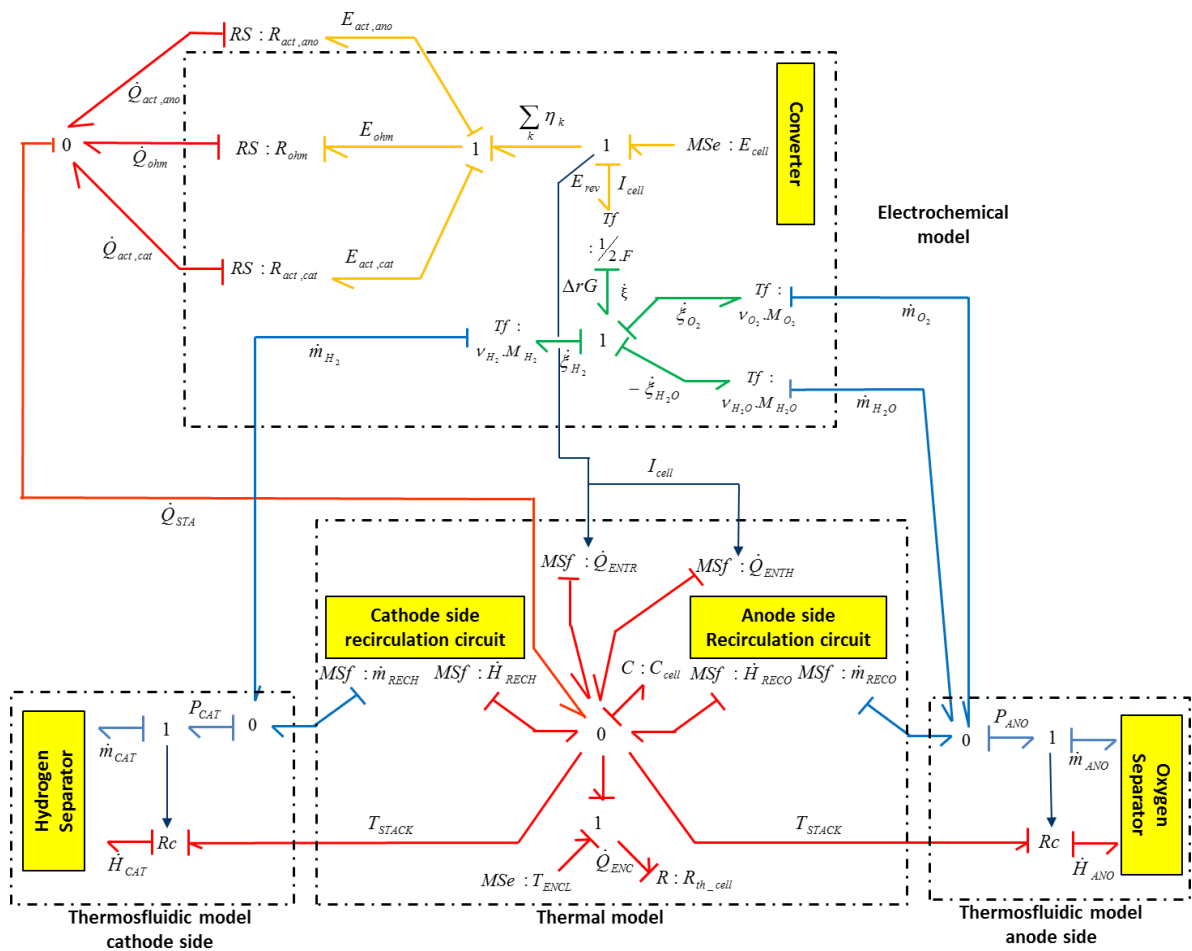


Figure 30 : Modèle Bond Graph simplifié de la cellule d'électrolyse PEM

### 5. système éolienne :

L'énergie éolienne représente l'une des sources d'énergie renouvelable à la croissance la plus rapide dans le monde. Sa production est propre et non polluante, sans sous-produits nocifs pour l'environnement. Toutefois, l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques conventionnels nécessite une modélisation dynamique spécifique, car la conversion de l'énergie du vent diffère fondamentalement des générateurs traditionnels. Les difficultés rencontrées dans la modélisation des éoliennes proviennent souvent du manque de données et de structures normalisées pour les systèmes de contrôle. Ainsi, de nombreuses études adoptent des modèles simplifiés, en négligeant certaines parties du contrôle. Dans ce travail, une approche analytique a été adoptée pour modéliser une éolienne à axe horizontal, en intégrant ses aspects aérodynamiques et mécaniques, à l'aide de la méthode Bond Graph[49].

#### a) Présentation du modèle de l'éolienne

L'énergie du vent induit des forces de portance et de traînée sur les pales, générant ainsi un couple qui met en rotation l'ensemble du rotor. Ce mouvement entraîne l'arbre basse vitesse situé à l'intérieur du moyeu. L'arbre basse vitesse est relié à une boîte de vitesses qui augmente la vitesse de rotation transmise à l'arbre haute vitesse connecté au générateur. Ce dernier convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Ainsi, le couple produit par les pales est transmis à la boîte de vitesses via l'arbre principal, puis au générateur.

Le modèle de l'éolienne étudié se compose de cinq inerties : les deux pales, le moyeu, la boîte de vitesses et le générateur (Fig. 31) [50].

Pour représenter la dynamique structurelle des pales, la modélisation repose sur les principes de la théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli et sur un modèle de moment pour les éléments de pales. Les déplacements généralisés aux extrémités des éléments sont décrits par une matrice de raideur modélisée comme un champ  $C$  à quatre ports, tenant compte des quatre déplacements généralisés. Un modèle Bond Graph de l'élément poutre est associé aux inerties des éléments au centre de gravité (CoG), et connecté à des jonctions de type "1" qui représentent les déplacements et rotations au niveau du CoG (Fig. 32).

Le modèle global proposé est construit en couplant le modèle aérodynamique avec le modèle structurel (Fig. 33), considérant la pale comme une poutre en porte-à-faux. La méthode d'Euler-Bernoulli est appliquée en supposant des sections uniformes et de petites déformations. Toutefois, comme les pales subissent de grandes déformations, elles sont subdivisées en trois éléments, et les déformations de chaque section sont additionnées pour obtenir la déformation totale de la pale. Ainsi, l'élément poutre établit la relation entre les forces généralisées de Newton et les déplacements correspondants.

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

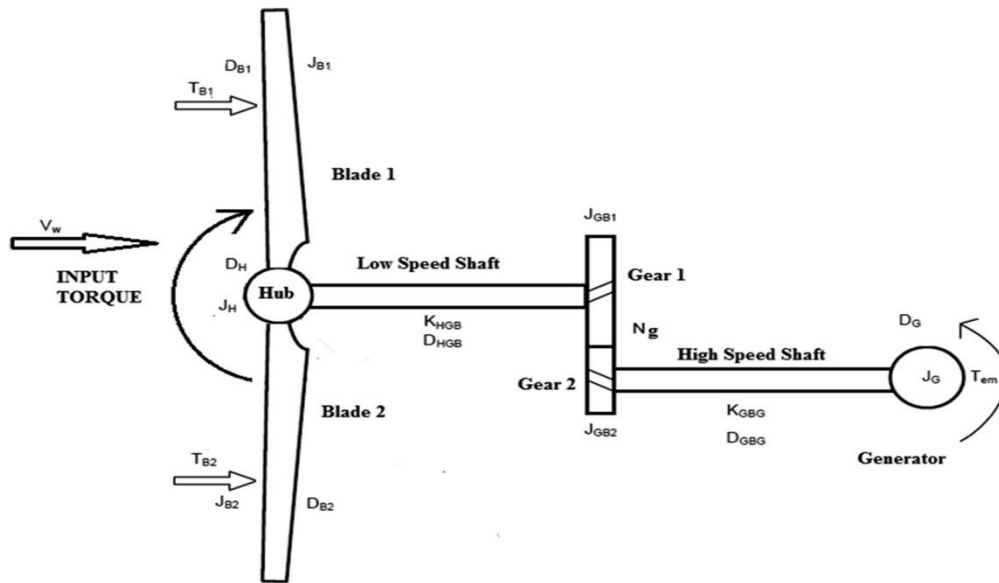


Figure 31 : schéma fonctionnel d'une éolienne

Le modèle global proposé est construit en couplant le modèle aérodynamique avec le modèle structurel (Fig. 33), considérant la pale comme une poutre en porte-à-faux. La méthode d'Euler-Bernoulli est appliquée en supposant des sections uniformes et de petites déformations. Toutefois, comme les pales subissent de grandes déformations, elles sont subdivisées en trois éléments, et les déformations de chaque section sont additionnées pour obtenir la déformation totale de la pale. Ainsi, l'élément poutre établit la relation entre les forces généralisées de Newton et les déplacements correspondants[49] [51].

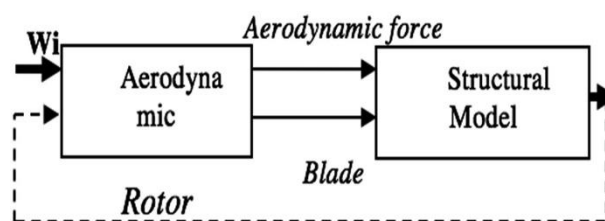


Figure 32 : Modélisation structurelle et fonctionnelle de la pale

En complément de cette représentation structurelle et fonctionnelle, il est également pertinent de proposer un schéma électrique équivalent simplifié de la turbine éolienne. Celui-ci permet de traduire, sous forme électrique. La Figure 33 illustre ce schéma électrique équivalent de la turbine éolienne.

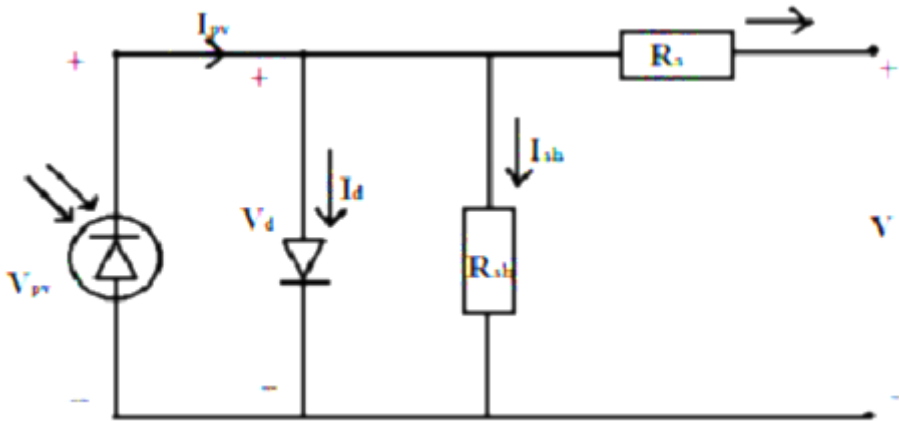


Figure 33 : Schéma électrique équivalent simplifié de la turbine éolienne[49]

### b) Approche Bond Graph pour la modélisation d'une éolienne

Dans le modèle présenté à la Figure 34,  $R_i$  représente le facteur multiplicatif appliqué à la matrice d'amortissement structurel entre les centres de gravité (CoG) des éléments adjacents,  $[K_i]$  désigne la matrice de raideur de la poutre en porte-à-faux, et  $III$  est le coefficient d'amortissement structurel. Ce modèle peut être exprimé mathématiquement comme suit[49] :

$$R_i = \mu[K_i] \quad (66)$$

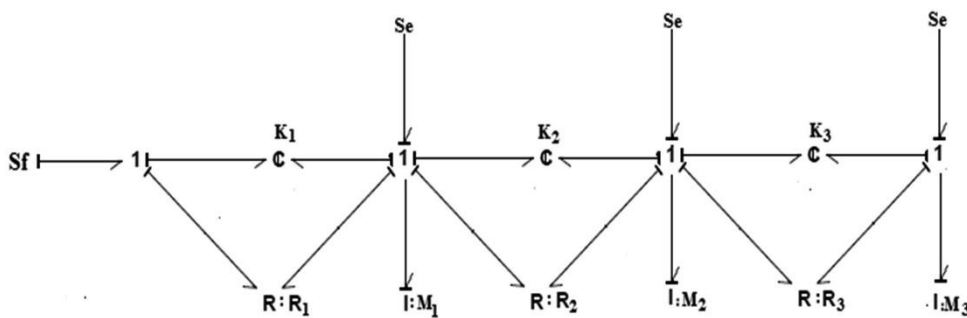


Figure 34 : Modélisation structurelle d'une pale flexible à trois sections

L'aérodynamique d'une éolienne est de nature hautement complexe et non linéaire. L'écoulement réel du fluide autour d'une éolienne est régi par les principes fondamentaux, notamment les équations de Navier-Stokes, dont la complexité rend leur utilisation directe en modélisation impraticable. La géométrie des pales ainsi que les caractéristiques de l'écoulement

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

peuvent être reliées à un couple différentiel du rotor  $dQ_i$  et à une poussée différentielle du rotor  $dT_i$ , exprimés comme suit :

$$dT_i = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_{li} \cos \phi_i + C_{di} \sin \phi_i) c_i l_i \quad (67)$$

$$dQ_i = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_{li} \sin \phi_i - C_{di} \cos \phi_i) c_i l_i \quad (68)$$

En supposant qu'il n'existe aucune interaction entre les différents éléments de pale, les forces exercées sur chaque élément en raison de l'écoulement sont déterminées uniquement par les caractéristiques bidimensionnelles (2D) de portance et de traînée liées à la forme de l'aile de l'élément et à son orientation par rapport à l'écoulement entrant. Les forces locales agissant sur la pale sont la portance  $L$ , la traînée  $D$  et la force normale  $R$ . La relation entre ces forces, incluant les forces tangentielles  $T$ , est de nature purement vectorielle et dépend de l'angle d'attaque  $\alpha_i$  et de l'angle  $\phi_i$  à la section « iii » de la pale. La vitesse relative de l'écoulement entrant  $V_{rel}$  pour l'élément de pale iii, par rapport à la vitesse du vent  $V_w$ , est obtenue à partir de :

$$V_{rel} = \frac{V_w (1 - \alpha_i)}{\sin \phi_i} \quad (69)$$

Le rapport de vitesse de pointe (Tip Speed Ratio, TSR) constitue l'un des paramètres clés permettant de caractériser la performance d'une éolienne. Il s'exprime comme suit :

$$\lambda_i = \frac{\omega_r r_i}{V_w} \quad (70)$$

où :

- $\omega_r$  est la vitesse angulaire du rotor (rad/s),
- $r_i$  est le rayon du rotor (m),
- $V_w$  est la vitesse du vent (m/s).

Pour chaque section de pale, la force aérodynamique est déterminée en appliquant la théorie BEM (*Blade Element Momentum*). Ainsi, la force aérodynamique  $F_i$  agissant sur l'élément « iii » ( $i=1,2,\dots,N$ ) s'exprime comme suit :

$$F_i = \frac{dQ_i}{r} = \frac{1}{2} \rho V_w^2 \frac{(1 - a_i)^2}{\sin^2 \phi_i} (C_{li} \sin \phi_i - C_{di} \cos \phi_i) c_i l_i V_w \quad (71)$$

$$F_i = \frac{dQ_i}{r} = \underbrace{\left( \frac{1}{2} \rho V_w^2 \frac{(1 - a_i)^2}{\sin^2 \phi_i} (C_{li} \sin \phi_i - C_{di} \cos \phi_i) c_i l_i \right)}_{GY_i} V_w \quad (72)$$

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

où  $GY_i$  représente le module de l'élément gyrateur associé à la « iii » section,  $V_w$  est la vitesse du vent,  $\rho$  est la densité de l'air,  $\phi_i$  est l'angle d'entrée du vent, et  $C_{li}$ ,  $C_{di}$  sont les coefficients adimensionnels de portance et de traînée, respectivement.

Comme l'illustre le modèle Bond Graph de la Figure 35, un élément gyrateur modulé (MGY) est employé dans les équations (70), (71) et (72). Cela traduit la transformation de l'énergie du vent (source MSf) en une source aérodynamique (source Se).  
Mouvement de la tour : Le schéma de la turbine est présenté à la Figure 36, indiquant la force de poussée agissant sur la structure. Le mouvement de la tour est supposé n'avoir aucune influence sur le système mécanique global, affectant uniquement son entrée. L'équation dynamique régissant le mouvement de la tour peut être formulée comme indiqué dans l'équation (73).

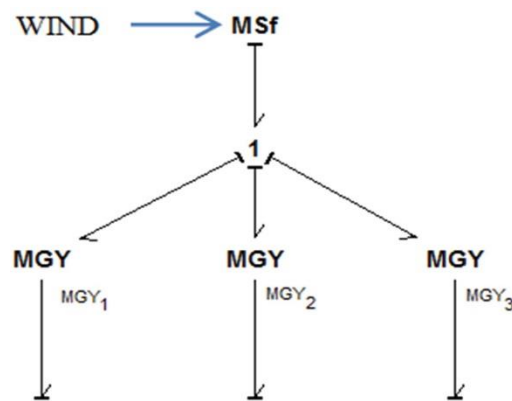


Figure 35 : Représentation Bond Graph du modèle aérodynamique

Le schéma de la turbine présenté à la Figure 36 illustre la force de poussée agissant sur la structure. Le mouvement de la tour est supposé n'influencer que l'entrée du système mécanique, sans affecter son fonctionnement interne. L'équation dynamique décrivant le mouvement de la tour peut ainsi être formulée comme indiqué dans l'équation (73).

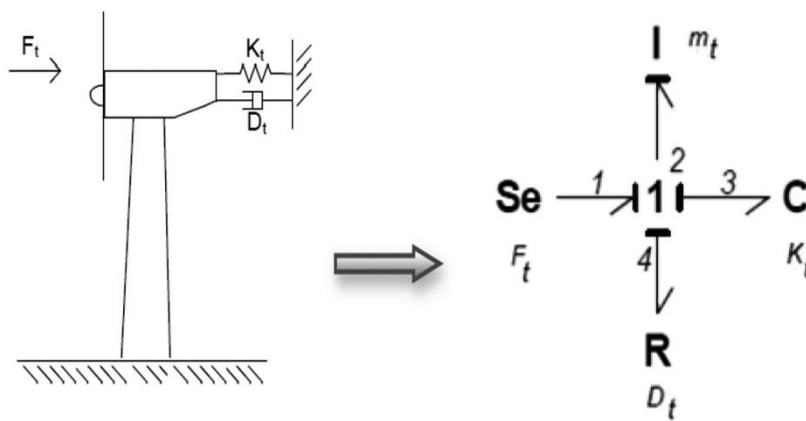


Figure 36 : Représentation Bond Graph du modèle aérodynamique

$$m_t \ddot{Z} = F_t - D_t \dot{Z} - K_t Z \quad (73)$$

## Chapitre N°02 : Architecture fonctionnelle et modélisation multiphysique du système étudié

où  $m_t$  représente la masse de la tour,  $K_t$  la raideur de la tour,  $F_t$  la force du vent agissant sur la tour et  $D_t$  l'amortissement de la tour.

### Transmission mécanique (Drive Train) :

Les modèles de transmission mécanique varient de modèles à une à six masses. Par souci de simplicité, un modèle à deux masses (*2-mass model*) est considéré suffisant, et l'établissement des équations régissant ce modèle reste relativement accessible. Le modèle présenté (Figure 37) comprend six jonctions de type 1 et trois jonctions de type 0. La vitesse de rotation est décrite par une jonction de type 1 reliée à l'inertie du rotor. L'inertie du rotor et celle du générateur possèdent des vitesses angulaires différentes en raison de la dynamique propre au système[52].

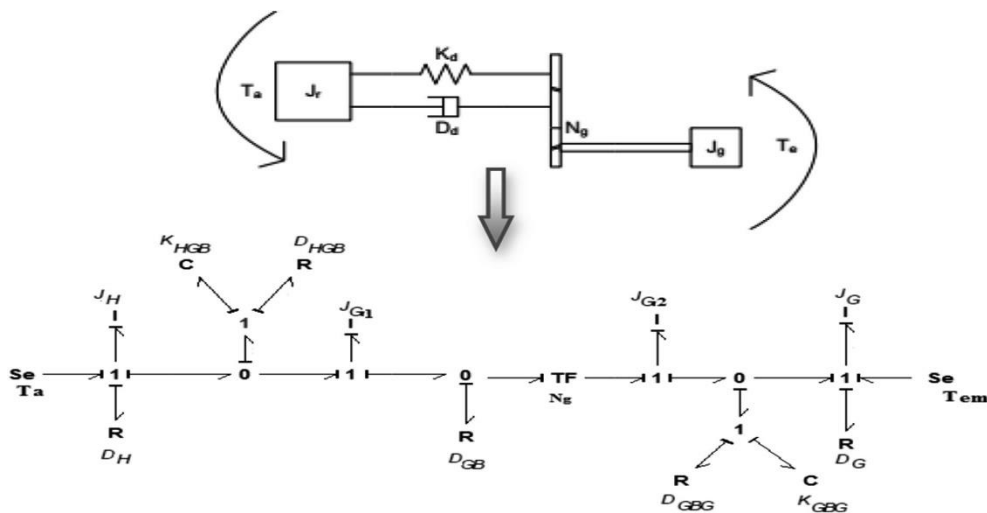


Figure 37 : Illustration conceptuelle d'une éolienne et modélisation Bond Graph associée

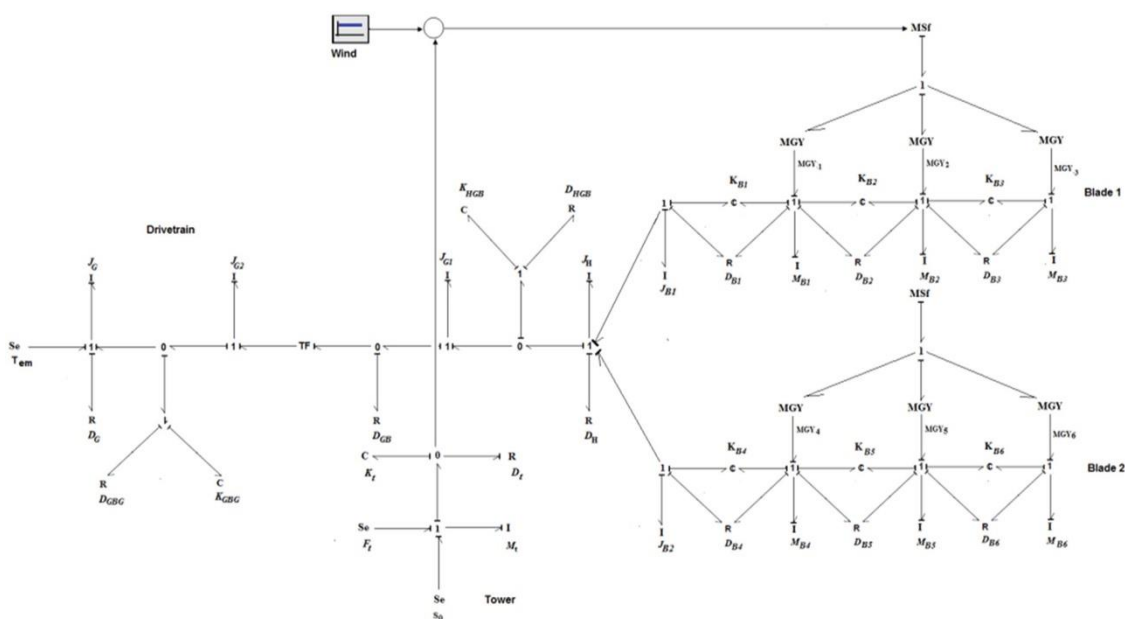


Figure 38 : Schéma global d'assemblage des Bond Graphs représentant une éolienne[49]

C'est pour cette raison que la jonction de type 0 transfère le même couple. La jonction de type 1, connectée aux éléments résistifs et élastiques (*compliance elements*), traduit la différence de vitesse de rotation entre les deux inerties. Elle indique également que ces éléments élastiques et résistifs partagent la même vitesse de rotation, tout en étant soumis à des couples différents. Enfin, la vitesse de rotation du générateur est représentée par la dernière jonction de type 1, reliée à l'inertie du générateur.

#### IV. Regroupement dans une architecture globale simulable

L'intégration des différents composants modélisés ( panneaux photovoltaïques, éolienne, électrolyseur, convertisseurs, réservoirs et piles à combustible ) nécessite une approche systémique cohérente permettant de représenter l'ensemble du fonctionnement du système énergétique. Cette étape finale de modélisation repose sur l'assemblage des modèles partiels en une architecture globale simulable, facilitant l'analyse et la validation de la performance globale du système.

##### 1. Modélisation conceptuelle globale : le Bond Graph à mots

La première étape consiste à concevoir un Bond Graph à mots qui représente la structure fonctionnelle du système complet. Ce diagramme permet de visualiser de manière synthétique l'architecture énergétique globale, tout en identifiant les flux d'énergie, les points d'interaction et les interfaces entre les différents sous-systèmes. La Figure 39 illustre cet assemblage conceptuel, où chaque composant est modélisé individuellement puis intégré au système global. Les flux énergétiques (mécaniques, électriques, thermiques et chimiques) sont codifiés par des symboles distincts, facilitant l'analyse multi-physique.

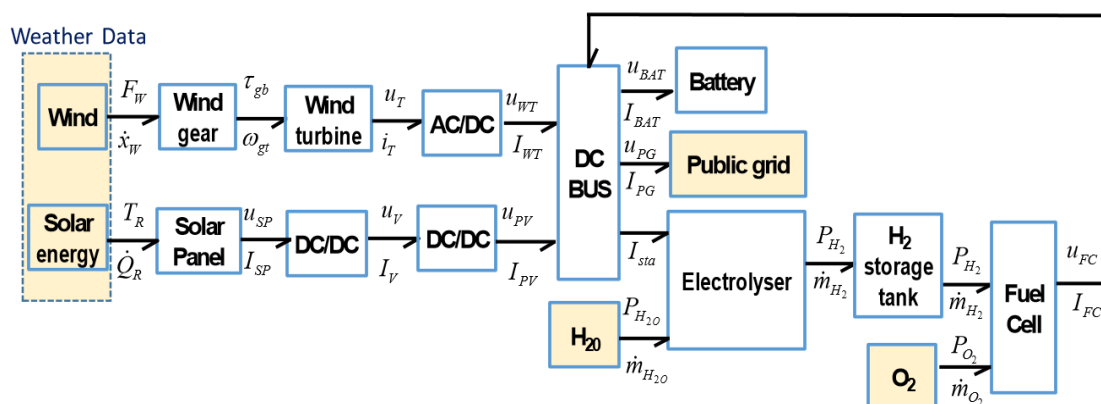


Figure 39 : Assemblage conceptuel des modèles composants vers le système global

## 2. Modélisation dynamique globale : le Bond Graph complet

Une fois l'architecture conceptuelle établie, elle est traduite en un Bond Graph complet représentant l'intégralité du système énergétique. Cette représentation intègre tous les détails dynamiques des sous-systèmes, permettant la simulation globale. Elle prend en compte :

- Les interactions mécaniques et électriques entre la turbine éolienne et le générateur.
- Les échanges électriques et énergétiques entre les panneaux photovoltaïques, la batterie, et le réseau public.
- Les processus électrochimiques de l'électrolyseur et de la pile à combustible.
- Les transferts de matière (hydrogène et oxygène) et les phénomènes thermiques associés.

La Figure 40 illustre ce modèle Bond Graph complet, offrant une vision intégrée et dynamique du système.

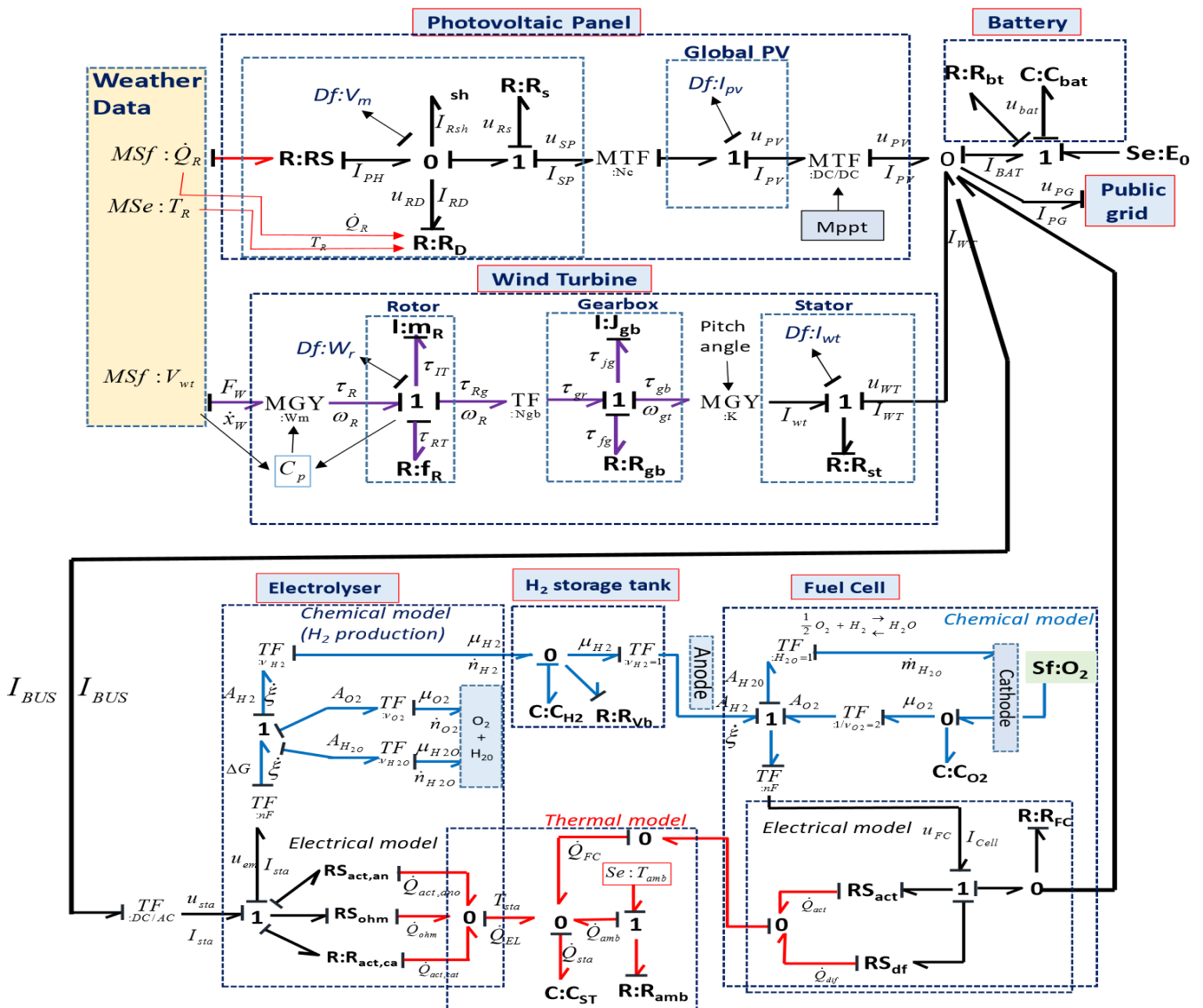


Figure 40 : Modèle Bond Graph global du système

La construction d'un modèle Bond Graph global constitue une étape cruciale pour la simulation et l'optimisation du système énergétique complet. Elle permet non seulement d'analyser le comportement dynamique du système dans son ensemble, mais aussi de préparer une implémentation efficace pour des études de contrôle, de performance et de robustesse.

### V. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons défini l'**architecture fonctionnelle** du système multiphysique de production et de valorisation de l'hydrogène vert, en identifiant les différents sous-systèmes et leurs interactions. Nous avons ensuite développé une **modélisation Bond Graph** de chaque composant clé, ce qui a permis de représenter de manière unifiée les phénomènes électriques, électrochimiques et mécaniques. Des **schémas électriques équivalents** ont également été proposés, offrant une vision simplifiée mais exploitable pour la simulation et l'implémentation pratique.

L'ensemble de ces modèles a finalement été regroupé dans une architecture globale cohérente, ouvrant la voie à une simulation réaliste du comportement dynamique du système. Cette étape constitue le socle théorique indispensable à la mise en œuvre de la plateforme HIL, qui fera l'objet du chapitre suivant, consacré à la traduction des modèles mathématiques en équations programmables et à leur intégration dans l'environnement de prototypage en temps réel.

# Chapitre

## N°03

### Chapitre 3 : Étude comportementale d'un électrolyseur PEM via son modèle électrique équivalent simulé sous MATLAB/Simulink

#### I. Introduction :

Dans ce chapitre, le schéma électrique équivalent développé est implémenté sous MATLAB/Simulink afin de reproduire le comportement réel d'un électrolyseur PEM. Ce modèle, conçu pour imiter fidèlement les phénomènes électrochimiques et dynamiques de l'électrolyseur, est utilisé comme un **émulateur virtuel** permettant de réaliser des tests et des analyses en l'absence de prototype matériel. L'approche adoptée ouvre ainsi la voie à une simulation qui se rapproche d'un environnement expérimental, avec la possibilité de varier les paramètres d'entrée (tension, courant, débit) et d'observer les réponses dynamiques du système.

#### II. Environnement de simulation (MATLAB/Simulink)

MATLAB est un environnement de calcul numérique et scientifique développé par MathWorks, utilisé dans de nombreux domaines pour l'analyse, la modélisation et la simulation [53]. Il est particulièrement apprécié dans la recherche et l'ingénierie pour sa capacité à traiter des équations complexes, à réaliser des calculs matriciels et à exploiter de vastes bibliothèques spécialisées [54].

Simulink, extension graphique intégrée à MATLAB, constitue une plateforme de modélisation orientée blocs permettant de représenter des systèmes dynamiques de manière visuelle [55]. Grâce à son approche par schémas bloc-diagrammes, il devient possible de décrire, simuler et analyser des systèmes multiphysiques complexes de manière modulaire.

Dans le cadre de cette étude, Simulink est utilisé pour :

- Développer un **modèle équivalent** de l'électrolyseur PEM, prenant en compte les phénomènes électriques, électrochimiques et thermiques.
- Intégrer des **sources de simulation** (tension, courant, débit d'eau, température) afin d'évaluer la réponse du système sous différentes conditions d'entrée.
- Analyser les **variables de sortie** telles que la tension aux bornes de l'électrolyseur, le courant absorbé, la production d'hydrogène et les pertes énergétiques.
- Tester et valider le comportement du modèle avant toute éventuelle expérimentation réelle.

Cette approche par simulation permet d'obtenir un environnement de test **fiable, flexible et sans risque matériel**, tout en offrant une meilleure compréhension des interactions multiphysiques qui régissent le fonctionnement de l'électrolyseur PEM [58].

### III. Modèle électrique équivalent de l'électrolyseur PEM ( simulable )

Le modèle électrique équivalent a été conçu pour représenter fidèlement le comportement dynamique d'une cellule d'électrolyseur PEM. Il intègre :

- **Le modèle thermique** : pour simuler l'évolution de la température de la cellule selon les phénomènes électrochimiques et électriques.
- **Le modèle électrochimique** : pour représenter la réaction de l'électrolyse de l'eau et calculer la tension de la cellule selon la loi de Nernst et les pertes ohmiques.
- **Le modèle chimique** : pour estimer le débit molaire d'hydrogène produit à partir des équations de Faraday.

Ces trois modèles sont intégrés en un système global dans Simulink. Chaque sous-système communique avec les autres afin de refléter l'interdépendance des phénomènes physiques.

Le circuit électrique équivalent représenté dans la Figure 41 .

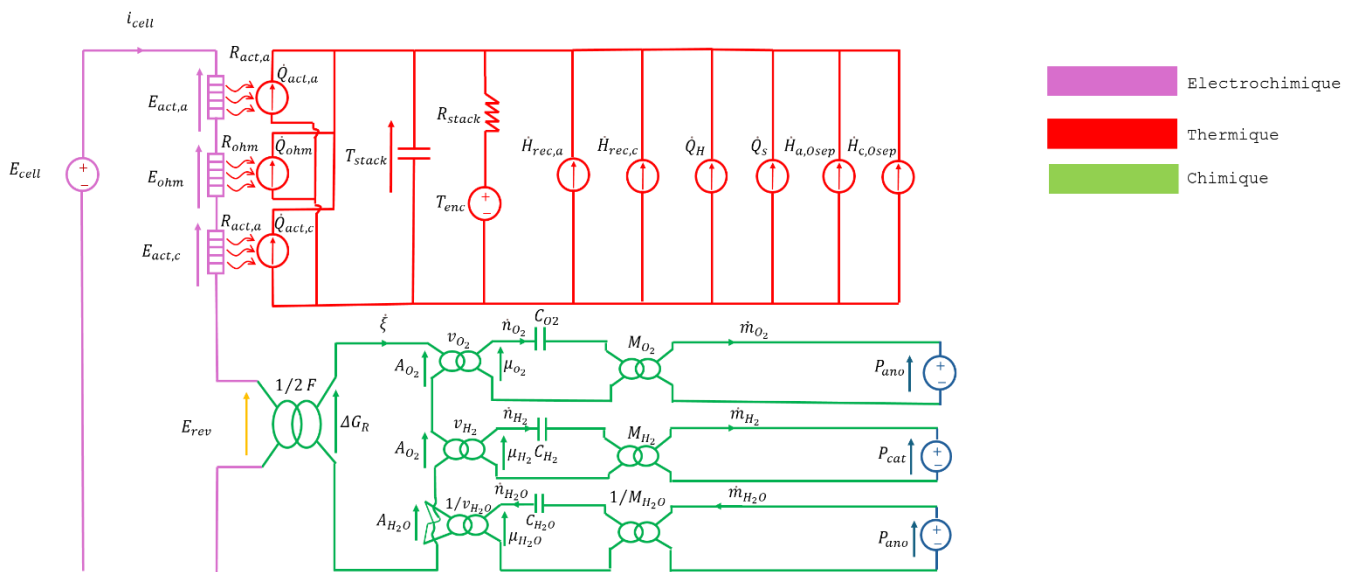


Figure 41 : Schéma du modèle électrique équivalent de l'électrolyseur PEM

## IV. Implémentation sous MATLAB/Simulink

L'implémentation de ce modèle dans MATLAB/Simulink repose sur :

- La création d'un **sous-système global** intégrant les trois sous-modèles : thermique, électrochimique et chimique.
- Le couplage entre ces sous-systèmes via des liaisons de données, pour refléter les interactions physiques.
- Le développement d'une interface utilisateur permettant :
  - Le lancement de la simulation via un bouton.
  - L'affichage en temps réel des courbes : tension, courant, température et débit molaire.

### Structure du système sous Simulink

- Bloc principal : **Système global** (Figure 42)
- Sous-blocs :
  - Modèle thermique (Figure 43)
  - Modèle électrochimique (Figure 44)
  - Modèle chimique (Figure 45)
- Interface graphique : Bouton "Lancer Simulation" et affichage des résultats. (Figure 46)

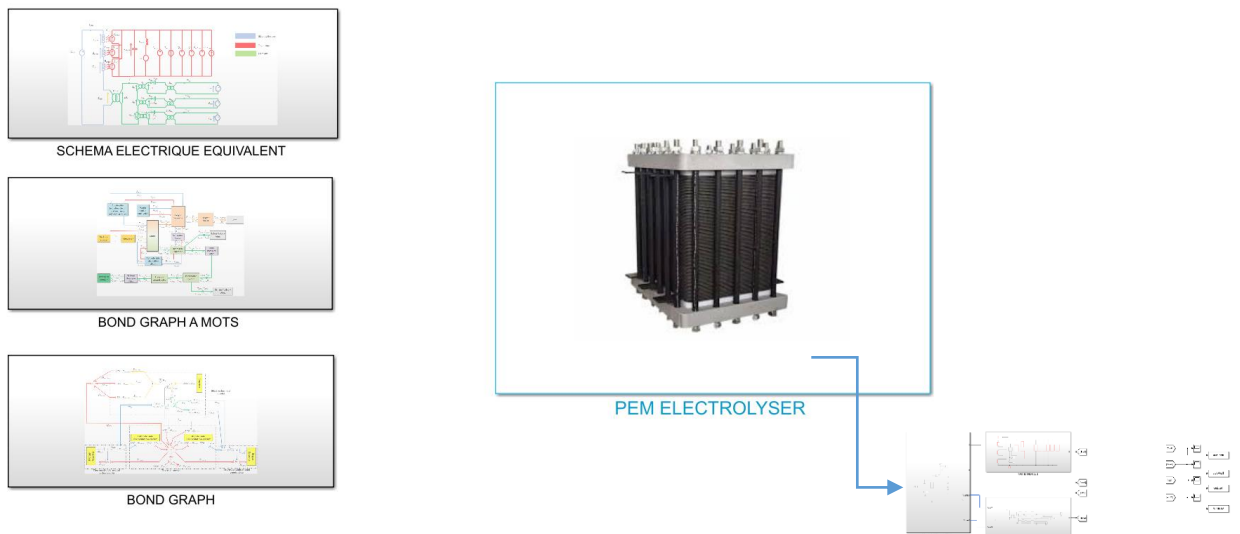


Figure 42 : Architecture générale du système global sous MATLAB/Simulink.

## Chapitre N°03 : Étude comportementale d'un électrolyseur PEM via son modèle électrique équivalent simulé sous MATLAB/Simulink

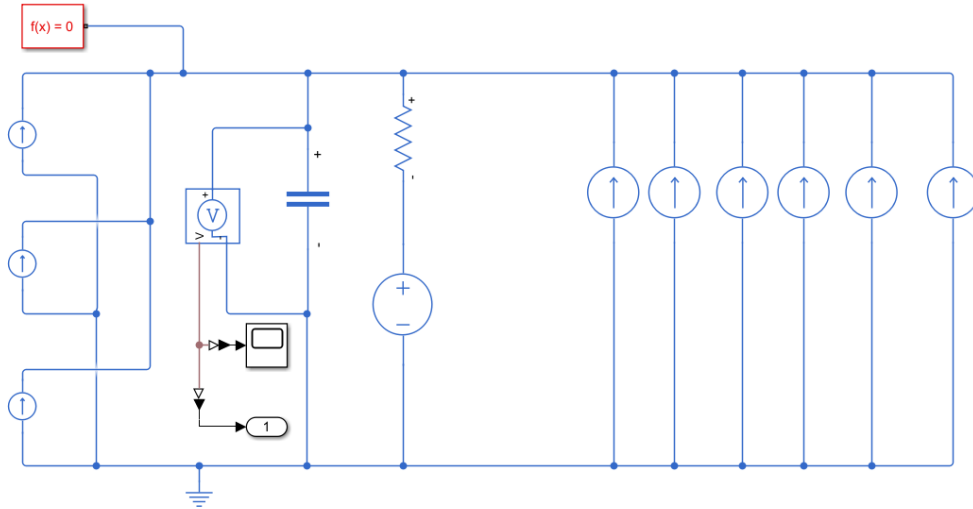


Figure 43 : Schéma du sous-système thermique de l'électrolyseur PEM.

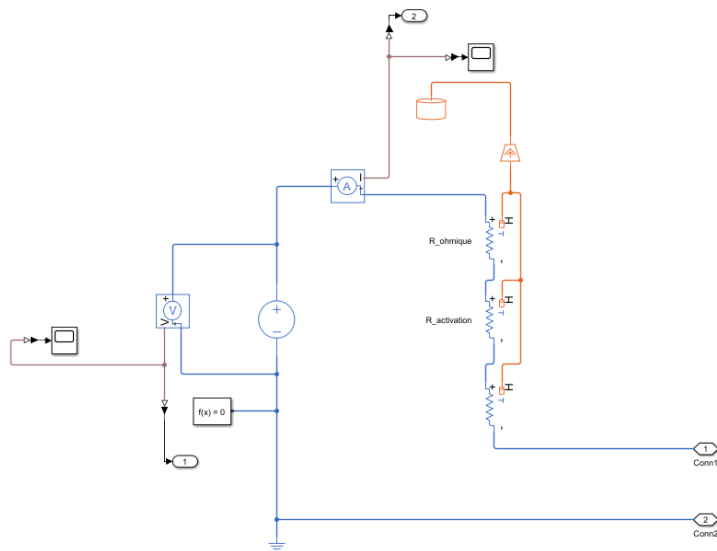


Figure 44 : Schéma du sous-système électrochimique de l'électrolyseur PEM.

## Chapitre N°03 : Étude comportementale d'un électrolyseur PEM via son modèle électrique équivalent simulé sous MATLAB/Simulink

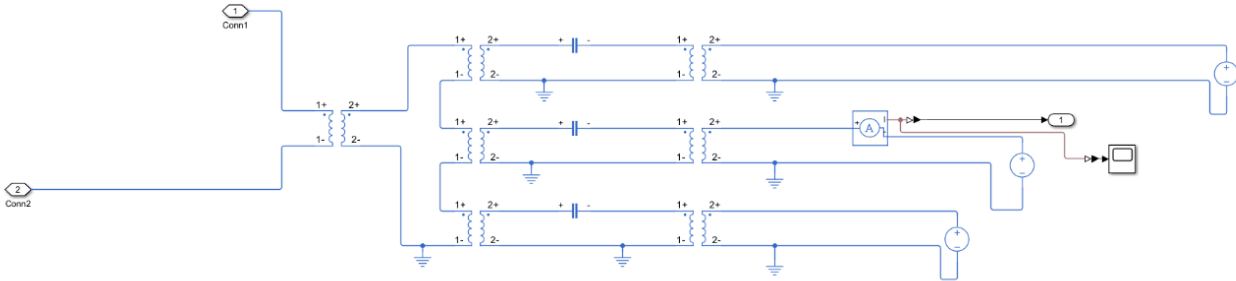


Figure 45 : Schéma du sous-système chimique de l'électrolyseur PEM.

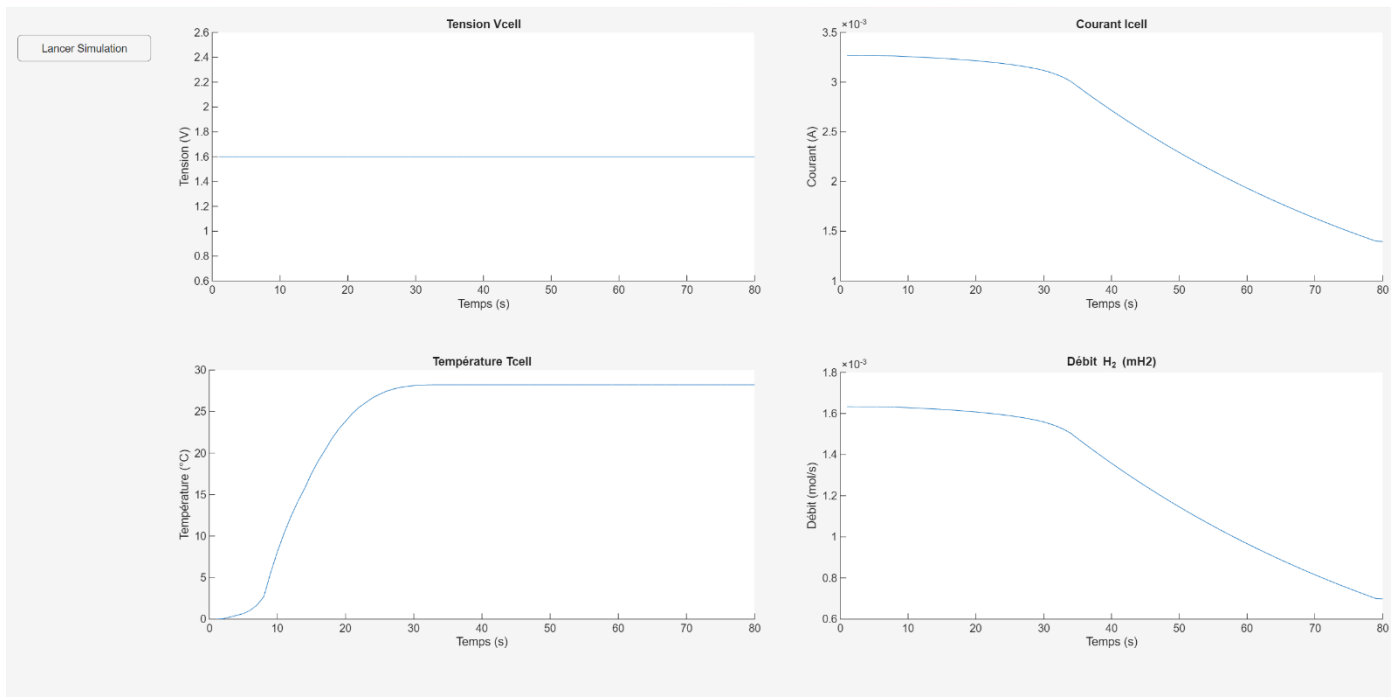


Figure 46 : Interface utilisateur MATLAB pour le lancement de la simulation et affichage des résultats.

### V. Analyse des résultats

Les simulations ont été réalisées pour différents scénarios d'opération. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

#### 1. Tension de cellule

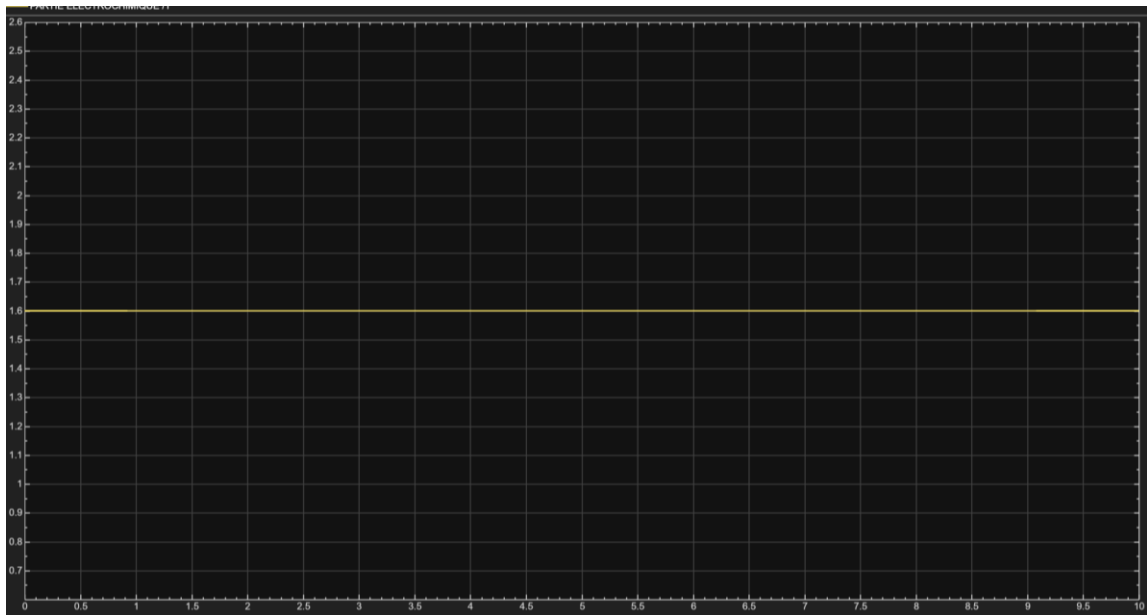


Figure 47 : Évolution de la tension de la cellule d'électrolyseur PEM.

#### 2. Courant de cellule

Le courant suit fidèlement le profil de charge appliqué et confirme la réactivité du modèle.

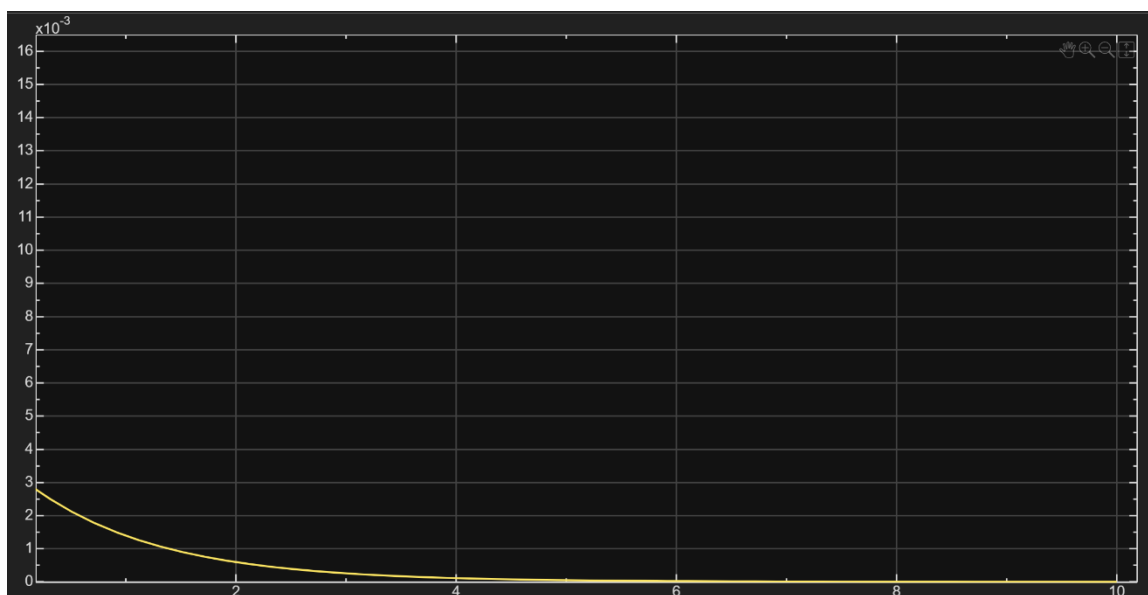


Figure 48 : Évolution du courant de la cellule d'électrolyseur PEM.

## 3. Température de cellule

La température augmente légèrement lors des phases de forte activité, confirmant l'impact thermique des réactions électrochimiques.

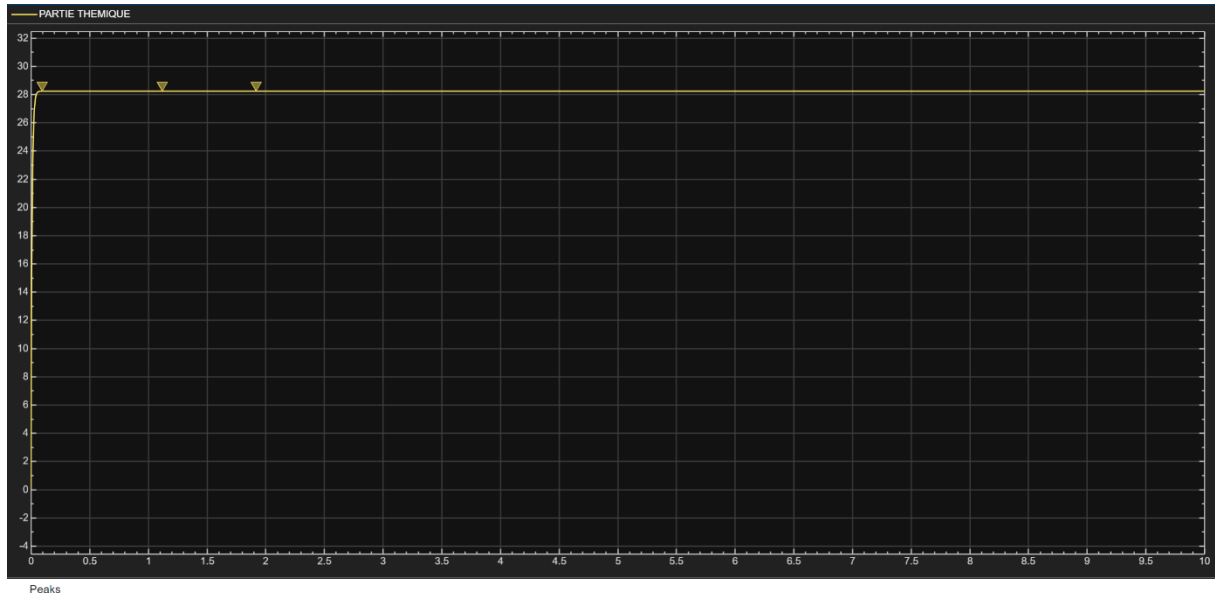


Figure 49 : Évolution de la température de la cellule d'électrolyseur PEM..

## 4. Débit molaire d'hydrogène

Le débit molaire augmente proportionnellement au courant, conformément aux équations de Faraday.

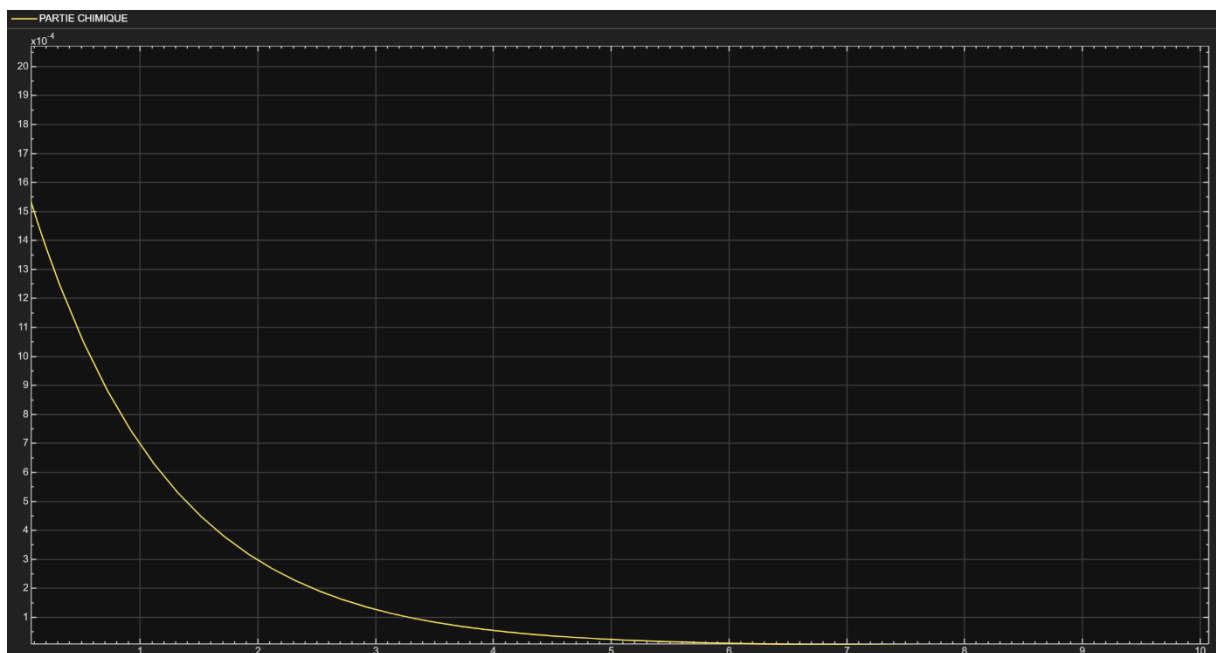


Figure 50 : Schéma du sous-système chimique de l'électrolyseur PEM.

### Figure 47 : Évolution de la tension de cellule

La simulation montre que la tension reste presque constante autour de 1,6 V (voir Figure 47). Cela correspond au comportement attendu d'une cellule PEM en régime stationnaire. En pratique, la tension d'une cellule d'électrolyse varie légèrement avec le courant appliqué, mais pour des conditions stables, elle reste proche de la valeur nominale déterminée par la loi de Nernst et les pertes ohmiques. Les valeurs typiques pour une cellule PEM sont entre 1,5 V et 2,0 V selon les conditions opératoires.

**Conclusion** : La simulation est cohérente avec les données expérimentales disponibles dans la littérature.

### Figure 48 : Évolution du courant de cellule

Le courant simulé présente une variation faible et reste constant sur la période simulée. Cela traduit un fonctionnement stable du système. Dans la réalité, le courant dépend directement de la charge appliquée et de la disponibilité d'eau. Les cellules PEM réelles présentent parfois de légères fluctuations dues à des irrégularités de l'alimentation ou à des effets transitoires.

**Conclusion** : Le modèle reproduit correctement un comportement stable en régime continu.

### Figure 49 : Évolution de la température de cellule

La température simulée se maintient autour de  $\sim 28^{\circ}\text{C}$ , ce qui correspond à un régime stable sans forte sollicitation.

En réalité, les cellules PEM présentent une légère montée en température lors de l'augmentation du courant, pouvant atteindre  $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$  en fonctionnement normal selon la conception du système et le système de refroidissement utilisé. L'absence de fortes variations dans la simulation peut être due à des conditions idéalisées ou à l'absence de modélisation de certaines pertes thermiques.

**Conclusion** : Le modèle thermique est cohérent, mais pourrait être amélioré pour inclure les effets transitoires et les pertes réelles.

### Figure 50 : Évolution du débit molaire d'hydrogène

Le débit molaire simulé diminue légèrement avec le temps, indiquant une stabilisation du système.

Selon les équations de Faraday, le débit molaire d'hydrogène est directement proportionnel au courant appliqué. Les fluctuations mineures peuvent être attribuées à des phénomènes de dynamique chimique. Dans la réalité, le débit reste constant sous régime permanent, mais peut être affecté par la qualité de l'eau et la température.

**Conclusion** : La tendance générale observée dans la simulation est cohérente avec les données expérimentales, mais une validation expérimentale reste nécessaire.

## VI. Conclusion :

La simulation réalisée a permis de valider la capacité du schéma électrique équivalent à reproduire le comportement d'un électrolyseur PEM. En absence d'un dispositif matériel, ce modèle joue le rôle d'**émulateur logiciel**, autorisant la réalisation de tests virtuels proches d'un fonctionnement réel. Les résultats obtenus confirment la pertinence de cette approche, qui constitue une base solide pour le développement futur d'un émulateur Hardware-in-the-Loop intégrant à la fois simulation numérique et expérimentation physique.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## Conclusion générale

La transition énergétique impose aujourd'hui le développement de solutions innovantes pour garantir durabilité et flexibilité. Dans ce contexte, l'hydrogène vert apparaît comme un vecteur énergétique majeur, bien que son intégration physique reste complexe et coûteuse.

Ce mémoire a proposé la conception d'un émulateur Hardware-in-the-Loop (HIL) pour simuler, en temps réel, un système complet de production d'hydrogène vert. Basé sur la méthode des Bond Graphs et implémenté sous MATLAB/Simulink, cet émulateur constitue une alternative fiable et modulaire aux plateformes expérimentales, permettant l'analyse et la validation des stratégies de commande.

Ce travail ouvre également des perspectives vers l'intégration de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle ou les micro-réseaux intelligents, renforçant ainsi le rôle des émulateurs HIL dans l'accélération de la transition énergétique.

### Bibliographie :

- [1] NREL, 1995. The Green Hydrogen Report. NREL, Denver.
- [2] State of California, 2006. Senate Bill No. 1505. Chapter 877., in: State of California (Ed.). Legislative Counsel Digest.
- [3] European Parliament., Written declaration on establishing a green hydrogen economy and a third industrial revolution in Europe through a partnership with committed regions and cities, SMEs and civil society organisations EU, 14 May 2007.
- [4] Bouziane, K. (2011). Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par Electrolyse de l'eau. Mémoire de Magister en Génie des procédés. Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [5] R.Boudries, R.dizène, A. Khellaf and M. Belhamel, «HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER », Editor: Aiden M.Harris, © 2010 Nova Science Publishers, Inc.
- [6] IEA, *Global Hydrogen Review*, 2022.
- [7] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D., “A comprehensive review on PEM water electrolysis,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013.
- [8] Ursúa, A., Gandía, L. M., Sanchis, P., “Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends,” *Proceedings of the IEEE*, 2012.
- [9] Millet, P., Grigoriev, S., Poremsky, V., et al., “PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development,” *IJHE*, 2019.
- [10] Diéguez, P. M., Ursúa, A., et al., “PEM water electrolyzers: modeling and experimental validation,” *Renewable Energy*, 2014.
- [11] Laguna-Bercero, M. A., “Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review,” *Journal of Power Sources*, 2012.
- [12] Baurens, P., “Les électrolyseurs à oxyde solide : opportunité pour l'industrie,” *Hydrogène France*, 2020.
- [13] IRENA, *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective*, 2019.
- [14] Züttel, A., “Materials for hydrogen storage,” *Materials Today*, 2003.
- [15] Durbin, D. J., Malardier-Jugroot, C., “Review of hydrogen storage techniques for on-board vehicle applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013
- [16] Reuters, *Electrolyzer Projects Outlook*, 2024
- [17] Enerdata, *Algeria Hydrogen Plan*, 2024
- [18] ISA-GHIC, *Green Hydrogen Investment Coalition – Algeria*
- [19] Echorouk Online, *L'Algérie : leader potentiel de l'hydrogène vert*, 2024
- [20] Brahami Imen, (2018). Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires. Thèse de doctorat. Université Djillali liabes de Sidi- Bel-Abbès.
- [21] Bouima Haithem, (2019). Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de Cu (In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> destinées au Photovoltaïque. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas – Setif 1.
- [22] Khenfer Riad, (2015). Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. Thèse de doctorat. Université

Ferhat Abbes Sétif 1

- [23] Naim Hocine, (2016). Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique. Thèse de doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [24] SADOK Mohammed, (2011). Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien. Thèse de doctorat. Université Aboubakr BELKAÏD – TLEMCEN.
- [25] Slama Fateh, (2011). Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Magister En Electrotechnique. Université Ferhat Abbas - Setif-
- [26] IRENA, *Renewable Energy Technologies: Wind Energy*, International Renewable Energy Agency, 2023. Disponible sur : <https://www.irena.org>
- [27] Marchetti, J., Théorie des machines électriques, Dunod, 1990.
- [28] Toumi, M., Conversion de l'énergie éolienne en électricité, ENSI, 1999.
- [29] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934.
- [30] Millet, P., Grigoriev, S. A., & Fateev, V. N. (2011). Electrochemical cells for hydrogen production by water electrolysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(6), 513–530.
- [31] Barbir, F. (2005). *PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources*. *Solar Energy*, 78(5), 661–669.
- [32] Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326.
- [33] Siracusano, S., et al. (2018). The Electrochemical Performance of a PEM Water Electrolyser Based on Iridium Nanocatalysts at Different Operating Temperatures. *Energies*, 11(4), 936.
- [34] Graves, C., Ebbesen, S. D., Jensen, S. H., Simonsen, S. B., & Mogensen, M. (2011). Eliminating degradation in solid oxide electrochemical cells by reversible operation. *Nature Materials*, 14(2), 239–244.
- [35] R. Isermann, "Hardware-in-the-loop simulation for automotive systems," *Control Engineering Practice*, vol. 12, no. 5, pp. 547–560, 2004.
- [36] M. Cellier, F. Bousquet, *System Dynamics Modelling and Bond Graphs*, CRC Press, 2012.
- [37] OMG, *Systems Modeling Language (SysML) Specification*, Object Management Group, 2017.
- [38] Friedenthal, S., Moore, A., Steiner, R., *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*, Morgan Kaufmann, 2014.
- [39] Estefan, J. A., *Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*, INCOSE, 2008.
- [40] N. Villa-Villaseñor, R. Galindo-Orozco, *Bond graph modelling of a 4-parameter photovoltaic array*, Etude et simulation d'un émulateur photovoltaïque.
- [41] H. Patel, V. Agarwal, *MATLAB-based modeling to study the effects of partial shading on PV array characteristics*, IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [42] S. Silvestre, F. Chouder, M. Haddadi, *A comprehensive model for photovoltaic array simulation*,

## BIBLIOGRAPHIE

- Renewable Energy.
- [43] C. Deline, T. Meydbray, S. P. Lukic, *Photovoltaic System Modeling Using Bond Graphs for Real-Time Emulation*, IEEE Journal of Photovoltaics.
  - [44] M. Villalva, J. Gazoli, E. Ruppert, *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*, IEEE Transactions on Power Electronics.
  - [45] B. Ould Bouamama, *Modélisation et analyse du comportement dynamique d'un système d'électrolyse PEM soumis à des sollicitations intermittentes : Approche Bond Graph*, Revue Internationale de Modélisation et Simulation.
  - [46] I. Abdallah, A.-L. Gehin, B. Ould Bouamama, *Hybrid Bond Graph modelling of multi-source system for green hydrogen production*, International Journal of Hydrogen Energy.
  - [47] B. Ould Bouamama, A.-L. Gehin, I. Abdallah, *Bond Graphs as Mechatronic Approach for Supervision Design of Multisource Renewable Energy System*, Energy.
  - [48] P. Olivier, C. Bourasseau, B. Bouamama, *Dynamic and multiphysic PEM electrolysis system modelling: A bond graph approach*, International Journal of Hydrogen Energy.
  - [49] A. Mohammed, H. G. Lemu, *Wind Turbine System Modelling Using Bond Graph Method*, Energy Conversion and Management, Elsevier.
  - [50] R. Akbari, *Electrical Equivalent Circuit of Split-Shaft Wind Energy Conversion Systems*, IEEE Transactions on Energy Conversion.
  - [51] S. B. Zaid, M. A. Abido, *Dynamic modelling and control of wind energy conversion systems using bond graph approach*, Renewable Energy, vol. 145, pp. 1201–1214, 2020. doi:10.1016/j.renene.2019.06.101.
  - [52] J. Faiz, H. Henao, J. L. Dominguez-Navarro, *Bond graph modelling of wind turbine systems for performance prediction*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems.
  - [53] MathWorks, *MATLAB Documentation*, The MathWorks Inc., 2025.
  - [54] D. G. Luenberger, *Applied Linear Algebra and Matrix Analysis*, Springer, 2015.
  - [55] MathWorks, *Simulink: Simulation and Model-Based Design*, The MathWorks Inc., 2025.
  - [56] J. G. Ziegler, R. Singh, "Model-Based Design for Control Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 23, no. 3, pp. 20–31, 2019.

**Annexes :**

### Perspectives

À la lumière des résultats obtenus dans ce travail, plusieurs orientations futures peuvent être envisagées afin de renforcer et d'élargir la portée de l'étude :

- **Développement des modèles multiphysiques** : approfondir les modèles existants en intégrant davantage de phénomènes couplés, tels que les interactions thermodynamiques, hydrauliques et électrochimiques complexes, afin d'améliorer la précision des prédictions et de rapprocher les simulations des conditions industrielles réelles.
- **Intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique** : exploiter ces technologies pour optimiser la supervision intelligente, la prédiction des défaillances et l'amélioration des stratégies de contrôle, ce qui permettrait d'accroître la fiabilité et la performance globale du système.
- **Validation expérimentale via des plateformes Hardware-in-the-Loop (HIL)** : transposer les modèles théoriques vers des dispositifs matériels et des contrôleurs réels, afin de vérifier expérimentalement leur pertinence et de réduire l'écart entre simulation et mise en œuvre industrielle.
- **Couplage avec les réseaux intelligents et intégration de l'hydrogène** : explorer les stratégies permettant d'insérer efficacement les systèmes de production d'hydrogène vert dans les réseaux énergétiques intelligents, en particulier pour la gestion de l'équilibre offre-demande et le stockage énergétique de longue durée.
- **Analyse environnementale et économique** : mener une évaluation complète de l'impact environnemental et des coûts associés à la production d'hydrogène vert, afin de soutenir les choix stratégiques dans le cadre de la transition énergétique durable.