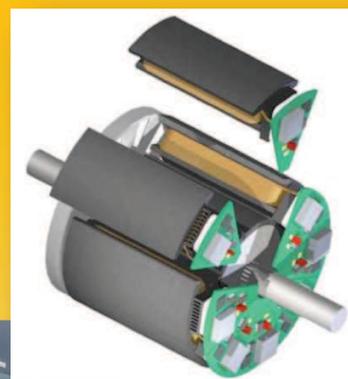
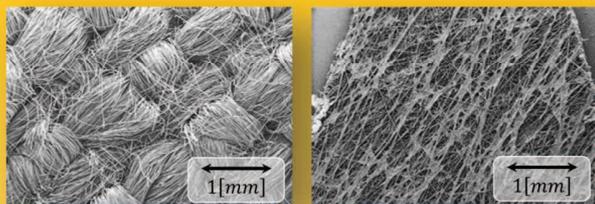


# La Revue SEE



Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



*VEHICULE  
ELECTRIFIE,  
AVENIR DE  
L'AUTOMOBILE ?  
(SUITE)*

## ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



*Société de l'Électricité, de l'Électronique  
et des Technologies de l'Information  
et de la Communication*

# Abonnez-vous à *La* Revue 3E.I

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

- Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique
- Trame indispensable à la formation continue des hommes et des femmes de terrain
- 4 N° par an : Janvier, Avril, Juillet, Octobre
- 3 dossiers complets par an sur des sujets d'actualité + 1 N° Pratique pédagogique



## BULLETIN D'ABONNEMENT 2020



### VERSION PAPIER

4 numéros : janvier, avril, juillet, octobre.  
Distribution postale

France & UE	Hors UE
40 € TTC	49,18 € HT



### VERSION NUMÉRIQUE

Accès aux publications numériques  
ouvert pendant un an à compter  
de la date de souscription

France & UE	Hors UE
30 € TTC	29,38 € HT



### VERSION DUO

Version imprimée  
+ version numérique

France & UE	Hors UE
50 € TTC	58,97 € HT

### VERSION PREMIUM

- > Adhésion SEE avec accès e3EI
- + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
125 € TTC	65 € TTC	15 € TTC
+ Abonnement 3E.I (Version papier)		
France & UE : 32 € TTC		Hors UE : 41,34 € HT

TVA de la revue 3E.I : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : [sg@see.asso.fr](mailto:sg@see.asso.fr)

### MES COORDONNÉES

Prénom :

Nom :

### ADRESSE DE LIVRAISON

Adresse :

Code postal :

Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail\* :

\* Obligatoire

### MON RÉGLEMENT

Je règle la somme de €  
par  Chèque à l'ordre de la SEE  
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité

N° cryptogramme

(3 derniers chiffres  
au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)  
Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

### ADRESSE DE FACTURE (Si différente)

Je joins le bon de commande administratif N° :  
et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement  
à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :

Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Pays :

N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE Hors de France

e-mail\* :

\* Obligatoire

Date

Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



**ABONNEMENT + RAPIDE** : <https://www.see.asso.fr/3ei>

La Revue 3E.I est une publication trimestrielle de la SEE.  
Les sommaires des derniers numéros sont disponibles sur le site  
[www.see.asso.fr/3ei](http://www.see.asso.fr/3ei)





**La Revue 3EI**  
publication trimestrielle  
de la SEE

# SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, 75116 PARIS  
Tél : 01 56 90 37 17  
site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886  
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

## 3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

<p><b>La Revue 3EI, Édition SEE,</b> 17 rue de l'Amiral Hamelin 75116 PARIS</p> <p><b>Directeur de la publication</b> François GERIN Président de la SEE</p> <p><b>Rédacteur en Chef</b> Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : <a href="mailto:revue3ei@gmail.com">revue3ei@gmail.com</a> ou sur le site <a href="https://www.see.asso.fr/3ei">https://www.see.asso.fr/3ei</a> rubrique "soumettre un article"</p> <p><b>Communication :</b> Mme. Mélisande DE LASSENCE <a href="mailto:Communication1@see.asso.fr">Communication1@see.asso.fr</a> 01 56 90 37 17</p> <p><b>Promotion et Abonnements :</b> (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2020. Tél : 01 56 90 37 17 <a href="mailto:abo@see.asso.fr">abo@see.asso.fr</a></p> <p><b>Tarifs 2020 :</b></p> <p>Version PAPIER :</p> <p>France et UE (TTC)..... 40 € Pays hors UE (HT)..... 49,18 €</p> <p>Version NUMERIQUE :</p> <p>France et UE (TTC)..... 30 € Pays hors UE (HT)..... 29,38 €</p> <p>Version DUO (Papier+Num.) :</p> <p>France et UE (TTC)..... 50 € Pays hors UE (HT) ..... 58,97 €</p> <p><b>Impression :</b> JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Avril 2020</p> <p>Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 100</p> <p><b>Numéro spécial : Le véhicule électrifié, avenir de l'automobile ? (suite)</b></p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Le numéro 100 de la REVUE 3EI Alain CUNIERE<sup>(1)</sup>, Samuel VIOLLIN<sup>(2)</sup> <sup>(1)</sup> Retraité de l'EN - Enseignant vacataire ESIEE Paris <sup>(2)</sup> Inspecteur général - Doyen du groupe STI</p> <p><b>Thème 1 : Véhicules électrifiés et réseau</b></p> <p>p. 6 Perspectives d'intégration pour la chaîne de conversion d'énergie des véhicules électrifiés Antoine CIZERON Laboratoire du Génie électrique de Paris, GeePs</p> <p>p. 15 Recharge sans contact des véhicules électriques Éric LABOURE Université Paris-Saclay, Centrale Supélec</p> <p>p. 31 Intégration de la mobilité dans le réseau de distribution Sylvie COURTY Enedis</p> <p><b>Thème 2 : Véhicules électrifiés et Piles à Combustible</b></p> <p>p. 36 Les véhicules routiers fondés sur la pile à combustible à hydrogène. Olivier BETHOUX Université Sorbonne - laboratoire GeePs</p> <p>p. 57 Perspectives pour la pile à combustible et l'infrastructure hydrogène dans le transport routier Olivier BETHOUX Université Sorbonne - laboratoire GeePs</p>
---	--

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées. Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425)

Numéro 100 de la revue 3EI

*Vous tenez dans les mains (ou lisez sur votre écran) le numéro 100 de la revue 3EI. Depuis le premier numéro (numéro 0) publié en mai 1994 traitant de la MLI, cela fait 26 ans qu'une large communauté d'enseignants, de chercheurs, d'industriels participe à la diffusion la plus large possible des connaissances dans le domaine du Génie Electrique et de ses applications. Comme vous le lirez dans l'éditorial spécial écrit par des membres fondateurs, si cette longévité étonne, elle est aussi le reflet d'une communauté dynamique. Le comité de rédaction souhaite que cette aventure se poursuive et qu'en tant qu'auteur et/ou lecteur vous y trouviez encore longtemps de l'intérêt et des sources d'inspiration.*

« N° 100 : Véhicule électrifié, avenir de l'automobile ? (suite) »

*Le véhicule électrifié est-il l'avenir de l'automobile ? La question ouverte dans le thème du numéro 99 de la revue 3EI est tellement riche de pistes pour l'avenir qu'il nous est apparu important de poursuivre la réflexion dans le numéro 100. Exceptionnellement, nous vous présentons un numéro 100 qui comporte deux thèmes connexes : le premier traite de l'impact de l'électrification des véhicules sur le réseau électrique et le second présente un état de l'art sur les Piles à Combustible, souvent présenté comme la solution d'avenir pour tendre vers des véhicules réellement « zéros émission ».*

« Thème 1 : Véhicules électrifiés et réseau électrique »

*L'article de MM. Cizeron, Ojeda et Bethoux s'intéresse à l'intégration de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. Les auteurs montrent comment la logique d'intégration de l'électronique de puissance au plus près des machines électriques, permet d'atteindre des objectifs très ambitieux mais suppose de revoir l'architecture globale de ces systèmes et de bien gérer la compatibilité des organes d'électronique de puissance avec la sensibilité des machines électriques dans le contexte automobile.*

*M. Labouré expose une solution souvent évoquée pour résoudre le problème d'autonomie des véhicules électriques : la recharge sans contact. Cet article donne les bases permettant de comprendre les difficultés associées à cette technologie et propose une démarche permettant de dimensionner un système de transfert d'énergie par induction.*

*Le dernier article de cette première partie écrit par Mme Courty, Directrice Etudes & Développement du programme Mobilité Electrique d'Enedis fait le point sur l'impact de l'arrivée du véhicule électrifié sur le réseau. Elle conclue que la mobilité électrique est réalisable et que son impact sur le réseau est modéré. En effet, le développement de l'infrastructure de recharge est intégré au réseau électrique à l'échelle locale et le pilotage de l'exploitation du réseau permet de maîtriser les pics locaux de consommation ou de production. D'un point de vue financier, le développement de la mobilité électrique a été intégré dans ces prévisions en 2018 en se plaçant à un horizon 2035, estimation qui devra être régulièrement actualisée en fonction du développement effectif de la mobilité électrique, de l'installation de nouveaux points de charge et de leur puissance, des habitudes des consommateurs...*

« Thème 2 : Véhicules électrifiés et Piles à Combustibles »

*Un état de l'art particulièrement exhaustif sur les piles à Combustible nous est proposé par M. Bethoux. Ces deux articles sont d'autant bien venus que les systèmes pile à combustible (PàC) tendent progressivement vers une maturité, au point que de nombreux acteurs se posent la question de l'intérêt et de l'intensité de son déploiement dans le secteur du transport en général. Ces 2 articles visent à éclairer ce débat du point de vue du transport routier. La contribution se focalise essentiellement sur la description du véhicule à PàC afin d'en comprendre les atouts, les limites et les voies actuelles de progrès.*

*Le premier article présente le principe de fonctionnement d'une PàC d'un point de vue thermodynamique puis décrit les principaux constituants de la PàC et aborde l'association de la PàC et de ses indispensables auxiliaires qui lui permettent de constituer le système pile.*

*Le second article questionne la pertinence de la solution hydrogène pour le transport routier. Il ouvre une fenêtre de réflexion sur le déploiement de la mobilité hydrogène qui nécessite une chaîne complète : de la production, au stockage et à la distribution du dihydrogène. Ce sujet ouvert et partiellement documenté permet d'aborder la conclusion et les perspectives des applications automobiles à hydrogène.*

Report de la journée 3EI

*Nous annonçons dans notre dernier numéro que la journée 3EI 2020 aurait lieu en juin prochain après les sessions de 2016 et de 2018.*

*Malheureusement, compte tenu des conditions sanitaires actuelles, nous devons nous résoudre à décaler cette rencontre d'une année. Nous espérons donc pouvoir vous proposer de nous retrouver en juin 2021 !*

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

Faites connaître notre revue  
Vous en assurez la pérennité

La Revue 3EI

Comité de publication

Morgan ALMANZA

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean Michel GAY

Jean-Philippe ILARY

Anthony JUTON

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

## LE NUMERO 100 DE LA REVUE 3EI

ALAIN CUNIERE<sup>(1)</sup>, SAMUEL VIOLLIN<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Retraité de l'éducation nationale - Enseignant vacataire ESIEE Paris

<sup>(2)</sup>Inspecteur général de l'éducation, du sport et de la recherche - Doyen du groupe STI

**1994.** Une poignée d'enseignants de BTS en Ile de France, passionnés par l'électrotechnique, et son enseignement, publie le premier numéro de la revue 3EI (enseigner l'électrotechnique et l'électronique industrielle) sous la tutelle de la SEE (société des électriciens et électroniciens).

A cette date, les IGBT ont supplanté les transistors bipolaires, la technologie CoolMOS va apparaître. Les micro-contrôleurs et autres PSoc autorisent le contrôle vectoriel des machines tournantes et améliorent leurs performances dynamiques. Les réseaux informatiques se développent et avec eux un large accès à l'information. De nouveaux concepts conduisent à l'apparition de nouvelles structures de convertisseurs.

Ce collège de professeurs, conscient de ces fortes avancées scientifiques et industrielles, mû par la volonté de contribuer à leur diffusion, publie un premier numéro thématique dédié à leur enseignement, il y aura trois numéros par an.

Rapidement, l'engouement des équipes enseignantes post-bac pour la richesse des articles publiés, stimule leur envie de partager des connaissances personnelles, notamment sur la façon de dispenser ces savoirs. Un quatrième numéro annuel verra rapidement le jour pour faire connaître les pratiques pédagogiques de celles et ceux qui agissent dans les spécialités de l'éducation aux Sciences et Techniques Industrielles (STI).

Soulignons l'esprit visionnaire de M. Lemaire, proviseur du lycée Pierre de Coubertin à Meaux, de M. Forest, enseignant chercheur au LESIR de l'école normale supérieure de Cachan, de M. Goldberg, responsable du CFE (comité français de l'électrothermie) soutenu par EDF, qui ont tous trois financé la parution du numéro 0, lequel fut offert à 1 000 professeur(e)s d'électrotechnique et d'électronique de BTS et d'IUT. La revue était lancée.

Vingt-six ans plus tard, l'histoire montre ce besoin permanent des équipes enseignantes françaises d'être au fait des développements industriels et scientifiques propres à notre domaine d'expertise

Cette équipe, relayée par de nouvelles générations d'enseignants post-bac et depuis de nombreuses années par des enseignants chercheurs, a réussi le pari inimaginable pour ses fondateurs en 1994 de publier un numéro 100 en mai 2020 !

**2020**, voici quelques exemples de ces évolutions qui perdurent. L'éolien et le photovoltaïque sont en pleine expansion. Le vélo et la voiture électriques sont des réalités du quotidien. L'avion électrique est plus qu'un concept. Les drones, gyropodes et autres hoverboard sont des objets de très haute technicité à mettre en œuvre

et largement exploités dans des secteurs toujours plus nombreux de l'industrie et des BTP.

Le dénominateur commun à toutes ces technologies nouvelles, au-delà des progrès sur les motorisations, reste la conversion statique de l'énergie électrique. De nouvelles structures pour élever les niveaux de tension, densifier les puissances volumiques, améliorer le rendement, sont le résultat de travaux continus sur la technologie des composants actifs et passifs sans oublier ceux sur les lois de commande innovantes et sophistiquées de ces structures. A ces évolutions s'ajoute de manière accrue par rapport à 1994, une grande attention portée aux aspects de développement durable pour la production, la distribution, la conversion d'une énergie électrique, avec l'ambition de préserver de façon toujours plus efficace les ressources de la planète en limitant leur impact environnemental.

On imagine aisément le questionnement des enseignant(e)s post baccalauréat pour distinguer l'essentiel, trouver une identité disciplinaire, tant les problèmes sont variés, multi-physiques, pour construire leur enseignement.

Dans ce contexte d'évolution permanente de notre discipline, il est donc naturel qu'après la rénovation du BTS génie électrique en 2006, à la demande des branches professionnelles, un groupe de réflexion piloté par nos plus hautes instances du ministère de l'éducation nationale ait décidé d'une rénovation dont la mise en application débutera en septembre 2020. Les lignes directrices pour l'écriture de cette rénovation ont été élaborées à partir des constats suivants :

- une insertion professionnelle rapide pour la grande majorité des diplômés ;
- des industriels attachés au diplôme de niveau III pour leurs domaines d'activités ;
- des contenus et volumes d'enseignement nécessitant une mise en adéquation avec l'évolution des technologies et des réglementations.

La figure 1 renseigne les domaines de formation du BTS de génie électrique. Six secteurs d'activité sont identifiés ainsi que les évolutions technologiques induites par les enjeux tels que l'efficacité et la performance énergétique, le développement des énergies renouvelables, la transition numérique, la cyber-sécurité et l'interopérabilité.

Le nouveau référentiel est structuré en huit activités principales, cinq blocs de compétences liés à la spécialité et trois blocs de compétences liés à l'enseignement général.

La formation devra intégrer l'évolution des méthodes de travail et de la réglementation, comme :

- la normalisation et la standardisation des méthodes de travail (ISO, NF) ;
- l'intégration du BIM et le management des données (BIM) ;
- l'analyse et le diagnostic, la maintenance des installations et des équipements électriques ;
- la cyber-sécurité ;
- QSSE : loi de transition énergétique, RT2012, RE2020, etc. ;
- DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques).

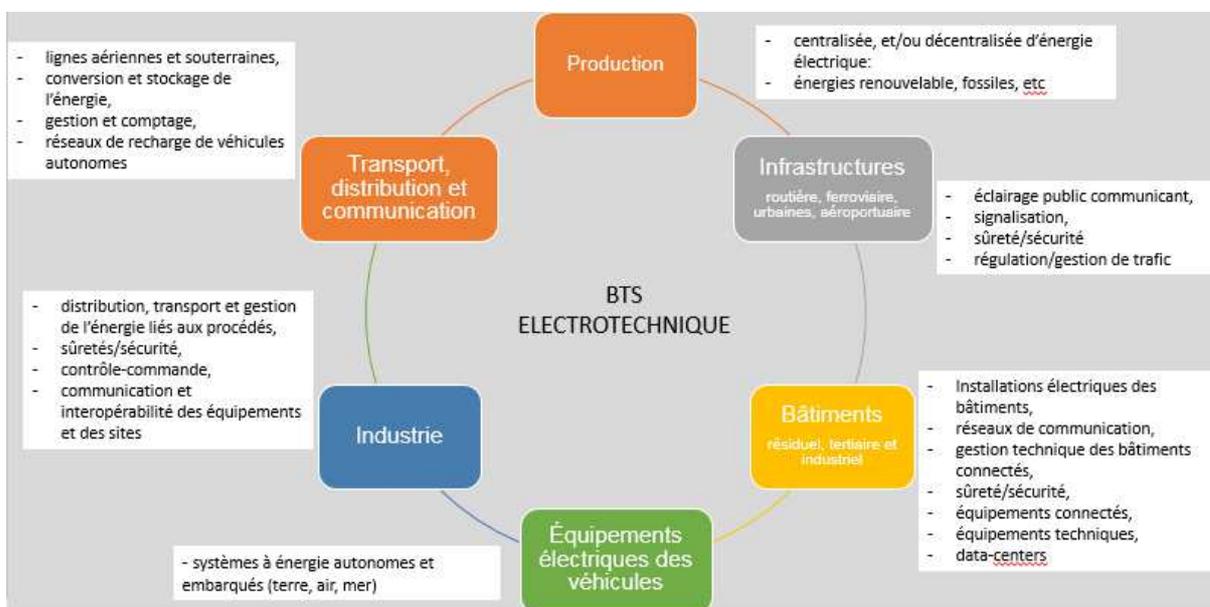


Figure 1

La nouvelle grille horaire (figure 2) de la formation renseigne sur l'importance donnée à l'enseignement professionnel (EP), soit 70% de l'horaire hebdomadaire. L'émergence de nouvelles technologies oblige à repenser régulièrement la formation de nos futur(e)s technicien(ne)s afin de faciliter leur insertion professionnelle.

Un stage en entreprise contribuera à la professionnalisation des étudiants et sera évalué de façon mieux définie qu'il ne l'était auparavant.

A partir de septembre 2020, la création d'un module de physique/chimie spécifiquement adapté à la formation, des heures de co-enseignement avec d'autres acteurs de la formation, un module nouveau portant sur l'analyse, le diagnostic, la maintenance de systèmes pluri-techniques, fondent une nouvelle stratégie de formation en phase avec les attentes des métiers face à de nouvelles problématiques.

BTS Electrotechnique		Horaire de 1 <sup>ère</sup> année			Horaire de 2 <sup>e</sup> année			Cycle de deux ans <sup>(1)</sup>		
		Semaine	a <sup>(2)</sup>	b <sup>(2)</sup>	c <sup>(2)</sup>	Semaine	a <sup>(2)</sup>		b <sup>(2)</sup>	c <sup>(2)</sup>
1. Culture générale et expression		3	2	1	0	3	2	1	0	180
2. Langue vivante étrangère : anglais		2	0	2	0	2	0	2	0	120
3. Mathématiques		3,5	2,5	1	0	3,5	2,5	1	0	210
4. Enseignement professionnel (EP) et généraux associés		22,5	10,5	0	12	22,5	10,5	0	12	1 350
Détail EP	Physique chimie	8	4	0	4	8	4	0	4	480
	Sciences et techniques industrielles : STI <sup>(4)</sup>	10	2	0	8	10	2	0	8	600
	STI en co-enseignement avec anglais	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	0	0	1 <sup>(5)</sup>	1 <sup>(5)</sup>	0	0	60
	STI en co-enseignement avec mathématiques	0,5 <sup>(6)</sup>	0,5 <sup>(6)</sup>	0	0	0,5 <sup>(6)</sup>	0,5 <sup>(6)</sup>	0	0	30
	Analyse, diagnostic, maintenance	3 <sup>(7)</sup>	3 <sup>(7)</sup>	0	0	3 <sup>(7)</sup>	3 <sup>(7)</sup>	0	0	180
5. Accompagnement personnalisé <sup>(8)</sup>		1	0	1	0	1	0	1	0	60
<b>Horaire hebdomadaire étudiant</b>		<b>32</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>32</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>1 920</b>
Enseignement facultatif Langue vivante 2		2	2	0	0	2	2	0	0	120

Figure 2

La période difficile que notre pays traverse, souligne l'importance cruciale d'une indépendance industrielle pour affronter certaines épreuves consécutives à nos modes de vie. Une réappropriation des savoir-faire des industriels de notre pays semble une évidence pour relever les défis du futur. Nous aurons besoin de technicien(ne)s formés au meilleur niveau, d'équipes enseignantes à qui seront donnés les moyens d'assurer

pleinement ces formations, de chercheur(se)s dotés de laboratoires équipés pour répondre aux évolutions technologiques liées aux enjeux. La formation tous les ans de près de cinq mille jeunes diplômés de BTS électrotechnique est un atout pour notre pays. Nous souhaitons, par la publication de cette revue 3EI, contribuer à leur réussite.



Les 100 numéros de la Revue 3EI

INFORMATION 3EI

La Journée 3EI 2020

JOURNÉE 3EI — 4 JUIN 2020

ENS PARIS-SACLAY  
4, AVENUE DES SCIENCES  
91190 GY-LEUREY-VETTE

Le comité de rédaction de la Revue 3EI propose une journée d'échanges sur le thème de la

PÉDAGOGIE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
ET EN PHYSIQUE APPLIQUÉE

Reportée en juin 2021

## PERSPECTIVES D'INTEGRATION POUR LA CHAÎNE DE CONVERSION D'ENERGIE DES VEHICULES ELECTRIFIES

ANTOINE CIZERON

Laboratoire du Génie électrique de Paris, GeePs  
5 & 11 rue Joliot Curie, Plateau du Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette

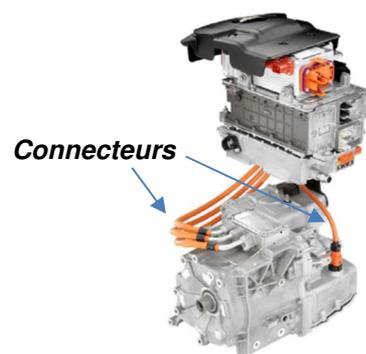
**Résumé :** Cet article s'intéresse à l'intégration de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une intégration globale de toute la « chaîne de traction » convertissant l'énergie électrochimique de la batterie en énergie mécanique finale nécessaire aux roues d'un véhicule électrifié (VE ou VEH). Les axes de recherche et de développement permettant de répondre aux exigences spécifiques de l'application automobile seront envisagés. La première partie expose les ordres de grandeurs de densité de puissance attendus dans le cadre des chaînes de conversion intégrées. Le point central pour atteindre ces objectifs ambitieux consiste à pousser la logique d'intégration de l'électronique de puissance au plus près des machines électriques, quitte à revoir les topologies actuelles de ces deux constituants voire l'architecture globale. La seconde partie se focalise sur les solutions actuelles d'intégration de puissance fondées sur la technologie silicium qui est la plus fiable à ce jour et sur l'accélération du vieillissement de la machine qui peut être induit par sa proximité avec l'électronique de puissance. La voie du fractionnement est ensuite présentée comme étant un moyen d'améliorer la résilience du système en ajoutant de la redondance et en diminuant les contraintes sur la machine. La dernière partie se focalise sur les enjeux de l'utilisation des composants à large bande interdite dans une telle application et sur les verrous technologiques qu'il reste à lever pour rendre cette technologie compatible avec la sensibilité des machines électriques aux commutations rapides et avec les exigences du contexte automobile.

### 1. Introduction

Les chaînes de conversion électrique sont largement utilisées dans tous les domaines industriels pour assurer des tâches nécessitant une vitesse variable : pompage, traction, etc. Dans une chaîne de conversion électrique traditionnelle, l'électronique de puissance et la machine électrique sont conçues séparément pour être ensuite assemblées électriquement par des connectiques adaptées. Si cette méthode peut engendrer un système complet sous-optimal, elle présente deux avantages. Le premier intérêt est la possibilité de constituer un dispositif industriel en se fondant sur des constituants déjà conçus, fiabilisés et amortis (assemblage de composants sur étagère). Le second réside dans la possibilité de découpler la gestion thermique de chaque constituant : chacun opère autour de son point de fonctionnement optimal vis-à-vis de son compromis spécifique : durée de vie versus compacité. D'ores et déjà, ces chaînes de conversion se généralisent dans le contexte applicatif singulier de la traction automobile en pleine électrification. Dans le domaine des transports, la masse est un déterminant majeur de la consommation finale. De plus, les différents éléments doivent être facilement logeables afin de garantir la meilleure habitabilité. Les exigences en termes de densité massique et volumique sont donc très élevées. Dans l'automobile s'ajoute une contrainte extrêmement forte de coût. Ces contraintes sont telles que des solutions de convertisseurs intégrés aux machines électriques sont désormais envisagées ; ce type de solution permet de s'affranchir des connectiques et de mutualiser les systèmes de refroidissement. Cela amène donc à concevoir de manière conjointe les dispositifs de

conversion électrique et de conversion électromécanique en visant, pour la réalisation globale, les objectifs suivants :

- Augmentation des densités de puissance ;
- Réduction des perturbations électromagnétiques ;
- Réduction des coûts ;
- Maîtrise des procédés de fabrication et de validation.



#### 2012 Electric Drive System

\$30/kW, 1.1 kW/kg, 2.6 kW/L  
90% system efficiency

**55kW SYSTEM COST OF \$1650**  
Today's electric drive systems use discrete components, silicon semiconductors, and rare earth motor magnets.

Figure 1 : Chaîne de conversion centralisée [1]

Depuis plusieurs années, certaines institutions publiques comme le département américain dédié à l'énergie (US DoE) affichent des ambitions claires et chiffrées quant au coût et aux densités de puissance visés. La Figure 1 montre un système centralisé de conversion électromécanique pour lequel les fonctions d'alimentation et de conversion électromécanique sont assurées par des sous-systèmes logés dans des carters distincts et éloignés ; le fonctionnement de l'ensemble est assuré par des connecteurs de puissance et de signal.



Figure 2 : Chaîne de conversion intégrée [1]

Au début des années 2010, de tels systèmes pouvaient atteindre une densité volumique de 2,6 kW/L. L'un des inconvénients de cette structure centralisée est que les câbles employés pour relier l'électronique de puissance au moteur électrique entraînent des surtensions aux bornes des enroulements de la machine [2]. Afin de limiter le rayonnement des perturbations électromagnétiques, ces connectiques doivent être blindées, ce qui les rend massives et onéreuses. À l'inverse, l'intégration de l'électronique de puissance au plus près de la machine entraîne la mutualisation du système de refroidissement et la réduction drastique de la longueur des connectiques. Les pièces métalliques de la machine peuvent également servir de blindage et permettre de confiner les perturbations électromagnétiques. Cependant, cette proximité peut avoir des effets néfastes aussi bien sur l'électronique de puissance que sur la machine électrique. Par exemple, les connectiques et les convertisseurs statiques doivent être conçus de manière à supporter de forts niveaux de vibrations et de contraintes mécaniques. De même, le vieillissement de la machine sous l'effet de la proximité des convertisseurs statiques doit également être évalué, d'autant plus qu'ils commutent rapidement. Cet aspect sera détaillé au cours de la partie suivante. Un tel système intégré est illustré par la Figure 2. Cette intégration, au-delà d'offrir une amélioration de la densité volumique de puissance devrait permettre une meilleure maîtrise des procédés de fabrication et de développer des méthodes de validation et de vérification pour le système complet [3]. En effet, sur un système centralisé (Figure 1), les procédures de validation sont effectuées pour chaque sous-ensemble (convertisseur,

machine électrique...) de la chaîne de conversion. En agissant sur toutes les dimensions de ce levier, le DoE se fixe un objectif de 4 kW/L à l'horizon 2022, ce qui revient quasiment à augmenter fortement la densité de puissance volumique par rapport à un système centralisé.

Conjointement à cette notion d'intégration, le fractionnement des chaînes de conversion électromécanique constitue également un levier pour répondre à l'enjeu de :

- Fiabilité et résilience de la chaîne de conversion.

Cet objectif est également très intéressant dans le contexte applicatif automobile où la sûreté de fonctionnement est nécessaire pour des questions de sécurité pour les usagers et également de réputation pour les constructeurs. La conception de convertisseurs statiques modulaires associés à des portions de machine électrique peut mener à l'obtention d'un système global fractionné plus résilient. La partie suivante présente quelques solutions d'intégration et détaille cette notion de fractionnement, montrant dans quelles mesures elle peut faciliter l'intégration de puissance.

## 2. Solutions actuelles d'intégration

Cette partie aborde les différents degrés d'intégration qui sont actuellement envisagés dans des études prospectives dont certaines ont donné lieu à des prototypes intégrés dans des véhicules. Suite à une présentation des prémices de l'intégration des chaînes de traction, la notion de fractionnement est introduite.

### 2.1. Suppression des connectiques longues

Pour intégrer une chaîne de conversion électromécanique en un seul système regroupant les fonctions d'alimentation et de conversion électromécanique, une méthode consiste à optimiser la disposition des différents éléments présents dans le système centralisé (Figure 1) et ainsi réduire l'encombrement. Le premier pas dans cette démarche est d'assembler mécaniquement le carter de la machine et celui du convertisseur statique, comme dans les exemples apparaissant sur la figure 3.

Cette méthode se résume à un problème d'assemblage cherchant à intégrer au mieux les structures traditionnelles. De nombreuses solutions élaborées suivant cette méthode sont présentées dans [3]. Le principal intérêt étant de réduire la longueur des connectiques pour limiter les perturbations électromagnétiques rayonnées ainsi que de réduire la masse et le coût du système global. En effet, la longueur des câbles qui relie traditionnellement le convertisseur à la machine a tendance à se comporter comme une antenne sous l'effet des commutations rapides du convertisseur statique. De plus, les phénomènes de réflexion qui interviennent à l'interface entre les câbles et la machine, dus à des différences d'impédances caractéristiques, engendrent des surtensions aux bornes

des isolants des bobinages de la machine. Ces tensions transitoires élevées sont néfastes pour les isolants et ont tendance à dégrader leur durée de vie [4].



Figure 3 : Intégration sommaire, réduction des connectiques [3]

Le carter de la machine et son circuit magnétique représentent également un blindage permettant de confiner les perturbations électromécaniques générées par le convertisseur. Cet aspect peut donc être également exploité lorsque le convertisseur statique est proche de la machine.

Cependant, comme précisé dans l'introduction, la proximité de l'électronique de puissance et de la machine peut avoir des effets néfastes sur les deux parties. Une fois placés au plus près de la machine, le conditionnement des convertisseurs statiques doit leur permettre de résister aux vibrations et aux contraintes mécaniques induites par le moteur électrique. Cet aspect est un verrou technologique à lever pour conserver le niveau de fiabilité requis par le secteur du transport. De même, la machine souffre des commutations rapides imposées par le convertisseur statique. Ces dégradations et leurs sources sont détaillées dans le paragraphe suivant.

## 2.2. Vieillessement de la machine

Sous l'effet des commutations rapides des composants d'électronique de puissance, plusieurs phénomènes de dégradation de la machine électrique apparaissent. Cette partie se focalise entre autres, sur les phénomènes de dégradation des isolants des bobinages et d'usure des roulements mécaniques. Ces phénomènes sont apparus

dès les premières associations d'onduleurs et de machine et sont d'ailleurs des causes majeures de disfonctionnement. En revanche, la tendance à l'augmentation des fréquences de découpage de l'électronique de puissance amplifie ces mécanismes de dégradation.

Les connectiques longues peuvent entraîner des surtensions issues des phénomènes de réflexion dans le câble, en revanche elles permettraient d'atténuer les variations de tensions perçues par le bobinage des machines. Dans un contexte d'intégration profonde de l'électronique de puissance au sein de la machine, les surtensions sont évitées mais les bobinages risquent de subir d'autant plus les effets des commutations rapides. Les décharges partielles qui peuvent survenir entre des spires voisines lors de l'application de fortes variations de tension accélèrent le vieillissement des isolants [4]. Un filtre supplémentaire doit parfois être interposé entre le convertisseur et la machine pour atténuer ces effets mais cette solution technologique ne convient pas pour l'intégration de puissance car elle nécessite l'ajout de composants passifs volumineux.

Autre conséquence, la circulation des courants de mode commun à travers les paliers mécaniques est facilitée lorsqu'on augmente la vitesse de commutation des interrupteurs. La figure 4 montre les effets capacitifs parasites entre les bobinages du stator alimentés par l'onduleur et la carcasse au travers des roulements à billes.

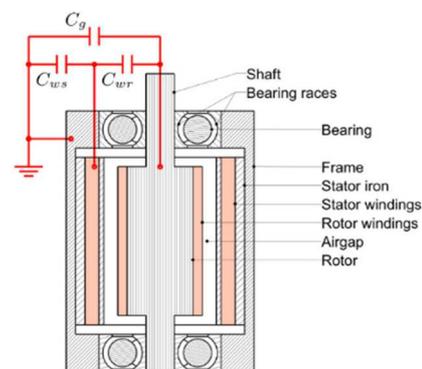


Figure 4 : Chemins capacitifs associés aux courants de mode commun [5]

Ces courants apparaissent sous la forme de décharges entre les billes et les bagues du roulement. Ils ont tendance à dégrader l'état de surface des chemins de roulement comme le montre les Figures 5 et 6. Cette dégradation réduit la durée de vie des paliers.



Figure 5 : Cannelure des roulements sous l'effet des courants de mode commun [6]

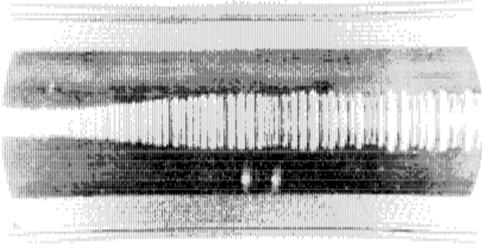


Figure 6 : État de surface montrant l'usure d'un chemin de roulement due aux courants de mode commun. [7]

Des solutions fondées sur des paliers en céramique sont moins sensibles à ces phénomènes de mode commun tout en se révélant plus onéreuses.

Les deux conséquences que nous venons d'étudier sont induites par l'utilisation d'interrupteurs à commutations rapides dans le cadre de l'alimentation des machines électriques et sont des causes majeures de dysfonctionnement des machines électriques. L'intégration des convertisseurs statiques au sein des machines doit donc se faire en minimisant ces effets. Le fractionnement des alimentations et l'utilisation de niveaux de tension faible, présentés dans la partie suivante permettent de diminuer les contraintes sur la machine.

### 2.3. Niveaux de tension employés

Dans la plupart des véhicules électriques et hybrides commercialisés actuellement, la tendance est à l'utilisation de tension continue de plusieurs centaines de volts en amont des onduleurs [8]. Cela permet entre autres, à même puissance de réduire les niveaux de courant dans la machine et donc l'échauffement des conducteurs. La vitesse de base de la machine est également augmentée. Cependant, ces niveaux de tensions requièrent de nombreuses protections pour assurer la sécurité des personnes dans le contexte applicatif de l'électrification automobile. L'utilisation d'un niveau de tension dit « Très Basse Tension » (TBT) inférieur au 120 V continu (Norme NF C18-510) facilite grandement une intervention humaine en cas d'opération de maintenance ou suite à un accident de la route. Pour satisfaire cette exigence sécuritaire de nombreux constructeurs et équipementiers envisagent l'utilisation d'un bus de tension continue de 48 V pour des applications de plusieurs dizaines de kW [9]. De telles valeurs de tension permettent également de recourir à des interrupteurs à très faible résistance à l'état passant comme les transistors MOSFETs BT. Ces composants génèrent donc moins de pertes en conduction ce qui peut permettre de réduire la dimension des échangeurs thermiques. L'un des objectifs de la diminution des tensions employées est également de diminuer les niveaux de  $(dv/dt)$  et de tension de mode commun qui accélèrent le vieillissement de la machine électrique, comme précisé dans la partie précédente. Pour une même machine, reconsidérer l'alimentation des bobinages permet de

réduire les niveaux de tension nécessaires sans dégrader la puissance convertible. Plusieurs solutions technologiques permettant cette reconfiguration sont présentées dans la partie suivante.

### 2.4. Fractionnement et modularité

Dans le cadre des machines polyphasées, l'augmentation du nombre de phases, à même niveau de courant, permet d'utiliser une tension de bus plus faible. Cette approche, que l'on pourrait assimiler à un fractionnement du nombre de phases permet également de rendre le système plus résilient en cas de défaillance d'une phase. La qualité du couple peut être maintenue lors de la perte d'une phase sans recourir à l'utilisation d'un neutre distribué ou d'onduleur monophasé 4 quadrants sur chaque bobinage.

Une autre approche consiste à fractionner l'alimentation des différents enroulements constituant une phase au lieu de les associer en série comme c'est le cas dans les systèmes centralisés présentés dans la première partie. Ce fractionnement fournit de nouveaux degrés de liberté qui peuvent être exploités pour faciliter l'intégration des modules d'électronique de puissance au sein de la machine. Cette démarche vise à reconsidérer l'association du convertisseur statique et du bobinage de la machine pour favoriser les possibilités d'intégration. Le concept de convertisseur intégré modulaire (en anglais Integrated Modular Drive – IMD) peut être décrit par le constat suivant :

Un moteur électrique possède de nombreuses symétries axiales. Il peut être fractionné selon ces symétries afin que chaque portion du moteur soit alimentée par un module d'électronique de puissance placé au plus près du bobinage.

Traditionnellement, une machine triphasée est associée à un seul onduleur triphasé quel que soit son nombre de paires de pôles. Chaque phase est obtenue par la mise en série ou parallèle des différentes bobines localisées sur chaque pôle. Il est possible de fractionner la machine selon ses différents pôles et d'alimenter chaque sous-ensemble par des convertisseurs distincts. Cela permet de réduire les niveaux de tension continue employés et d'obtenir de la redondance dans la structure.

Parmi les techniques de bobinages employées, le bobinage concentré autour des dents statoriques semble le plus adapté pour cette notion de fractionnement car les bornes d'accès aux enroulements sont plus proches que dans le cas des bobinages à pas diamétral.

La Figure 7 représente un type de fractionnement qui peut être employé. Dans cette proposition [10], chaque bobinage est associé à un convertisseur. Un tel agencement présente également un intérêt du point de vue de la gestion thermique du convertisseur. Les échangeurs thermiques associés à ce module sont directement au contact de la tôle, optimisant ainsi l'évacuation des pertes du convertisseur vers le puit thermique constitué par le grand volume de matière conductrice de chaleur associé au circuit magnétique du moteur.

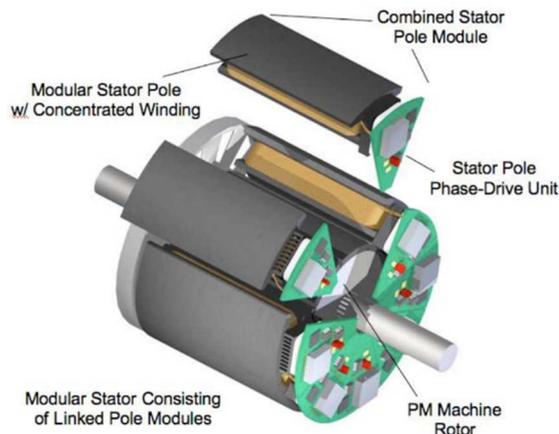


Figure 7 : Un convertisseur associé à chaque enroulement dans le cadre d'un bobinage concentré [10]

Pour exploiter le nombre de paires de pôles de la machine, il peut être envisagé de subdiviser la machine en plusieurs sous-systèmes triphasés, chacun associé à un convertisseur distinct. Le schéma de droite de la Figure 8 montre une mise en parallèle des différents modules triphasés. Avec une telle alimentation, la tension du bus DC requise est divisée par le nombre de subdivisions.

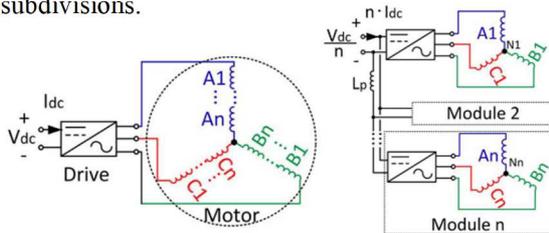


Figure 8 : Structure conventionnelle et subdivision en  $n$  modules triphasés [11]

Une telle structure fractionnée donne de nouveaux degrés de liberté. Par exemple, il peut être envisagé d'entrelacer les porteuses des PWM de chaque sous module afin de réduire les ondulations de courant [12] ou bien de diminuer les niveaux de tension de mode commun [13].

La granularité du concept de fractionnement, peut être ramenée à différentes échelles. La figure 9 montre un concept de machine possédant un bobinage statorique à cage, similaire à la cage d'écureuil des rotors de machines asynchrones. Les encoches du circuit magnétique statorique sont donc remplies par des barres conductrices, toutes court-circuitées à l'une de leur extrémité et associées à une cellule de commutation de l'autre côté.

Cette structure présente de nombreux avantages en termes de fabrication, la cage étant beaucoup plus simple à réaliser qu'un bobinage de fil conducteur. L'évacuation des pertes générées dans les conducteurs est également facilitée dans cette structure car la couronne conductrice réalisant le court-circuit à l'une des extrémités peut être employée pour drainer les calories depuis l'intérieur du stator. De nombreux degrés de liberté peuvent être utilisés dans la commande.

Ainsi, par exemple, dans le cas de l'utilisation d'un rotor de machine asynchrone, le nombre de paires de pôles de la machine peut être géré dynamiquement permettant ainsi de profiter d'une boîte de vitesse électrique [14].

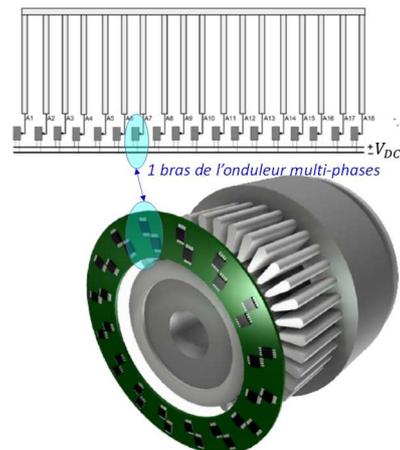


Figure 9 : Association d'un convertisseur à chaque encoche [14]

Au-delà de l'association convertisseur/encoche, le brevet [15-16] propose d'associer un convertisseur à chaque spire.

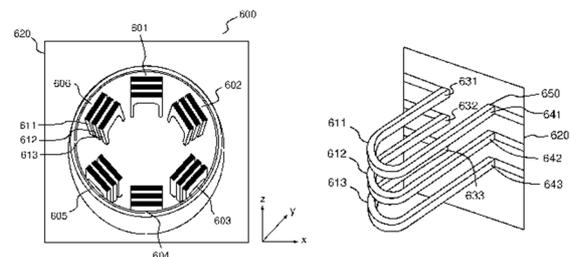


Figure 10 : Association d'un convertisseur à chaque spire [15]

La Figure 10 représente des spires partageant la même dent statorique et une solution technologique pour les raccorder au PCB d'électronique de puissance. Cette solution pousse la granularité du fractionnement à l'extrême et apporte une solution à la réduction des niveaux de tension nécessaires à la structure. Bien que ces structures fractionnées présentent une grande résilience, la complexité de leur commande est beaucoup plus importante que ce qu'elle pourrait être dans le cadre d'une chaîne de conversion centralisée (Figure 1). En effet, le nombre de paramètres et de degrés de libertés du système augmentant avec le nombre de fractionnement, il peut être envisagé d'employer une multitude de petites unités de contrôle plutôt qu'un unique contrôleur surdimensionné centralisant toutes les commandes [17].

Enfin, l'augmentation du nombre de fractionnement va de pair avec l'augmentation du nombre de composants semi-conducteurs et les études sur cycle de vie à conduire sur un tel système sont beaucoup plus complexes que l'analyse sur cycle de vie d'un système

traditionnel. Les modules de puissance comportant des composants en Silicium sont les plus fiables actuellement et les plus à même de remplir les exigences requises par le contexte applicatif de l'automobile. Or, dans l'optique de mutualiser les systèmes de refroidissement de la machine et du convertisseur, il faut s'assurer de la compatibilité de leur température de fonctionnement. La partie finale de cet article expose les limites thermiques de l'emploi des technologies Silicium et les possibilités offertes par les nouveaux composants à large bande interdite.

### 3. Perspectives offertes par l'utilisation des composants à large bande interdite

Fondés sur des interrupteurs au silicium (Si), les convertisseurs statiques traditionnels, malgré leur grande fiabilité ne sont pas adaptés pour fonctionner avec un bon rendement dans un environnement thermique rude. Cet aspect exclut leur utilisation dans des solutions d'intégration profonde de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. En effet, pour assurer la meilleure compacité du système de refroidissement, il est important d'accepter une température élevée facilitant les échanges thermiques. Or, de par les contraintes de ses constituants (conducteurs, isolants électriques, aimants, circuit magnétique), la machine électrique peut supporter des températures au-delà de 100°C. En revanche, compte-tenu de sa bande interdite modeste (1,1 eV), les propriétés électriques du Si sont facilement affectées par l'agitation thermique, ce qui limite concrètement l'utilisation nominale du cœur du composant à environ 100 °C et donc son dissipateur à une température moindre. De plus la résistance à l'état passant  $R_{DSon}$  augmente significativement avec la température. Le tableau 2 montre les données fournies par le constructeur à propos d'une cellule de commutation MOSFET SI. On remarque que la valeur de  $R_{DSon}$  double pour un écart de température de 100°C.

Température de jonction (°C)	$V_{GS}$ (V)	$I_D$ (A)	$R_{DSon}$ (mΩ)
25	10	10,4	9,9
125	10	10,4	18,7

Tableau 1 : Donnée constructeur pour un MOSFET SI 100V/48A [18]

Avec des modules au Si, les attentes en termes de rendement ne peuvent donc pas être atteintes pour une température de fonctionnement de l'ordre de celle régnant dans le carter d'une machine électrique. Pour ces deux raisons, il est donc inconcevable de mutualiser les systèmes de refroidissement. En revanche, les nouvelles technologies de composants fondées sur des semi-conducteurs (Wide-bandgap semiconductors) présentent des bandes interdites élevées (supérieures à 3eV) rendant leurs propriétés électroniques nettement moins sensibles à l'augmentation de la température ; ils peuvent donc tolérer des températures de fonctionnement supérieures à celle du silicium, et

compatibles avec celle des machines électriques. L'arrivée de cette nouvelle génération de composants permet donc de reconsidérer une intégration profonde des convertisseurs statiques au sein des machines électriques.

#### 3.1. Comparaison des propriétés physiques des différents semi-conducteurs d'électronique de puissance

Les semi-conducteurs dits « à grand gap » les plus utilisés en électronique de puissance sont le Nitrure de Gallium (GaN) et le Carbure de Silicium (SiC). La largeur de bande de ces matériaux est nettement supérieure à celle du Si, ce qui leur confère, entre autres, une meilleure tenue en tension et permet un fonctionnement à plus haute température. La Table 2 illustre ces différentes propriétés.

Property	Si	GaN	SiC
Bandgap (eV)	1.1	3.4	3.2
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1450	2000	900
Critical electric field (MV/cm)	0.3	3.5	3.0
Electron saturation velocity (10 <sup>7</sup> cm/s)	1.0	2.5	2.2
Thermal conductivity (W/cm-K)	1.5	1.3	5.0
Maximum operating temperature (°C)	200	300	600
Specific heat capacity (J/KgK)	712	490	681

Tableau 2 : Propriétés des semi-conducteurs à large bande interdite [19]

Les composants dits « à grand gap » possèdent une largeur de bande interdite trois fois plus grande que celle du Si. Cela explique la grande différence que l'on peut observer dans les valeurs de champ critique : celles du SiC et du GaN sont dix fois supérieures à celle du Si. Ce point est important car pour des composants verticaux, c'est-à-dire Si ou SiC (Figure 11), lorsqu'on diminue le calibre de tension du composant, l'épaisseur de matériau peut être réduite, ce qui induit mécaniquement une diminution intéressante de la chute de tension à l'état passant. Cet aspect peut inciter au fractionnement des chaînes de conversion afin de réduire le calibre de tension et donc les pertes par conduction. Les composants GaN quant à eux sont horizontaux (Figure 11) et profitent d'une mobilité électronique très élevée qui leur permet également de bénéficier d'un  $R_{DSon}$  très avantageux comparativement à un composant au Si. Enfin, concernant la température de fonctionnement, les limites théoriques des interrupteurs à grand gap sont également nettement supérieures à celles du Si. En plus d'une compatibilité thermique avec la machine électrique, cette propriété leur permet d'offrir des densités de courant nettement supérieures. Ainsi, pour un même calibre de courant, leur surface est réduite, ce qui diminue fortement les capacités parasites et par voie de conséquence diminue significativement les temps de commutation. Ainsi, pour une même fréquence de commutation, les pertes par commutation des composants SiC ou GaN sont nettement inférieures à celle des interrupteurs Si.

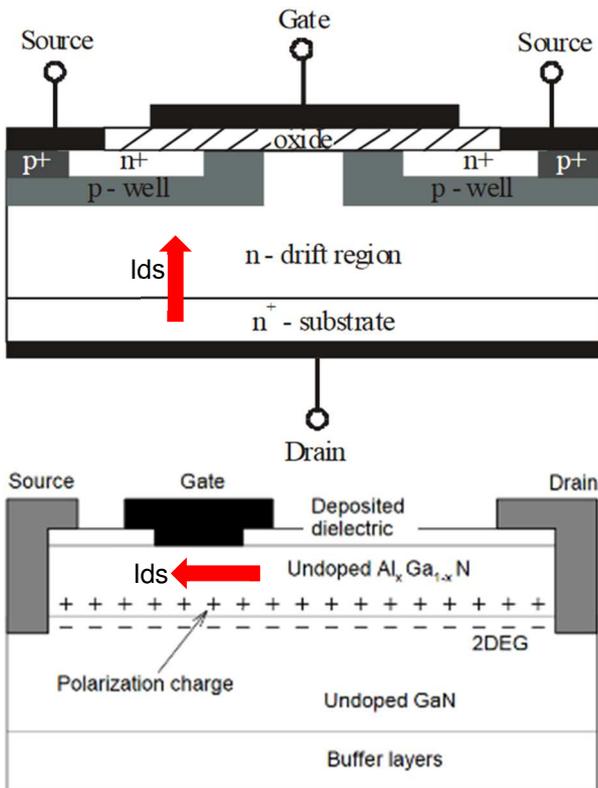


Figure 11 : Structure de MOSFET SiC ou Si « verticale » (en haut) [20], et de GaN HEMT « horizontale » (en bas) [21]

En résumé, les composants à grand gap offrent le triple avantage d'accepter les mêmes températures de refroidissement que la machine, de réduire les pertes et de diminuer la surface effective du refroidisseur par augmentation de la température de l'échange avec le milieu ambiant. Ce triple effet permet donc de réduire l'encombrement des échangeurs thermiques [22]. Dans un premier temps, la Figure 12 illustre la réduction du volume des échangeurs au fur et à mesure que sa température de fonctionnement augmente, toute chose étant égale par ailleurs, en particulier la fréquence de commutation.

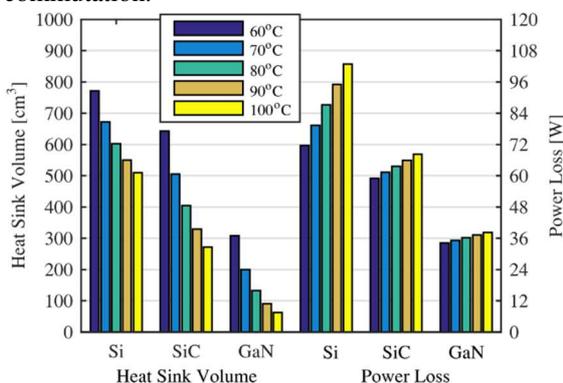


Figure 12 : Comparaison des pertes et du volume du radiateur d'une cellule de commutation à 32 kHz pour les trois technologies [22]

De plus, les composants fabriqués à partir de semi-conducteurs à grand gap se distinguent également par leur rapidité de commutation. Cette propriété leur permet de limiter les pertes en commutation et donc de

soutenir des fréquences de commutation plus élevées que les composants Si pour un même rendement. La Figure 13 illustre cet aspect en représentant les pertes globales générées par une cellule de commutation en fonction de la fréquence de découpage pour trois technologies de composants à semi-conducteurs :

- Si : Composant de type « Insulated Gate Bipolar Transistor » IGBT ;
- SiC : Composant de type « Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor » MOSFET ;
- GaN : Composant de type « High Electron Mobility Transistor » HEMT.

Le calibre en tension de chacun de ces composants est de l'ordre de 600V.

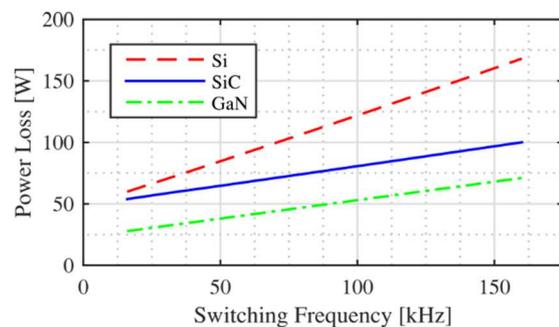


Figure 13 : Comparaison des pertes d'une cellule de commutation de 2,5 kW à 60°C pour les trois technologies [22]

Dans le cadre du contrôle d'une machine électrique, cette possibilité de montée en fréquence de commutation présente de nombreux avantages. Citons la diminution de l'ondulation de couple, l'augmentation de la dynamique du système et la possibilité d'utiliser des fréquences fondamentales élevées compatibles avec les machines à hautes-vitesses ou à grand nombre de paires de pôles.

Actuellement, on trouve sur le marché une grande variété de composant à large bande et des modules de puissance sont déjà développés en technologie SiC par les industriels (Figure 14). En revanche, ces modules sont conçus pour être utilisés dans des structures de chaînes de conversion décentralisées associés à leur propre organe de refroidissement [23].



Figure 14 : Exemples de module SiC 1,2kV pour demi-pont 120A (à gauche) et pour onduleur triphasé 50A (à droite)

Malgré tous ces avantages, les modules de puissance constitués de semi-conducteurs SiC ou GaN ne sont actuellement pas assez fiables pour remplacer la totalité de la technologie Si dans les chaînes de conversion des

VE ou VEH. De plus, dans le contexte d'intégration profonde de l'électronique de puissance à la machine, plusieurs verrous technologiques limitent le développement de ces solutions de chaînes de conversion intégrées. Ces faiblesses sont évoquées dans la partie suivante et constitue les principales perspectives de recherche pour cette nouvelle génération de composants.

### 3.2. Axes de recherche pour l'intégration des composants « grand gap » au sein des machines

Pour résumer, l'électronique de puissance doit être assez robuste pour endurer les conditions thermiques propres aux machines électriques. Pour cela, l'utilisation des composants à large bande interdite est envisagée et permet également d'augmenter la fréquence de découpage. Cependant, il faut analyser et comprendre l'effet de leurs commutations extrêmement rapides (dizaines de ns) sur la machine électrique associée et en particulier vis-à-vis du vieillissement de ses isolants et de ses roulements mécaniques. Pour permettre l'intégration de ces composants au plus près de la machine sans trop accélérer son vieillissement, les méthodes de fractionnement présentées dans la partie précédente peuvent être employées. Elles peuvent permettre de limiter les niveaux de  $(dv/dt)$  et de tension de mode commun sans ralentir la commutation des composants d'électronique de puissance. Dans cette hypothèse, le système global peut profiter des faibles pertes par commutation de ces composants et la gestion thermique du convertisseur en est facilitée.

Comme axe d'ouverture, il faut garder à l'esprit que les technologies de conditionnement de la puce («packaging») ont initialement été développées à partir des propriétés du Si et sont prévues pour des températures internes inférieures à 150°C [23]. L'emploi des semi-conducteurs à large bande interdite implique le développement de nouvelles technologies de packaging et de gestion thermique pour exploiter le fait que les nouveaux composants peuvent supporter des températures de fonctionnement plus élevées.

De plus, pour une intégration des convertisseurs d'électronique de puissance au sein de la machine électrique, les convertisseurs statiques sont fortement sollicités thermiquement et mécaniquement.

Si les contraintes sur la machine sont réduites par l'utilisation de structures fractionnées, la gestion des contraintes mécaniques reste problématique, entre autres, vis-à-vis du vieillissement de leurs connectiques et des soudures [24,25].

Pour toutes ces raisons, ces composants n'atteignent actuellement pas le niveau de fiabilité requis pour les applications automobiles. Encore moins dans le cas d'une intégration profonde de l'électronique de puissance au sein des machines électriques. Leur utilisation future dans le secteur automobile dépend

donc principalement du développement technologique de leur conditionnement thermique et mécanique.

## 4. Conclusion

Dans cet article, le contexte de l'intégration de l'électronique de puissance au plus près des machines électriques a pu être resitué au sein de la démarche globale qui est entreprise dans le secteur de l'électrification automobile. Pour les industriels, il s'agit d'augmenter la densité de puissance de la chaîne de traction, convertissant l'énergie électrique de la batterie en énergie mécanique en bout de roue. Cette amélioration doit se faire conjointement avec le respect des exigences attendues dans ce contexte applicatif en termes de fiabilité. Actuellement, seules les technologies d'électronique de puissance au Silicium (Si) sont assez matures pour être installées dans des Véhicules Electriques (VE). En revanche, les températures de fonctionnement garantissant un rendement intéressant avec cette technologie ne sont pas compatibles avec les températures régnant au sein des machines. Cela ne permet donc pas de rapprocher l'électronique de puissance Si à proximité de la machine. En revanche, quelques méthodes de fractionnement ont été présentées comme permettant de réduire les niveaux de tension employés et donc d'utiliser des composants MOSFET au Si présentant moins de pertes en conduction. Le fractionnement permet également d'extraire plus facilement les pertes en décentralisant l'échauffement de l'électronique de puissance. Cependant, les pertes en conduction ont tendance à augmenter avec la température de fonctionnement ce qui limite l'utilisation des composants Si même dans le cas du fractionnement. Un axe de recherche consiste à employer des composants au semi-conducteur à large bande interdite Nitrure de Gallium (GaN) ou Carbure de Silicium (SiC). Ces composants peuvent théoriquement supporter des températures de fonctionnement plus élevées. Ils pourraient donc être envisagés dans l'intégration de puissance au plus près des machines électriques. Ensuite, le fait qu'ils puissent commuter rapidement réduit d'une part les pertes par commutation mais a tendance d'autre part à accélérer le vieillissement de la machine. Ainsi, l'intégration de cette nouvelle génération de composant pourrait se faire conjointement avec l'utilisation des méthodes de fractionnement pour tirer parti des avantages de ces semi-conducteurs sans dégrader la durée de vie de la machine. Avant de considérer l'intégration de puissance dans les véhicules électriques, la création de chaîne de conversion intégrée devrait tout d'abord prendre place dans les applications hybrides pour lesquelles la puissance nécessaire est plus faible. Ce contexte est le plus à même de voir émerger des solutions intégrées basse-tension ayant recours aux composants semi-conducteurs à large bande interdite.

## 5. Références

- [1] [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/eveverywhere\\_blueprint.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/eveverywhere_blueprint.pdf)
- [2] C. Zoeller, T.M Wolbank, M.A. Vogelsberger. Inverter-fed drive stator insulation monitoring based on reflection phenomena stimulated by voltage step excitation.
- [3] R. Abebe, G. Vakil R. Abebe, G. Vakil, G. Lo Calzo, S. Lambert, M. Johnson, C. Gerada, B. Mecrow. Integrated motor drives : state of the art and future trends.
- [4] V. Bolgova, S. Lefebvre, S. Hlioui, N. Boucenna, F. Costa, A. Leonov Development of testing methods for winding turn-to-turn insulation of low voltage motors fed by PWM converters.
- [5] S. Narasimhan, S. Tewari, E. Severson, R. Baranwal, N. Mohan. Mitigation of Common-mode Noise in Wide Band Gap Device Based Motor Drives.
- [6] F. He, G. Xie, J. Luo. Electrical bearing failures in electrical vehicles.
- [7] D. Busse, J. Erdman, R.J. Kerkman, D. Schlegel, G. Skibinski. System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents.
- [8] K.M. Cissé, S. Hlioui, Y. Cheng, M.H. Belhadi, M. Gabsi. Etat de l'art des topologies de machines électriques utilisées dans les véhicules électriques et hybrides.
- [9] VALEO 48V hybride rechargeable : l'hybride rechargeable au meilleur coût. <https://www.valeo.com/fr/48v-le-futur-des-vehicules-hybrides/>
- [10] N.R. Brown, T.M. Jahns, R.D. Lorenz. Power Converter for an Integrated Modular Motor Drive.
- [11] J. Wang, Y. Li, Y. Han. Integrated Modular Motor Drive Design With GaN Power FETs.
- [12] C. Alosa, F. Immovilli, E. Lorenzani. Modular Multi-Three-Phase Electric Drives for Enhanced Reliability and Current Ripple Minimization.
- [13] D. Han, W. Lee, S. Li, B. Sarlioglu. A New Method for Common Mode Voltage Cancellation in Motor Drives: Concept, Realization, and Assymetry Influence.
- [14] F. Bachheibl, G. Dajaku, A. Patzak, D. Gerling. Control Strategy and Functional Safety for the Intelligent Stator Cage Drive (ISCAD)
- [15] E. Hoang, E. Labouré. « Machine électrique alimentée en basse tension et chaine de traction multicellulaire associée », brevet N° : FR3063190, <https://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR3063190.html>, 2018.
- [16] A. Cizeron, J. Ojeda, E. Labouré, O. Béthoux. Prediction of PWM-induced Current Ripple in Subdivided Stator Windings Using Admittance Analysis.
- [17] G. Gateau, P.Q. Dung, M. Cousineau, P.U. Tran, L.H. Nhan. Digital Implementation of Decentralised Control for Multilevel Converter.
- [18] FDMD85100 Dual N-Channel PowerTrench®MOSFET
- [19] A. Morya, M.C. Gardner, B. Anvari, L. Liu, A.G. Yepes, J. Doval-Gandoy, H.A. Toliyat. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges.
- [20] R. Siemienieć, U. Kirchner. The 1200V Direct-Driven SicJFET power switch.
- [21] S.Dimitrijević, J. Han, D. Haasmann, H.A. Moghadam, A. Aminbeidokhti. Power Switching Applications Beyond Silicon : The Status and Future Porspects of SiC and GaN devices.
- [22] E. Gurpinar, A. Castellazzi. Single-Phase T-Type Inverter Performance Benchmark Using Si IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs.
- [23] Z. Matallana, E. Ibarra, I. Lopez, J. Andreu, J.I. Garate, X. Jorda, J. Rebollo. Power module electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects
- [24] F. Farina, D. Rossi, A. Tenconi, F. Profumo, S.E. Bauer. Thermal design of integrated motor drives for traction applications.
- [25] L.A. Navarro, X. Perpina, P. Godignon, J. Montserrat, V. Banu, M. Vellvehi, X. Jorda. Thermomechanical Assessment of Die-Attach Materials for Wide Bandgap Semiconductor Devices and Harsh Environment Applications.

# RECHARGE SANS CONTACT DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

**ÉRIC LABOURÉ**, Professeur des universités

Université Paris-Saclay, Centrale Supélec, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France.

Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Electronique de Paris, 75252, Paris, France

Enseignant à l'IUT de Cachan

Responsable du M2 Physique et Ingénierie de l'Énergie, Systèmes Électriques pour l'Énergie et la Mobilité (M2 PIE SEEM)

**Résumé :** Après un constat de la pollution émise par le trafic autoroutier émise par les véhicules à propulsion avec un moteur thermique, il devient inévitable de passer par le véhicule à moteur électrique. Deux principaux inconvénients ralentissent son développement : son prix mais surtout son autonomie. La recharge nécessite environ 7h en maison individuelle, beaucoup moins de temps sur les stations de recharge rapide mais ne rivalisent pas avec la durée d'un plein d'essence effectué en seulement quelques minutes. Une solution consiste à développer des équipements de recharge sans contact qui ne nécessitent pas de branchements de la part de l'utilisateur. C'est ce que nous allons découvrir dans cet article. Après quelques exemples de réalisations de chargeurs statiques et dynamiques, nous rappellerons brièvement les normes relatives aux infrastructures de recharge, puis étudierons le principe physique du transfert d'énergie par induction. Nous nous concentrerons enfin sur les systèmes de transfert d'énergie électrique par induction, tant au niveau structurel qu'au niveau théorique en mettant en équations le système.

## 1. Contexte

L'électrification des véhicules est une activité en plein essor portée par les politiques actuelles tournées vers la diminution des émissions de gaz à effet de serre. En effet, le secteur des transports représentait 33% de la consommation d'énergie finale en France en 2015 et il est le principal émetteur de CO<sub>2</sub>, avec 39% des émissions totales de GES (Gaz à Effet de Serre) [1]. Dans ce bilan, les voitures particulières représentent 56% du total et les véhicules utilitaires et les poids lourds 43%.

Selon le mode de production de l'énergie électrique, l'empreinte carbone associée à l'électromobilité peut être considérablement réduite. Toutefois, les émissions de GES ne sont pas les seuls problèmes générés par les émissions des véhicules thermiques. Notons en particulier les problématiques pour les populations dans les grandes villes des pics de pollutions fréquents. L'impact négatif sur la santé de ces phénomènes conduit un grand nombre de municipalités à restreindre la circulation des véhicules polluants dans les zones les plus denses. La mise en place de la vignette Crit'air en France est une parfaite illustration de ces mesures restrictives.

Ces politiques visent non seulement les consommateurs, mais également les constructeurs. Si nous prenons l'exemple de l'Europe, des réglementations de plus en plus sévères concernent les flottes de véhicules. Les émissions désignées de manière équivalente comme « émissions spécifiques moyennes de CO<sub>2</sub> » [2] sont évaluées par le CAFE (Corporate Average Fuel Economy). Elles sont calculées en g/km moyen sur l'ensemble des véhicules neufs vendus sur

une année par un constructeur. L'objectif était de 130 g/km en 2015, il est aujourd'hui de 95 g/km pour 2020. En cas de dépassement, les constructeurs doivent payer une pénalité multipliée par le nombre total de voitures.

Le développement d'une flotte plus électrifiée est donc inévitable. Cela dit, le véhicule électrique existe déjà depuis quelques années en Europe mais malgré les incitations financières des gouvernements successifs, la part de l'électrique dans l'achat de véhicule neufs reste faible (1,9% en 2019) car il souffre de deux principaux inconvénients : son prix, difficilement compétitif pour l'instant par rapport au véhicule thermique équivalent, mais surtout son autonomie. Même si des développements récents ont permis de passer d'une autonomie d'environ 150 km à plus de 300 km, elle reste encore loin de l'autonomie d'environ 1000 km des voitures thermiques. La densité énergétique des batteries lithium-ion est en effet loin d'égaliser celle des carburants fossiles et même si la majorité des utilisations en milieu urbain sont largement couvertes par cette autonomie, la crainte du manque d'énergie et donc de la panne est toujours présente.

Les batteries actuelles, avec les chargeurs de 7 kW accessibles principalement pour les personnes logeant en maison individuelle, nécessitent une durée de 7 h environ pour atteindre une recharge complète. Malheureusement, même si des chargeurs rapides de 43 kW existent, le parc de stations de charge équipées de ce type de chargeurs n'est pas encore très développé. De plus ces chargeurs, malgré leur puissance, ne permettent pas de concurrencer la durée d'un plein d'essence effectué en seulement quelques minutes. Différentes solutions sont envisagées pour pallier ce problème. Des bornes de charge très rapides sont à l'étude, mais les infrastructures de charge et les câbles associés

deviennent très encombrants et, en ce qui concerne les câbles, peu pratiques à manipuler car très lourds.

La multiplication des infrastructures dans le domaine public pose également le problème du risque de dégradations dû au vandalisme ou à des utilisateurs peu soigneux. Une solution consiste à développer des équipements de recharge sans contact qui ne nécessitent pas de branchements de la part de l'utilisateur. Ces systèmes peuvent équiper des places de parking et l'utilisateur n'a alors qu'à placer son véhicule en vis-à-vis du plot de recharge. On parle dans cette configuration de recharge statique par induction. Une solution également envisagée pour améliorer l'autonomie et limiter le temps d'immobilisation du véhicule pendant sa phase de recharge consiste à équiper certains tronçons de voies avec des systèmes de recharge dynamique par induction. Alimenter le véhicule en roulant permet de répartir la charge le long du parcours et ainsi de réduire la puissance crête nécessaire à la recharge du véhicule.

## 2. Recharge sans contact des véhicules électriques

### 2.1. Quelques exemples de réalisation [19]

#### 2.1.1. Recharge statique

De nombreuses compagnies dans le monde ont développé leurs propres systèmes de recharge sans contact statiques. Nous citerons par exemple le Waseda Electric Bus au Japon avec une puissance allant de 30 kW à 150 kW pour une distance entre bobines émettrice et réceptrice de 105mm (Figure 1). Dans ce système, le véhicule se recharge à chaque passage dans les arrêts de bus [4]. Citons également des projets de recharge de bus pour des puissances de respectivement 20 kW et 60 kW en Nouvelle Zélande et en Italie [5-6].



Figure 1 : Waseda Electric Bus [4]

La société Bombardier propose également une solution de recharge aux arrêts pour le bus Primove au travers d'un système sans contact. La puissance de charge est de 200 kW [4]. La Figure 2 montre une partie du récepteur (sous le véhicule) qui s'abaisse pour se rapprocher de l'émetteur au sol.



Figure 2 : Secondaire du système Primove développé par Bombardier : a) secondaire pendant le déplacement, b) secondaire abaissé lors de la recharge

En matière de recharge statique d'automobiles, le système The Magne-Charge, développé par la société Delco Electronics filiale de Général Motors, fut l'un des premiers systèmes de recharge inductive statique équipant entre autre le Toyota RAV4. Ce chargeur permet de transférer jusqu'à 6,6 kW [3].

En 2011 la société Qualcomm acquiert HaloIPT, propriété de l'université d'Auckland qui avait développé avec succès des systèmes de recharges inductifs sans contact pour Citroën et avait conclu un accord avec Rolls Royce pour la recharge de la voiture de luxe Phantom. Peu de temps après Qualcomm annonce la commercialisation de systèmes similaires pour le grand public [6].

La société Witricity développe un système de recharge sans contact pour les véhicules électriques visible sur la Figure 3. Le système propose plusieurs puissances de transfert i.e. 3,6 , 7,7 et 11 kW avec un rendement atteignant 94% pour différentes distances bobine émettrice - bobine réceptrice [7].



Figure 3 : Système WPT de Witricity [7]

La société Evatran a aussi développé son système de recharge sans contact (Plugless Power) pour un transfert de 3,3 kW pour une distance entre bobines de 100 mm. Le système est réalisé pour équiper la Tesla model S ainsi que la BMW i3 [8].

#### 2.1.2. Recharge dynamique

Nous appellerons ce type de recharge DWPT pour Dynamic Wireless Power Transfer. Dans ce type de recharge, le véhicule se charge en roulant (figure 4). Cela se fait à partir d'une voie spécialement équipée où sont disposées des bobines qui ne s'activent que lors du passage du véhicule, nous parlerons alors de route électrique. Cette solution offre la possibilité de réduire la capacité des batteries embarquées dans le véhicule, et donc de réduire son poids et son prix.

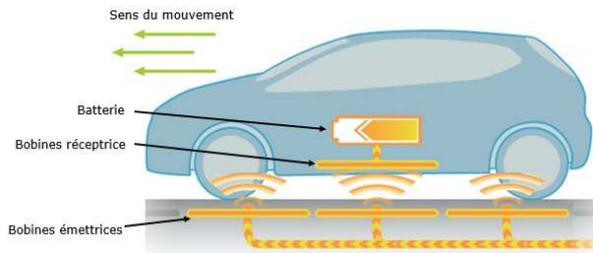


Figure 4 : Recharge par induction dynamique d'un véhicule électrique

Ce type de recharge suscite un certain intérêt et plusieurs programmes sont en cours sur ce sujet dans plusieurs entreprises et universités. Nous citerons quelques exemples ci-dessous :

Le projet (projet serpentine), est réalisé cette fois par l'école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Celui-ci est illustré sur la Figure 6 où nous pouvons voir le prototype consistant en un véhicule « capsule » autonome. Ce projet a démontré la faisabilité d'un système de recharge sans contact avec un rendement de

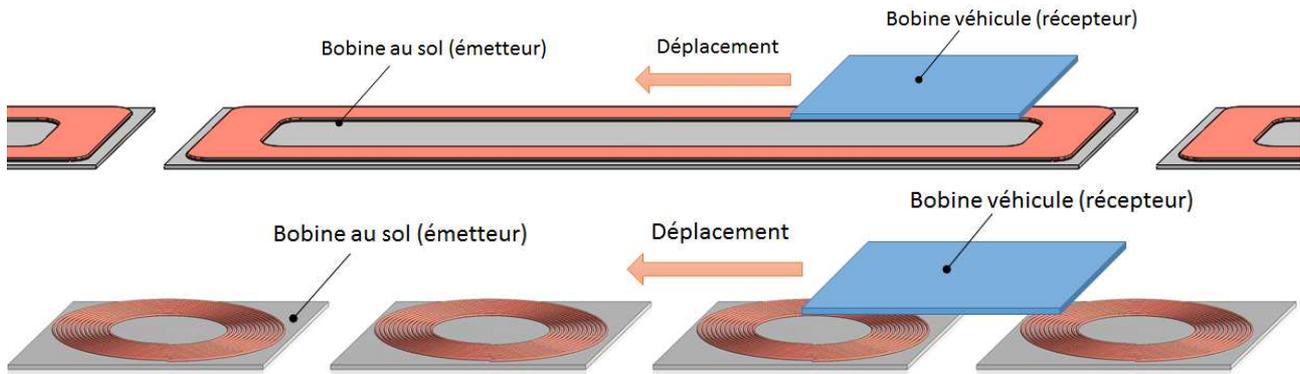


Figure 5 : Différents types de pistes, a) piste à émetteur unique, b) piste à émetteur segmenté

Il existe deux solutions techniques pour la recharge inductive dynamique. La différence provient de la forme des bobines côté de piste. Les pistes peuvent être soit à émetteur segmenté, soit à émetteur unique (Figure 5)

Pour les systèmes à émetteur unique (Figure 5(a)) la bobine réceptrice est de taille réduite par rapport à la bobine émettrice qui est de forme allongée dans la direction de déplacement du véhicule. Ce type de piste permet d'avoir un couplage relativement constant tout au long de l'émetteur. Néanmoins, le rayonnement sur toute la longueur de l'émetteur alimenté pose des problèmes vis-à-vis des risques d'exposition aux champs électromagnétiques et des limites imposées par les normes. De plus, bien que quasi constant, le coefficient de couplage magnétique entre l'émetteur et le récepteur est relativement faible ce qui est problématique en matière d'efficacité énergétique du transfert d'énergie comme nous le verrons plus loin.

Pour les pistes segmentées, il n'y a pas de différence de taille remarquable entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (Figure 5(b)). Ce type de piste nécessite de connaître la position du véhicule en temps réel afin d'alimenter au fur et à mesure les bobines sous le véhicule. Ce système permet de réduire significativement les rayonnements électromagnétiques parasites à proximité de la piste.

Les systèmes DWPT doivent faire face à plusieurs défis dont, en particulier, l'impact du désalignement des bobines. Celui-ci est en effet inévitable du fait du déplacement du véhicule.

l'ordre de 88% [10].



Figure 6 : Projet Serpentine EPFL [11-12]

Le projet californien RPEV pour Roadway Powered Electric Vehicle Project (université de Berkeley) a abouti à la réalisation d'un portion de piste permettant l'alimentation d'un mini bus de 35 personnes avec une puissance de 200 kW, un courant d'alimentation de 2 kA, une fréquence variant entre 180 Hz et 400 Hz et une distance entre bobines émettrice et réceptrice de 7,5 cm [9].

Nissan s'est également intéressé à la recharge dynamique sans contact et, en novembre 2013, un système à taille réelle a été réalisé [13].

Le projet FABRIC est un projet européen qui a eu pour but d'étudier et d'analyser des technologies de recharge inductive destinés aux véhicules électriques. Ce projet s'est déroulé sur 3 sites en Europe (France, Suède et Italie) [14].

En 2010, l'institut des sciences et technologies de Corée (KAIST) a conçu un bus alimenté sans contact avec un rendement de 85 % pour une puissance de 100 kW fonctionnant à une fréquence de 20kHz [15].

L'ensemble des études ont abouti en 2012 à la construction d'une ligne de bus commerciale sur le campus OLEV. Dans ce système, la distance entre bobines émettrice et réceptrice est de 20 cm, la puissance maximale est égale à 240 kW et le rendement peut atteindre 80%. L'infrastructure de transfert d'énergie occupe une longueur de 60 m sur un parcours total de 3,76 km.



Figure 7 : Ligne de bus électrique du campus OLEV

Le constructeur français Renault a développé pour sa part un système de recharge inductif de 2,5 kW pour une distance de 15 cm entre émetteur et récepteur à une fréquence de 85 kHz. Le projet a été réalisé en collaboration avec CentraleSupélec. La Figure 8 montre une photographie du système DWPT développé et alimentant une Renault Twizy [16].



Figure 8 : Système DWPT développé par Renault-Supélec [5]

## 2.2. Normes relatives aux infrastructures de recharge

Les normes existantes sont celles traitant de la recharge statique, elles sont toutefois applicables pour la recharge dynamique.

Elles définissent principalement :

- Le niveau de puissance à transférer
- La distance entre les bobines émettrices et réceptrices
- Les rendements attendus du système sous les différentes conditions
- Les exigences en terme de sécurité
- Les conditions de test

Le classement des niveaux de puissance est défini selon quatre gammes : 3,7 kW, 7,7 kW, 11 kW et 22 kW. Cette norme définit également des classes (notées Z) selon la distance entre bobines émettrice et réceptrice (voir le tableau suivant).

Z class	Distance entre bobines (mm)
Z1	100 – 150
Z2	140 – 210
Z3	170 – 250

La norme indique également que le système de recharge doit garantir un rendement énergétique minimum de 85% pour une configuration correspondant à des bobines parfaitement alignées et un minimum de 80% sur toute la plage de désalignement définie par :

Axe	Tolérance (mm)
X (direction du déplacement de l'automobile)	$\pm 75$
Y (direction perpendiculaire au déplacement)	$\pm 100$

Les fréquences de fonctionnement sont également imposées. Elles doivent répondre aux spécifications suivantes :

Description	Symbole	kHz
Système (pour assurer l'interopérabilité avec tous les dispositifs de recharge)	$f_{sys}$	81,38 – 90
Fréquence nominale	$f_{nom}$	85

Enfin, les normes donnent les valeurs maximales des champs autorisés dans les zones accessibles au public et des courants de contact :

Grandeur	ICNIRP 2010	
	RMS	Crête
Champ magnétique	21,4 A/m ou 27 $\mu$ T	30,4 A/m ou 38,2 $\mu$ T
Champ électrique	83 V/m	117 V/m
Courant de contact	0,2 f[kHz] = 17 mA @ 85kHz	0,283 f[kHz] = 24 mA @ 85kHz

Ces aspects du transfert d'énergie par induction sont fortement contraignants pour les puissances mises en jeu dans les applications liées aux transports et de nombreuses études et activités de recherche concernent ces problématiques.

2.3. Principe physique du transfert d'énergie par induction

2.3.1. Cas d'une spire unique

Les équations de Maxwell permettent, entre autres, de définir les relations liant un courant électrique à un champ magnétique et le champ électrique à la variation d'induction magnétique. Notre propos n'est pas ici de développer les équations de l'électromagnétisme mais de considérer certaines hypothèses simplificatrices permettant de décrire un modèle relativement simple représentatif des interactions magnétiques dans le coupleur d'un système de transfert d'énergie par induction. Pour cela nous avons besoin des notions de flux magnétique et de force contre-électromotrice.

Le flux magnétique dans une surface de l'induction magnétique  $\vec{B}$  est une grandeur scalaire (c'est-à-dire possédant un signe) et pouvant être calculée comme la somme des flux élémentaires dans l'ensemble des petits éléments  $d\vec{S}$  d'une surface  $\vec{S}$ .

$$\varphi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S B \, dS \cos \theta_{(\vec{B}, d\vec{S})}$$

La complexité de manipulation de l'équation provient de la nature vectorielle de l'équation qui fait apparaître le module de l'induction et de l'élément de surface ainsi que l'angle entre les deux vecteurs. Pour simplifier, nous allons nous placer dans le cas d'une induction  $B$  uniforme sur la surface  $S$  (qui est choisie parfaitement plane) et normale (perpendiculaire en tout point) à cette dernière. Sous cette hypothèse, le flux peut être calculé par :

$$\varphi = \pm B S$$

Le signe du flux dépend donc de l'angle relatif des vecteurs  $\vec{B}$  et  $d\vec{S}$ . La notion de vecteur surface doit donc être considérée pour pouvoir lever ce problème de signe. Commençons tout d'abord par la base : le vecteur  $\vec{S}$  est un vecteur perpendiculaire à la surface de module  $S$ . Son sens est défini par une convention caractérisée par le sens de circulation sur le circuit fermé  $\mathcal{C}$  entourant la surface. Selon une règle définie (règle de la main droite), nous pouvons orienter le vecteur surface.

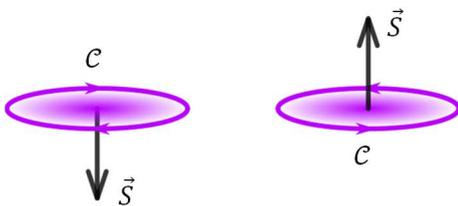


Figure 9 : convention d'orientation des surfaces

Cette complexité du signe du flux peut être largement levée dans le cas du flux propre d'une spire (le flux la traversant et créé par son propre courant) si le physicien éclairé choisi comme orientation de  $\mathcal{C}$  le sens de circulation du courant  $i$ . Dans ce cas, l'induction magnétique  $\vec{B}$  est toujours dans la direction de  $\vec{S}$  et le flux propre est toujours positif. L'équation prend alors la forme (si la spire est notée 1) :

$$\varphi_{1 \rightarrow 1} = B_1 S_1$$

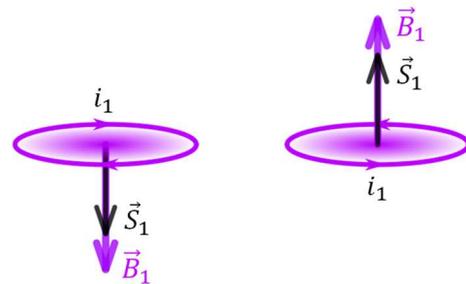


Figure 10 : Convention pour une spire parcourue par un courant

Selon la loi de Lenz-Faraday, il est alors possible de calculer la force contre-électromotrice  $e$  apparaissant aux bornes de la spire (à condition de l'ouvrir en un point). En se plaçant dans une convention récepteur (voir la convention ci-dessous) on obtient l'expression suivante pour  $e$  :

$$e_1 = \frac{d\varphi_{1 \rightarrow 1}}{dt}$$

$$e_1 = \frac{d\varphi_{1 \rightarrow 1}}{dt}$$

Figure 11 : force contre-électromotrice dans une spire

Dans les faits, il est impossible de mesurer uniquement cette force électromotrice « propre » liée à l'auto-induction de la spire sur elle-même car la tension aux bornes de la spire est également composée d'une part liée à la résistance électrique du fil conducteur qui la constitue. La tension aux bornes de la spire en convention récepteur a alors pour expression :

$$v_1 = e_1 + r_1 i_1 = \frac{d\varphi_{1 \rightarrow 1}}{dt} + r_1 i_1$$

2.3.2. Cas d'une bobine

2.3.2.1. Bobine unique

Dans le cas d'une bobine (figure 12) constituée de  $N_1$  spires, la tension totale aux bornes du solénoïde est, tout simplement, la somme des tensions aux bornes de chaque spire. Si toutes les spires sont traversées par le même flux  $\varphi_{1 \rightarrow 1}$ , nous obtenons :

$$v_1 = N_1 e_1 + N_1 r_1 i_1 = N_1 \frac{d\varphi_{1 \rightarrow 1}}{dt} + R_1 i_1$$

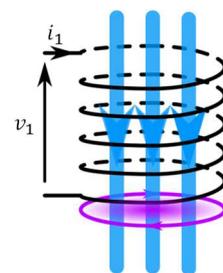


Figure 12 : généralisation à une bobine

### 2.3.2.2. Multiples bobines en interaction magnétique

Lorsque plusieurs bobines sont en interaction magnétique, le flux traversant une bobine est lié à une combinaison des excitations magnétiques générées par chaque bobine. Si les matériaux traversés par les différentes lignes de champ magnétique sont linéaires alors le flux total vu par une bobine est la somme algébrique des flux induits par l'ensemble des bobines en interaction.

Dans le cas de deux bobines l'expression de la tension aux borne de la bobine prend la forme suivante :

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{1 \rightarrow 1}}{dt} + N_1 \frac{d\phi_{2 \rightarrow 1}}{dt} + R_1 i_1$$

où  $\phi_{2 \rightarrow 1}$  représente le flux induit par la bobine 2 sur la bobine 1

Selon l'orientation relative des bobines, ce flux devra être compté positivement ou négativement. Les deux cas de figures sont illustrés ci-dessous (figure 13) :

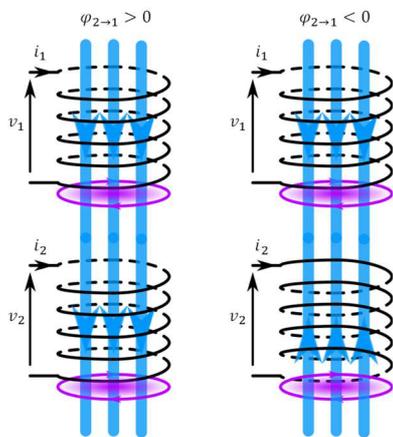


Figure 13 : influence réciproque de plusieurs bobines

### 2.4. Modèle à base de composants

Le modèle électrique associé à une bobine est défini à partir de la relation liant le courant électrique à l'induction magnétique et donc au flux  $\phi$  de cette induction dans la surface  $S$ . Si les matériaux traversés par le champ magnétique ont un comportement linéaire, le flux peut être relié au courant par une loi de proportionnalité faisant apparaître, pour une bobine seule, la notion d'inductance propre.

$$\phi_{1 \rightarrow 1} = \frac{L_1}{N_1} i_1$$

Le comportement d'une bobine peut donc être décrit par l'équation suivante. La bobine se comporte donc comme un circuit R,L :

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi_{1 \rightarrow 1}}{dt} + R_1 i_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

Dans le cas de plusieurs bobines couplées magnétiquement, apparaît la notion de mutuelle inductance notée généralement  $M$ . Pour le cas des deux bobines précédentes, nous définissons la mutuelle inductance de la bobine 2 sur la bobine 1 par :

$$\phi_{2 \rightarrow 1} = \frac{M_{12}}{N_1} i_2$$

*Remarque :* Notez que cette mutuelle inductance peut être positive ou négative selon le sens de couplage des deux bobines.  $M_{12}$  est donc une grandeur algébrique qui dépend de la position relative des deux bobines.

De la même façon, nous pouvons définir la mutuelle inductance de la bobine 1 sur la bobine 2 :

$$\phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{M_{21}}{N_2} i_1$$

*Remarque :* Par des considérations énergétiques, il est possible de démontrer que  $M_{12} = M_{21}$ .

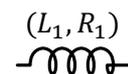
Les équations électriques associées aux deux bobines prennent alors la forme suivante :

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1$$

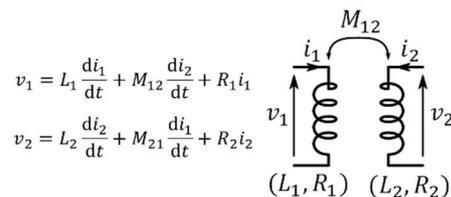
$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + R_2 i_2$$

Les représentations électriques correspondant à ces modèles prennent les formes suivantes :

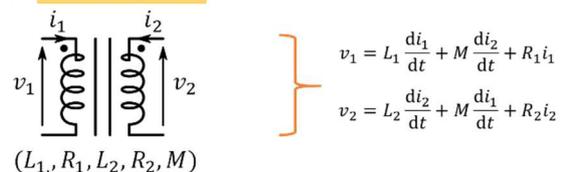
Pour une bobine unique :



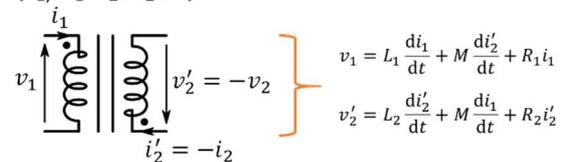
Pour deux bobines couplées :



$$M = M_{12} > 0$$



$$(L_1, R_1, L_2, R_2, M)$$



$$M = -M_{12} > 0$$

Figure 14 : représentation de bobines couplées

Comme vous pouvez le voir (figure 14), il y a deux représentations possibles. L'une fait apparaître la mutuelle comme une grandeur algébrique alors que la seconde définit une mutuelle inductance positive. Pour permettre à l'utilisateur de retrouver le signe correct dans ses équations, la représentation fait apparaître deux « points » sur les deux enroulements. On trouve donc deux configurations possibles selon le signe de la mutuelle inductance.

*Remarque :* Notez que ce principe est utilisé par les logiciels de simulation électrique comme par exemple PSpice ou LTSpice.

La mutuelle inductance est alors caractérisée par une valeur positive dénommée coefficient de couplage définie comme suit :

$$k_{12} = \sqrt{\frac{M}{L_1 L_2}}$$

Le coefficient de couplage est égal à 1 (100%) lorsque les bobines sont parfaitement couplées magnétiquement. Il varie donc de 0% (en absence de couplage magnétique) à 100%. Dans un système de transfert d'énergie par induction, le coefficient de couplage se situe classiquement dans une plage comprise entre 10% et 30%.

2.5. Systèmes de transfert d'énergie électrique par induction

2.5.1. Architecture globale d'un système de transfert d'énergie

Un dispositif de transfert d'énergie par induction est bâti autour de bobines situées dans le sol et dans l'automobile (figure 15). La chaîne de conversion électrique comprend les éléments suivants :

- L'énergie est prélevée sur le réseau alternatif monophasé ou triphasé selon la puissance
- La ou les tensions réseau sont redressées afin de générer une tension continue fixe ou réglable (comme nous le verrons plus loin, selon les stratégies de pilotage de la structure visant à optimiser le rendement énergétique de transfert)
- Cette tension continue est convertie en une tension alternative à une fréquence d'environ 85 kHz
- Cette tension est appliquée à un circuit de compensation (dont nous expliquerons le rôle dans la suite) et à la bobine au sol qui émet un champ électromagnétique à une fréquence d'environ 85 kHz
- La bobine secondaire capte ce champ électromagnétique et le convertit en tension

- Après passage dans un circuit de compensation, la tension est redressée
- Le niveau de cette tension DC est adapté pour permettre de recharger la batterie du véhicule à travers un filtre permettant d'éliminer les ondulations associées au fonctionnement des convertisseurs de la chaîne de conversion

2.5.2. Structure électrique du dispositif de recharge et formes d'onde caractéristiques

Au cœur du système de transfert d'énergie, nous trouvons donc un convertisseur côté sol (un onduleur de tension), le coupleur magnétique (constitué par les deux bobines, l'une située au sol, l'autre dans le véhicule), deux condensateurs de compensation et un second convertisseur dans le véhicule (un redresseur). La structure électronique complète est représentée ci-dessous (**Erreur ! Aucun nom n'a été donné au signet.**figure 16).

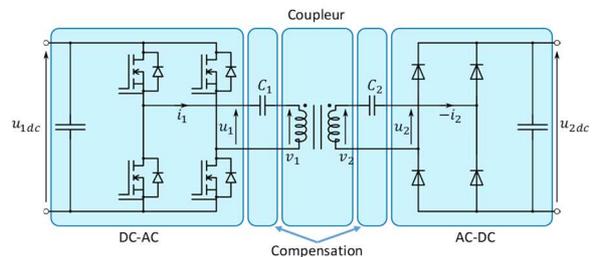


Figure 16 : structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-série

Le système de compensation présenté sur ce schéma correspond à un mode de compensation dénommé série-série. Dans l'ensemble des systèmes de transfert d'énergie par induction nous trouvons différentes familles de compensation dont, en particulier, la structure dite à compensation série-parallèle utilisée dans les dispositifs de recharge inductive de faible puissance (recharge de téléphones portable par exemple). La structure électronique correspondante est la suivante (figure 17) :

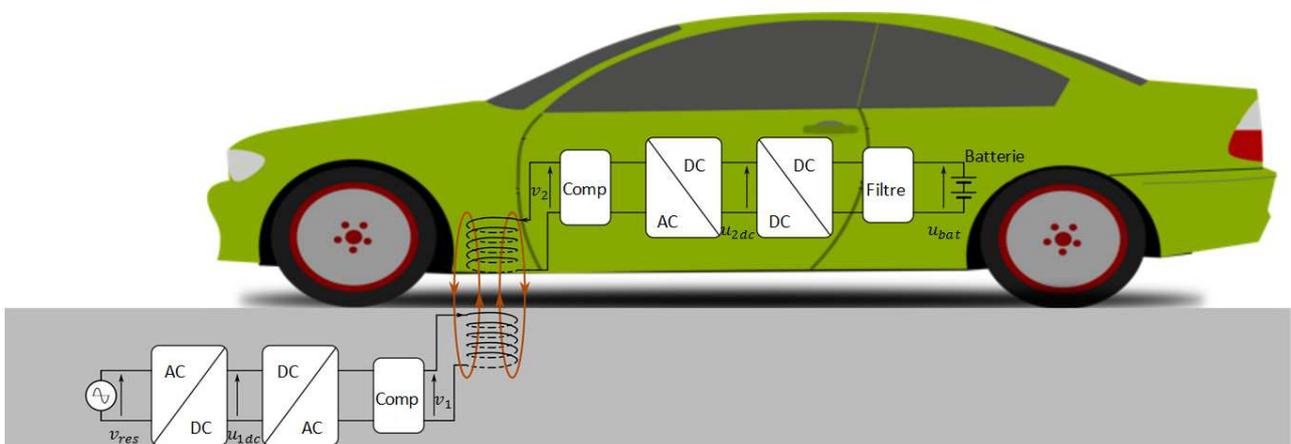


Figure 15 : architecture d'un système de transfert d'énergie par induction

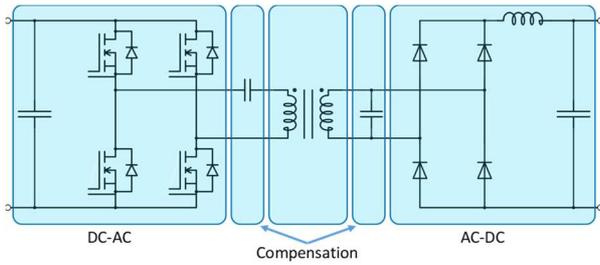


Figure 17 : structure électronique d'un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-parallèle

Nous ne retiendrons dans la suite que la structure à compensation série-série qui est la mieux adaptée à la recharge de véhicules et aux puissances mises en jeu dans le cas de cette application.

Les formes d'onde caractéristiques du fonctionnement de la structure sont donnés ci-dessous :

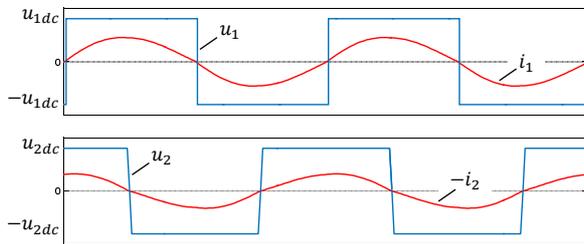


Figure 18 : formes d'ondes caractéristiques

Nous constatons que les courants sont quasi-sinusoïdaux. Ceci est lié au fait que l'onduleur fonctionne, pour une raison que nous justifierons dans la suite, à l'une des fréquences de résonance de l'ensemble coupleur magnétique, capacités de compensation. Le facteur de qualité de ces circuits résonants est très grand conduisant à la quasi élimination des harmoniques de rangs supérieurs à 1 des tensions appliquées à l'ensemble coupleur - capacités de compensation. Cette caractéristique permet d'étudier mathématiquement la structure en ne considérant que le fondamental des tensions et en supposant les courants parfaitement sinusoïdaux.

### 2.5.3. Mise en équations et impédances

En ne considérant que le fondamental des tensions (noté avec un indice (1) dans les équations), nous pouvons réécrire les équations caractéristiques de l'ensemble coupleur capacité de compensation de la façon suivante :

$$\underline{u}_{1(1)} = \left( \frac{1}{jC_1\omega} + jL_1\omega + R_1 \right) \underline{i}_1 + jM\omega \underline{i}_2$$

$$\underline{u}_{2(1)} = \left( \frac{1}{jC_2\omega} + jL_2\omega + R_2 \right) \underline{i}_2 + jM\omega \underline{i}_1$$

où  $\omega$  est la pulsation du fondamental des tensions appliquées notées  $\underline{u}_{1(1)}$  et  $\underline{u}_{2(1)}$  dans l'équation.

*Remarque :* Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  regroupent l'ensemble des résistances des circuits côté émetteur et récepteur. Ceci comprend les résistances séries des

condensateurs de compensation et des composants à semi-conducteur.

Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que l'ensemble redresseur et charge se comporte au sens du premier harmonique comme une résistance équivalente. Le redresseur à diodes impose en effet que le fondamental de la tension  $u_2$  soit toujours en phase avec le courant  $i_2$ . L'amplitude du fondamental de la tension  $u_2$  est donnée par :

$$\hat{u}_{2(1)} = \frac{4 u_{2dc}}{\pi}$$

En définissant la puissance  $P_2$  en entrée du redresseur, nous pouvons définir la valeur de la résistance équivalente de l'ensemble redresseur-charge comme :

$$R_{eq} = \frac{8 u_{2dc}^2}{\pi^2 P_2}$$

Les équations précédentes sont donc complétées par la relation suivante imposée par la charge :

$$\underline{u}_{2(1)} = -R_{eq} \underline{i}_2$$

*Remarque :* Il a été montré dans [17], pour un système de transfert d'énergie par induction à compensation série-série, que les choix des valeurs des capacités suivantes ( $C_1 = \frac{1}{L_1\omega_0^2}$  et  $C_2 = \frac{1}{L_2\omega_0^2}$  avec  $\omega_0$  la pulsation de fonctionnement choisie) conduisent à l'efficacité énergétique maximale indépendamment du coefficient de couplage et de la charge. Nous retiendrons ces valeurs dans la suite.

L'impédance  $\underline{Z}_t$  vue par le convertisseur DC-AC prend la forme suivante :

$$\underline{Z}_t = \left( \frac{1}{jC_1\omega} + jL_1\omega + R_1 \right) + \frac{M^2\omega^2}{\left( \frac{1}{jC_2\omega} + jL_2\omega + R_2 + R_{eq} \right)}$$

En définissant les facteurs de qualités des bobines émettrice et réceptrice :

$$Q_1 = \frac{L_1\omega_0}{R_1} \quad \text{et} \quad Q_2 = \frac{L_2\omega_0}{R_2}$$

Et un coefficient d'adaptation à la charge comme :

$$\gamma = \frac{L_2\omega_0}{R_{eq}}$$

L'impédance  $\underline{Z}_t$  prend la forme :

$$\underline{Z}_t = R_1 \left[ k^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \frac{1 + jQ_1 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) + \frac{Q_1 Q_2}{1 + Q_2/\gamma}}{\left( 1 + j \frac{Q_2}{1 + Q_2/\gamma} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)} \right]$$

La figure suivante montre la forme de l'impédance réduite  $\underline{Z}_t/R_1$  en fonction de  $w = \omega/\omega_0$  pour différentes valeurs de  $\gamma$  et en considérant un facteur de qualité identique pour les deux bobines du coupleur

( $Q_1 = Q_2 = 100$ ) et un coefficient de couplage  $k = 0,3$  (correspondant à la fourchette haute des couplages généralement rencontrés dans les dispositifs de transfert d'énergie par induction).

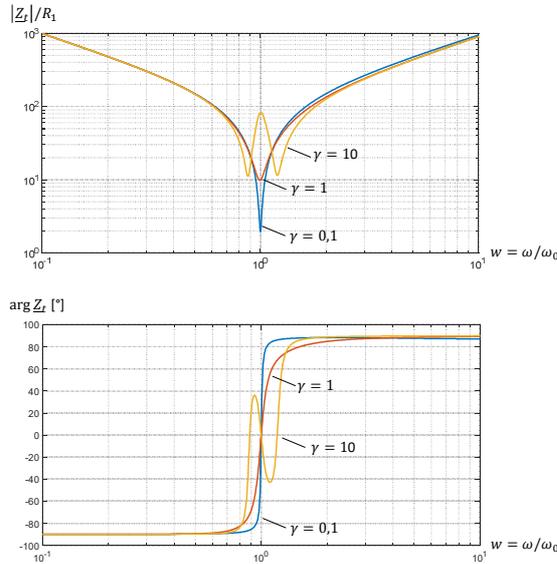


Figure 19 : impédance vue par l'émetteur

**Remarque :** Pour  $\omega = \omega_0$ ,  $\underline{Z}_t$  a une phase nulle quelle que soit  $\gamma$  et donc quelle que soit la charge  $R_{eq}$ . Le courant et la tension fournis par le convertisseur DC-AC sont donc en phase.  $\underline{Z}_t$  vaut alors :

$$\underline{Z}_t = R_1 \left( 1 + k^2 \frac{Q_1 Q_2}{1 + Q_2/\gamma} \right)$$

**Remarque :** Pour certaines valeurs de la charge, il existe plusieurs points à phase nulle pour l'impédance  $\underline{Z}_t$ . Ces points, nommés points de rebroussement, n'apparaissent que pour certaines valeurs de charge  $R_{eq}$ .

Les équations du système de l'ensemble coupleur-capacités de compensation peuvent donc également se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \underline{u}_{1(1)} &= \underline{Z}_t \underline{i}_1 \\ \underline{u}_{2(1)} &= \frac{jM\omega \frac{Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma}}{1 + j \frac{Q_2}{1 + Q_2/\gamma} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \underline{i}_1 \\ \underline{u}_{2(1)} &= \frac{jM\omega \frac{Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma}}{\underline{Z}_t \left( 1 + j \frac{Q_2}{1 + Q_2/\gamma} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)} \underline{u}_{1(1)} \\ \underline{u}_{2(1)} &= -R_{eq} \underline{i}_2 \end{aligned}$$

**Remarque :** Pour  $\omega = \omega_0$ ,  $\underline{Z}_t$  est réelle et  $\left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = 0$ ,  $\underline{u}_{2(1)}$  et  $\underline{u}_{1(1)}$  sont alors en quadrature de phase tout comme  $\underline{i}_2$  et  $\underline{i}_1$

### 2.5.4. Réalisation du coupleur

Comme nous l'avons vu, un coupleur magnétique est constitué par deux bobines. Les bobines émettrices et réceptrices sont distantes l'une de l'autre et l'énergie

électromagnétique doit traverser l'espace entre les deux bobines.

Contrairement à un « transformateur » permettant également le transfert d'énergie et dans lequel un matériau magnétique est utilisé pour canaliser le flux magnétique d'une bobine à l'autre, l'espace entre les deux bobines d'un coupleur est constitué d'air. Le coupleur est donc un « transformateur à air ». La conséquence est que le flux magnétique est mal canalisé d'une bobine à l'autre. Les flux de fuite sont donc très importants et le coefficient de couplage est faible (inférieur à 30% pour des distances usuelles entre bobines dans les applications de recharge de véhicule) alors qu'il est supérieur à 99% dans un transformateur.

Pour limiter les fuites magnétiques vers l'arrière du coupleur et ainsi améliorer le coefficient de couplage, il est d'usage d'associer les bobines des coupleurs à des plaques magnétiques constituées d'un matériau magnétique haute fréquence de la famille des ferrites.

#### 2.5.4.1. Insertion d'un matériau magnétique

Nous allons voir dans cette partie l'effet de l'insertion d'un matériau magnétique à l'arrière des bobines d'un coupleur.

Commençons tout d'abord par observer la forme des lignes de champs pour une bobine « galette » en absence de matériau. Nous constatons du fait de la symétrie que les lignes de champ ont la même forme au-dessus et au-dessous de la bobine.

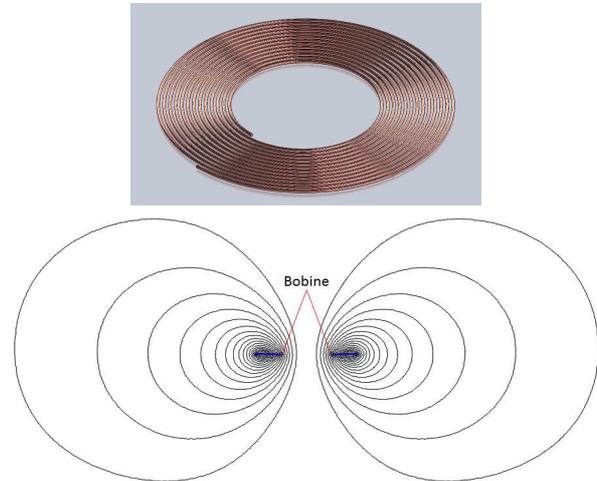


Figure 20 : ligne de champ générées par une bobine circulaire

Considérons maintenant le cas où la bobine est placée sur un matériau de dimensions infinies et de perméabilité magnétique infinie. Nous constatons que les lignes de champ sont désormais confinées au-dessus de la bobine. La théorie des images magnétiques nous permet également de montrer (nous ne ferons pas la démonstration ici) que l'inductance de cette bobine planar est doublée.

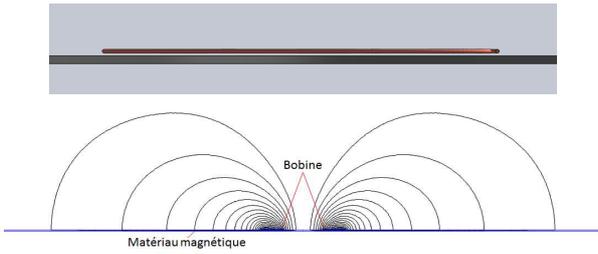


Figure 21 : cas de la bobine placée sur un circuit magnétique de dimension infinie

En matière de couplage, si nous plaçons deux bobines en vis-à-vis à une distance que nous choisirons de façon arbitraire égale au quart du diamètre extérieur de la bobine, nous obtenons un coefficient de couplage  $k = 29,1\%$  pour des bobines sans matériaux magnétique et  $k = 55,3\%$  pour des bobines montées sur plaques magnétiques.

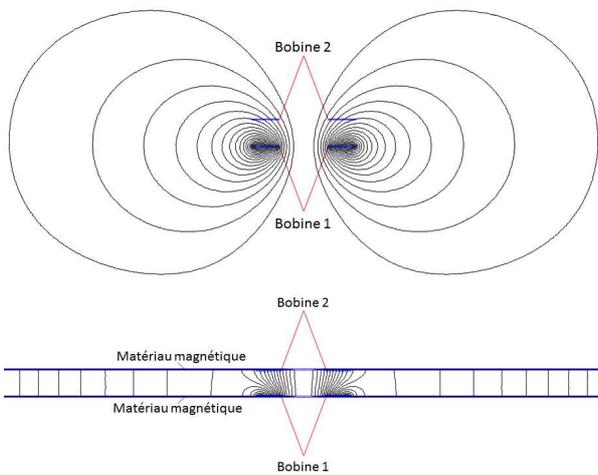


Figure 22 : impact de la présence de matériaux magnétiques sur le couplage de deux bobines

Maintenant, considérons un cas technologiquement réaliste pour lequel les plaques ne sont pas de dimensions infinies et leurs perméabilités magnétiques sont également limitées. Par calcul numérique et pour la configuration considérée ( $\mu_r = 1000$  et circuit magnétique débordant de 7% des dimensions extérieurs de la bobine), nous obtenons un coefficient de couplage de  $k = 40,2\%$ . Les effets de bords ont donc un impact significatif sur le couplage. Ajoutons à cela que des lignes de champ apparaissent à nouveau dans les espaces au-dessus et au-dessous des bobines émettrices et réceptrices provoquant des risques d'irradiation dans des espaces où peuvent être présents des matériels ou des personnes.

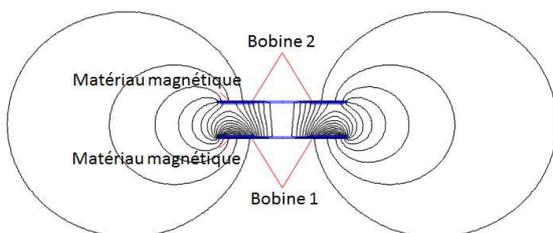


Figure 23 : cas de matériaux magnétiques de dimensions finies

Ce problème de rayonnement parasite est un phénomène nécessitant un traitement particulier pour limiter les niveaux d'exposition aux champs à des valeurs définies par les normes. Nous ne traiterons pas de cette problématique ici.

### 2.5.4.2. Choix de la géométrie

Plusieurs géométries de coupleur ont été proposées pour réaliser les coupleurs destinés à la recharge inductive. Parmi les géométries possibles, citons les formes a) rectangulaire, b) Double D c) Bipolaire, et d) Circulaire.

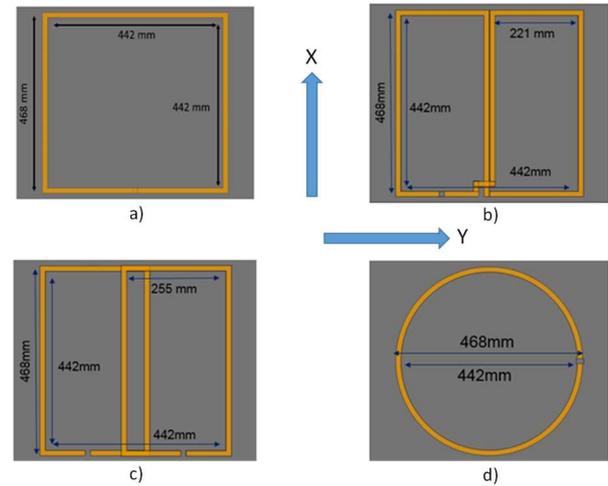


Figure 24 : différentes formes d'émetteurs et de récepteurs a) Rectangulaire (Rec), b) Double D (DD), c) Bipolaire (BP), d) Circulaire (Circ)

Le choix de la géométrie du coupleur dépend de la configuration de recharge considérée et en particulier des éventuels désalignements des bobines émettrices et réceptrices. Ainsi, pour permettre une comparaison, les coefficients de couplage sont donnés à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en fonction des désaxements en X et Y pour les différentes géométries.

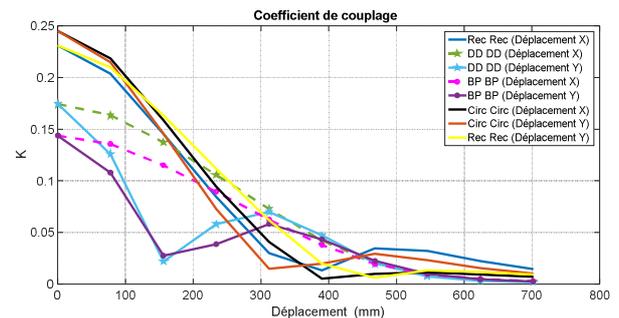


Figure 25 : coefficient de couplage en fonction du désalignement pour différentes formes de coupleurs magnétiques. La forme est identique côté émetteur et récepteur

Nous constatons que les bobines de forme circulaire et rectangulaire correspondent au meilleur compromis alliant fort coefficient de couplage à un comportement en fonction du désaxement satisfaisant.

### 2.5.5. Facteur de dimensionnement de l'électronique de puissance et pertes dans les convertisseurs

Le facteur de dimensionnement d'un convertisseur est une donnée fondamentale permettant de définir le calibre maximal des composants à semi-conducteur à mettre en œuvre pour convertir un niveau de puissance défini. Nous le définirons comme le rapport de puissance apparente commutée par l'interrupteur ( $S_{interrupteur}$ ) à la puissance convertie :

$$Fd = \frac{S_{interrupteur}}{P_{convertie}} = \frac{\hat{u}_{interrupteur} \times \hat{i}_{interrupteur}}{P_{convertie}}$$

Pour le convertisseur DC-AC de notre système de transfert d'énergie, ce facteur de dimensionnement se met sous la forme :

$$Fd = \frac{u_{1dc} \times \hat{i}_1}{\frac{\hat{u}_{1(1)}}{\sqrt{2}} \times \frac{\hat{i}_1}{\sqrt{2}} \times \cos \varphi_1}$$

$$Fd = \frac{u_{1dc} \times \hat{i}_1}{\frac{4}{\pi\sqrt{2}} u_{1dc} \times \frac{\hat{i}_1}{\sqrt{2}} \times \cos \varphi_1}$$

$$Fd = \frac{2}{\pi \cos \varphi_1}$$

où  $\hat{i}_1$  et  $\hat{u}_{1(1)}$  sont respectivement l'amplitude du courant sinusoïdal et l'amplitude du fondamental de la tension en sortie du convertisseur ;  $\varphi_1$  représente le déphasage entre ces deux grandeurs sinusoïdales.

Pour une puissance convertie définie, il faut réduire le facteur de dimensionnement pour réduire le calibre des composants à semi-conducteur à mettre en œuvre dans le système. Il est clair, ici que le minimum de  $Fd$  est atteint lorsque  $\cos \varphi_1 = 1$  et donc lorsque les tension et courant fournis par le convertisseur DC-AC sont en phase (ce qui est le cas si nous fonctionnons en particulier à  $\omega = \omega_0$ ).

Un autre intérêt de fonctionner avec un déphasage  $\varphi_1 = 0$  réside dans la quasi annulation des pertes par commutation des interrupteurs.

Ces pertes apparaissent lors des commutations à l'amorçage et au blocage du fait du croisement des tensions commutées pendant ces phases de fonctionnement très courtes (quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes selon la technologie des composants de puissance employée).

Les énergies perdues par commutation notées  $E_{on}$  et  $E_{off}$  sont des fonctions de la tension et du courant commutés mais également de la température de la puce. La puissance dissipée lors des commutations peut alors s'exprimer comme :

$$P_{commutation} = (E_{on} + E_{off}) \times f$$

avec  $f$  la fréquence de découpage du convertisseur DC-AC.

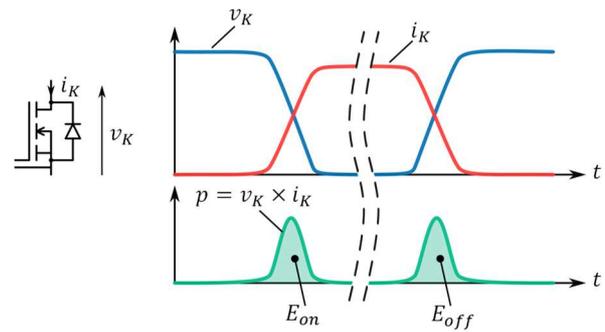


Figure 26 : illustration des pertes à la commutation d'un interrupteur à semi-conducteur

Dans l'application visée, les puissances mises en jeu dans le transfert peuvent atteindre plusieurs dizaines de kW, les courants et tensions circulant dans le convertisseur sont donc importants et la fréquence de fonctionnement est élevée ( $f_{nom} = 85$  kHz). Les pertes par commutation peuvent donc très rapidement devenir prohibitives.

Dans le mode de fonctionnement particulier  $\varphi_1 = 0$ , le courant commuté est nul, les pertes par commutation sont donc considérablement réduites. Les pertes totales dans les composants à semi-conducteur sont alors essentiellement dues aux pertes par conduction et à celles dans les commandes des composants.

**Remarque :** Dans un système de recharge par induction fonctionnant à  $\varphi_1 = 0$ , les pertes sont majoritairement liées aux pertes dans le coupleur magnétique et les capacités de compensation (2/3 des pertes environ). Il s'agit donc d'optimiser le système sur ce point.

### 2.5.6. Efficacité énergétique du transfert d'énergie

Pour les raisons évoquées précédemment, nous nous plaçons dans le mode de fonctionnement  $\varphi_1 = 0$  et en particulier à  $\omega = \omega_0$ .

La puissance fournie à la charge est définie par :

$$P_2 = R_{eq} I_{2eff}^2$$

À  $\omega = \omega_0$  les courants sont liés par la relation suivante :

$$R_{eq} I_{2eff} = M \omega_0 \frac{Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma} I_{1eff}$$

Qui peut également se mettre sous la forme :

$$I_{2eff} = I_{1eff} k \gamma \sqrt{\frac{L_1}{L_2} \frac{Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma}}$$

La puissance dissipée dans la bobine côté émetteur est égale à :

$$P_{1pertes} = R_1 I_{1eff}^2 = R_1 \frac{1}{k^2 \gamma^2} \frac{L_2}{L_1} \left( \frac{1 + Q_2/\gamma}{Q_2/\gamma} \right)^2 I_{2eff}^2$$

La puissance dissipée dans la bobine côté récepteur est égale à :

$$P_{2pertes} = R_2 I_{2eff}^2$$

Le rapport des pertes totales à la puissance transmise est donc égal à :

$$\lambda = \frac{R_2}{R_{eq}} + \frac{R}{R_{eq}} \frac{1}{k^2 \gamma^2} \frac{L_2}{L_1} \left( \frac{1 + Q_2/\gamma}{Q_2/\gamma} \right)^2$$

$$\lambda = \frac{\gamma}{Q_2} + \frac{1}{k^2 Q_1 \gamma} \left( \frac{1 + Q_2/\gamma}{Q_2/\gamma} \right)^2$$

Le rendement énergétique est donné par :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{1pertes} + P_{2pertes}} = \frac{1}{1 + \lambda}$$

Il faut donc minimiser  $\lambda$  pour maximiser le rendement de transfert. La valeur optimale de  $\gamma$  est donc :

$$\gamma_{opt} = \frac{Q_2}{\sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}}$$

Si le système est bien dimensionné (nous verrons plus loin ce que cela signifie), nous avons  $k\sqrt{Q_1 Q_2} \gg 1$ . Et donc :

$$\gamma_{opt} \approx \frac{1}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$$

Si les bobines primaire émettrices et réceptrices sont identiques ( $Q_1 = Q_2$ ),  $\gamma_{opt} = 1/k$ . Dans ce cas, le rendement maximal est donné par :

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \lambda_{opt}} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}}$$

Il est donc clair que l'augmentation du rendement énergétique du transfert d'énergie dépend du produit  $k\sqrt{Q_1 Q_2}$  qu'il faudra donc rendre le plus élevé possible. Ainsi, on définit le **facteur de mérite** d'un dispositif de transfert d'énergie par induction par :

$$FOM = k\sqrt{Q_1 Q_2}$$

Pour cette raison, on recherchera des bobines à fort coefficient de qualité (forte inductance et faible résistance série) et des coefficients de couplage les plus élevés possibles.

**Remarque :** pour limiter la résistance des bobinages à la fréquence de fonctionnement, on utilise du fil de Litz pour les conducteurs des bobines.

**Remarque :** pour maximiser le rendement énergétique au point de fonctionnement nominal, il est judicieux de dimensionner le système de façon à ce que le point de fonctionnement optimal soit atteint pour ce régime de fonctionnement. Il s'agit donc d'adapter les éléments du coupleur de manière à ce que  $\gamma = \gamma_{opt}$  et donc  $L_2 \omega_0 = \gamma_{opt} R_{eq}$ .

**Remarque :** la norme impose un rendement énergétique minimum de l'ordre de 80%, ce qui implique un **coefficient de couplage minimum** de l'ordre de 10% pour des facteurs de qualité des bobines de l'ordre d'une centaine.

### 2.5.7. Contrôle du transfert d'énergie

Partant des équations définies précédemment, nous pouvons définir le gain en tension de la structure :

$$\underline{u}_{2(1)} = jk\sqrt{L_2/L_1} \frac{Q_1 \frac{\omega}{\omega_0} \frac{Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma}}{\frac{Z_t}{R_1} \left( 1 + j \frac{Q_2}{1 + Q_2/\gamma} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right)} \underline{u}_{1(1)}$$

La figure suivante montre la forme du gain en tension  $\underline{u}_{2(1)}/(\sqrt{L_2/L_1} \underline{u}_{1(1)})$  en fonction de  $u = \omega/\omega_0$  pour différentes valeurs de  $\gamma$  et en considérant toujours un facteur de qualité identique pour les deux bobines du coupleur ( $Q_1 = Q_2 = 100$ ) et un coefficient de couplage  $k = 0,3$ .

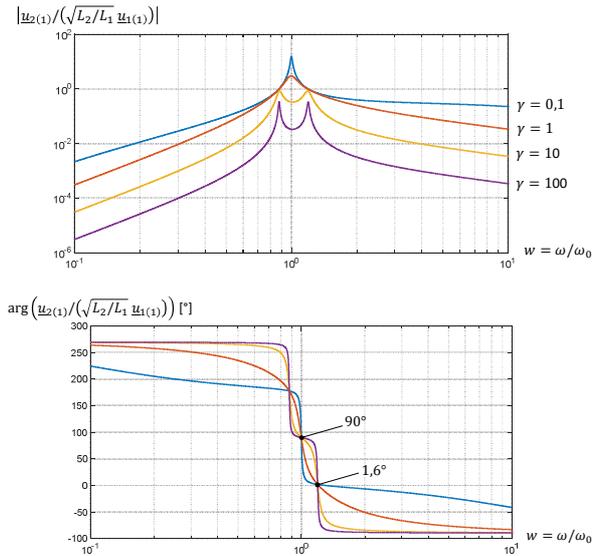


Figure 27 : caractéristiques de transfert en tension en fonction de la pulsation

Trois points de fonctionnement peuvent intéresser le concepteur. L'un de ces points est celui majoritairement employé dans les dispositifs de transfert d'énergie par induction. Il s'agit du point correspondant à la fréquence de résonance principale du système ( $\omega = \omega_0$  soit  $w = 1$  sur les graphiques) pour lequel les tensions primaires et secondaires sont en **quadrature** de phase et en phase avec leurs courants respectifs  $i_1$  et  $i_2$ .

Les deux autres points correspondent également à des points de fonctionnement pour lesquels les tensions  $u_{1(1)}$  et  $u_{2(1)}$  peuvent, dans certaines conditions, être en phase avec respectivement  $i_1$  et  $i_2$ . Ces points correspondent aux points de rebroussement de l'impédance  $Z_t$  vus précédemment. Nous constatons que le déphasage entre les tensions peut alors être beaucoup plus faible. Notons toutefois que ces points de fonctionnement n'existent qu'à partir de certaines valeurs de  $\gamma$  et donc de  $R_{eq}$ . Ces points de fonctionnement sont utilisés dans [16] et [20] pour développer une méthode de transfert d'énergie par induction nommée « recopie de tension ». Nous ne développerons pas cette méthode dans cet article.

2.5.7.1. Fonctionnement à  $\omega = \omega_0$ 

Le diagramme de Fresnel pour ce mode de fonctionnement est donné ci-dessous :

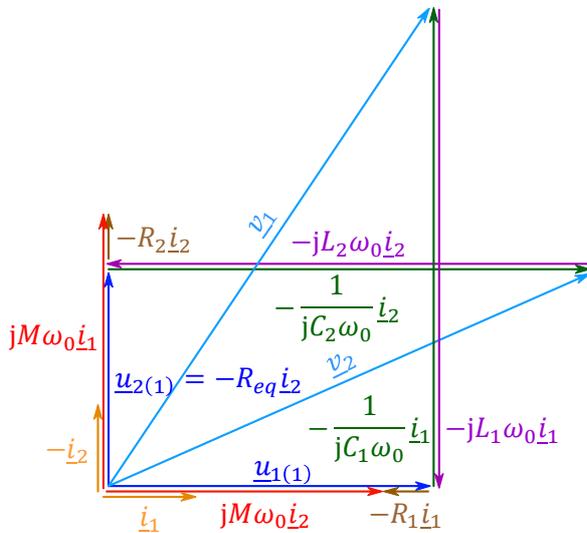


Figure 28 : diagramme de Fresnel des grandeurs à la fréquence de résonance

Nous retrouvons ici que les tensions et courants dans l'ensemble bobines-condensateurs de compensation côté émetteur ( $u_{1(1)}$ ,  $i_1$ ) et récepteur ( $u_{2(1)}$ ,  $-i_2$ ) sont respectivement en phase et que ces tensions sont en quadrature de phase.

Nous constatons également que les tensions aux bornes du coupleur magnétique ( $v_1$ ,  $v_2$ ) et des capacités de compensation sont bien plus importantes que les tensions en entrée et en sortie du système ( $u_{1(1)}$ ,  $u_{2(1)}$ ). Les tensions aux bornes des capacités de compensation peuvent, en effet, être approchées par les expressions suivantes :

$$\hat{v}_{c_2} \approx \frac{1}{k} \hat{u}_{1(1)} \sqrt{L_2/L_1}$$

$$\hat{v}_{c_1} \approx \frac{1}{k} \hat{u}_{2(1)} \sqrt{L_1/L_2}$$

Le facteur de multiplication des tensions est donc inversement proportionnel au coefficient de couplage (de 10% à 30%). Le facteur de surtension est donc très important. Il est d'ailleurs encore plus important pour les tensions aux bornes des bobines du coupleur magnétique.

A la pulsation de résonance  $\omega = \omega_0$ , le module du gain en tension est donné par :

$$\underline{u}_{2(1)} = \frac{jkQ_1Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2} \sqrt{L_2/L_1} \underline{u}_{1(1)}$$

Pour obtenir une efficacité énergétique maximale, il faut, comme nous l'avons vu précédemment, que

$$\gamma = \gamma_{opt} = Q_2/\sqrt{1 + k^2Q_1Q_2}$$

Ce qui nous donne :

$$\underline{u}_{2(1)} = j \frac{jkQ_1\sqrt{1 + k^2Q_1Q_2}}{1 + \sqrt{1 + k^2Q_1Q_2} + k^2Q_1Q_2} \sqrt{L_2/L_1} \underline{u}_{1(1)}$$

Pour  $k^2Q_1Q_2 \gg 1$

$$\underline{u}_{2(1)} \approx j\sqrt{Q_1/Q_2}\sqrt{L_2/L_1} \underline{u}_{1(1)}$$

Ceci signifie (si  $Q_1 = Q_2$ ) que le ratio des valeurs efficaces des tensions au niveau du récepteur et de l'émetteur doit être égal à la racine carrée de l'inductance secondaire sur l'inductance primaire et ainsi, pour la même géométrie des bobines côté émetteur et récepteur, au rapport des nombres de spires secondaire sur primaire. Nous retrouvons ici une caractéristique classique d'un transformateur, hormis le fait que les tensions soient en quadrature de phase.

Le contrôle optimal au sens de l'efficacité énergétique d'un système de transfert d'énergie par induction consiste à maintenir la tension secondaire à la valeur définie par l'équation précédente. C'est le rôle du convertisseur DC-DC placé côté récepteur.

Toutefois, il peut être nécessaire de régler la puissance transférée, en particulier dans le cas d'une charge de batterie. La puissance pour  $\omega = \omega_0$  a pour expression :

$$P_2 = \frac{Q_1}{\gamma} \cdot \frac{k^2Q_1Q_2}{(1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2)^2} \cdot \frac{\hat{u}_{1(1)}^2}{2R_1}$$

Notons que la puissance présente un maximum pour :

$$\gamma_{maxi} = \frac{Q_2}{Q_1Q_2k^2 + 1}$$

Elle est égale en ce point à :

$$P_{2maxi} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{k^2Q_1Q_2}{1 + k^2Q_1Q_2} \cdot \frac{\hat{u}_{1(1)}^2}{8R_1}$$

Pour bien comprendre les stratégies à mettre en œuvre pour contrôler le transfert d'énergie, il est intéressant de se référer aux caractéristiques de plusieurs grandeurs du système. Les grandeurs d'intérêt sont les puissances d'entrée et de sortie ( $P_1$ ,  $P_2$ ), le rendement énergétique de conversion  $\eta$  et les tension et courant côté récepteur ( $\hat{u}_{2(1)}$ ,  $i_2$ ). L'ensemble de ces caractéristiques pour  $\omega = \omega_0$  sont regroupées ci-dessous. Elles sont représentées en fonction de  $\gamma$  en considérant toujours un facteur de qualité identique pour les deux bobines du coupleur ( $Q_1 = Q_2 = 100$ ) et pour des coefficients de couplage  $k = \{0,02, 0,1, 0,2, 0,3\}$ .

Les expressions de ces différentes grandeurs sont :

$$P_1 = \frac{1 + Q_2/\gamma}{1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2} \cdot \frac{\hat{u}_{1(1)}^2}{2R_1}$$

$$\hat{u}_{2(1)} = \frac{1}{\gamma k} \cdot \frac{k^2Q_1Q_2}{1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2} \cdot \sqrt{L_2/L_1} \hat{u}_{1(1)}$$

$$i_2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{k^2Q_1Q_2}{1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2} \cdot \frac{\hat{u}_{1(1)}}{\sqrt{L_1L_2}\omega_0}$$

$$\eta = \frac{Q_1}{\gamma + Q_2} \cdot \frac{k^2Q_1Q_2}{1 + Q_2/\gamma + k^2Q_1Q_2}$$

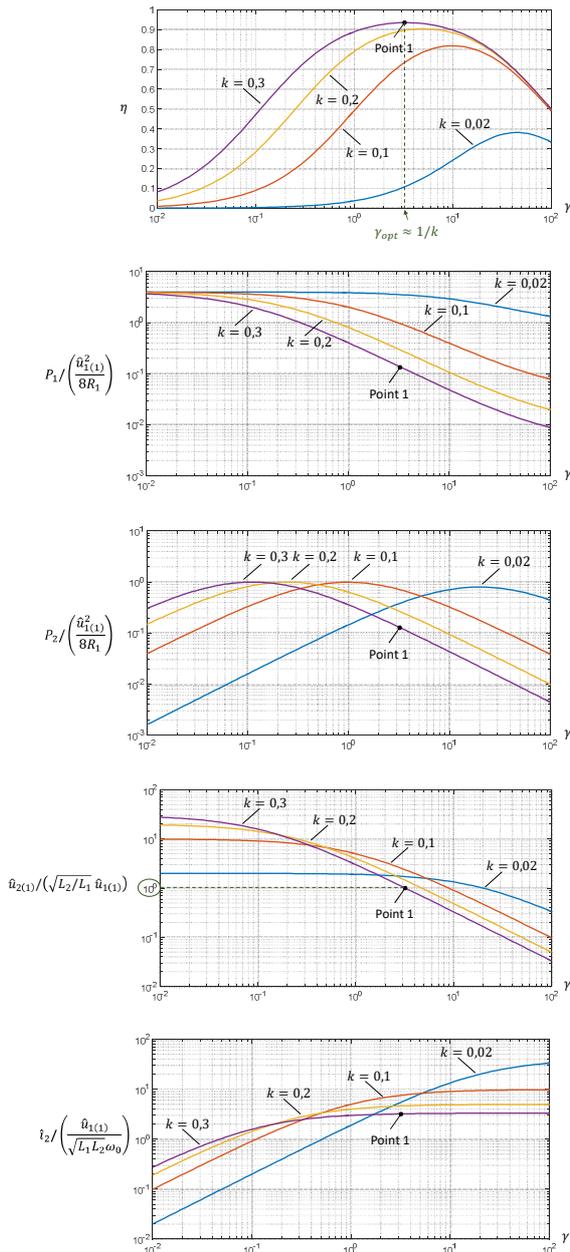


Figure 29 : caractéristiques principales d'un système de transfert d'énergie par induction à la fréquence de résonance

Nous constatons que le rendement énergétique se dégrade quand le couplage diminue. Notons également que le maximum d'efficacité énergétique est bien atteint, comme calculé précédemment, pour  $\gamma_{opt} \approx 1/k$  (car  $Q_1 = Q_2$ ). Ce maximum se déplace vers les  $\gamma$  plus élevés quand le couplage  $k$  diminue.

Pour le dimensionnement du système de transfert d'énergie, il est souhaitable de se mettre à l'optimum d'efficacité pour le couplage le plus élevé (voir *point 1* sur les courbes). On peut alors noter que l'amplitude de la tension secondaire  $\hat{u}_{2(1)}$  est égale à  $\sqrt{L_2/L_1} \hat{u}_{1(1)}$ . De plus, dans cette zone à rendement maximum, il est notable que le système se comporte comme une source de courant  $i_2$  sinusoïdale dont l'amplitude est pilotée par la tension primaire  $\hat{u}_{1(1)}$  et donc par  $u_{1dc}$  ( $\gamma$  et donc  $R_{eq}$

variant autour de leurs valeurs optimales). Nous voyons également que l'amplitude de ce courant augmente quand le couplage diminue.

La démarche pour positionner le *point 1* est la suivante :

- Partant de la puissance nominale  $P_{2nom}$  côté récepteur et de la tension nominale souhaitée  $u_{2dcnom}$ , la résistance équivalente nominale  $R_{eqnom}$

$$R_{eqnom} = \frac{8 u_{2dcnom}^2}{\pi^2 P_{2nom}}$$

- Les inductances côté récepteur et émetteur sont calculées (elles permettront de définir le nombre de spires des deux bobines)

$$\gamma = \frac{L_2 \omega_0}{R_{eq}} \Rightarrow L_2 = \frac{R_{eqnom} \gamma_{opt}}{\omega_0} \approx \frac{R_{eqnom}}{\omega_0 k_{nom}}$$

$$\hat{u}_{2(1)} = \sqrt{L_2/L_1} \hat{u}_{1(1)} \Rightarrow L_1 = L_2 \frac{u_{1dcnom}^2}{u_{2dcnom}^2}$$

À titre d'illustration de l'utilisation des caractéristiques précédentes nous allons étudier deux stratégies de commande. Nous allons voir successivement :

- Le réglage de la puissance  $P_2$  à coefficient de couplage fixé  $k = cte$
- Le maintien de la puissance  $P_2$  à couplage variable.

#### 2.5.7.2. Réglage de la puissance $P_2$ à coefficient de couplage fixé

Pour varier la puissance  $P_2$  à coefficient de couplage fixé, il existe deux possibilités :

- La première est la plus évidente, il s'agit de faire varier la tension d'entrée  $u_{1dc}$  et la tension de sortie  $u_{2dc}$  d'un même facteur. Remarquons que cette stratégie nécessite un convertisseur AC-DC réglable côté émetteur en plus du convertisseur DC-DC côté récepteur ainsi qu'un moyen de communication entre l'émetteur et le récepteur. L'avantage de cette méthode est de maintenir  $\gamma$  à sa valeur optimale. Le nouveau point de fonctionnement reste confondu avec le *point 1*.
- La seconde consiste à ne changer que la tension côté récepteur ( $u_{2dc}$  et donc  $\hat{u}_{2(1)}$ ). Cette variation de tension provoque un changement de la valeur de  $\gamma$  qui se déplace sur une des caractéristiques à  $k$  fixé. La figure 30 montre un exemple de nouveau point de fonctionnement (*Point 2*) sur la courbe  $k = k_{nom}$ . Ce nouveau point de fonctionnement correspond à un rapport  $\hat{u}_{2(1)} / (\sqrt{L_2/L_1} \hat{u}_{1(1)})$  passant de 1 à 0,4. Comme  $\gamma$  est modifié, les puissances  $P_1$  et  $P_2$  diminuent. Nous remarquons toutefois que le rendement énergétique de transfert diminue également ce qui est un inconvénient notable. Un avantage de cette seconde méthode est par contre de ne pas requérir un convertisseur AC-DC réglable côté émetteur.

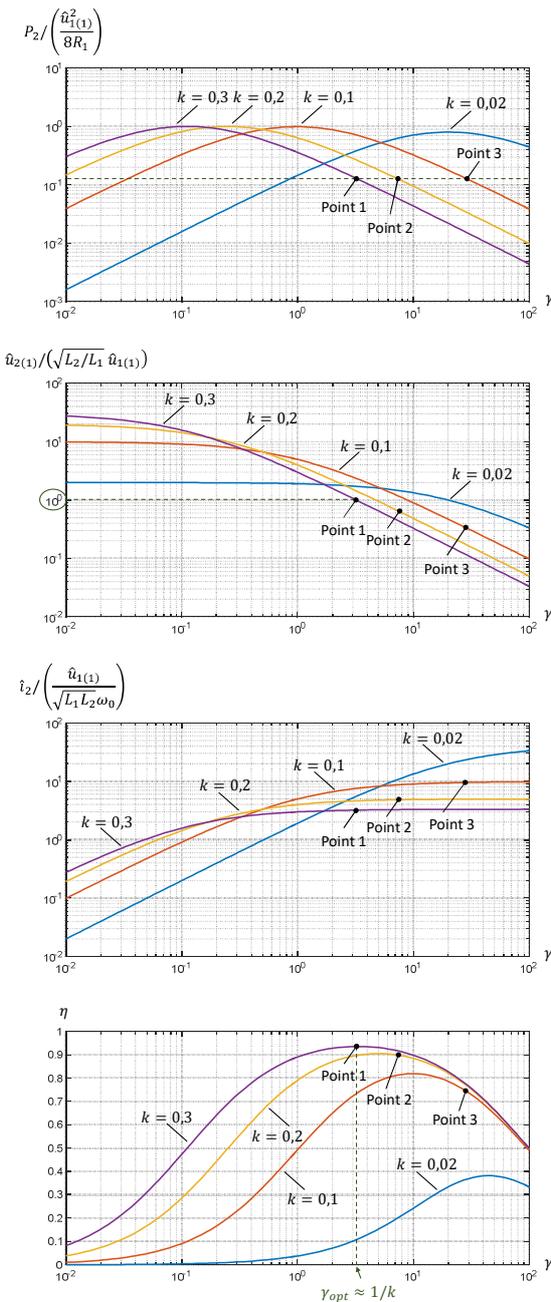


Figure 30 : maintien de la puissance à couplage variable pour une tension côté émetteur constante

- L'autre solution consiste à maintenir les différents points de fonctionnement à l'optimum de l'efficacité énergétique quel que soit le coefficient de couplage. Nous constatons dans cette configuration qu'il y a augmentation de la valeur  $P_2 / \left( \frac{\hat{u}_{1(1)}^2}{8R_1} \right)$ . Maintenir  $P_2$  constant implique de faire croître  $\hat{u}_{1(1)}$  et donc  $u_{1dc}$ . Le problème de cette solution réside dans les surtensions qu'elle génère aux bornes des capacités de compensation et des bobines. Sa mise en œuvre nécessite, là encore, un convertisseur DC-DC côté émetteur et une communication entre émetteur et récepteur. Notons également que malgré une baisse réduite de l'efficacité énergétique, celle-ci existe néanmoins.

Il faut donc là encore arrêter le transfert d'énergie pour les faibles valeurs de couplage.

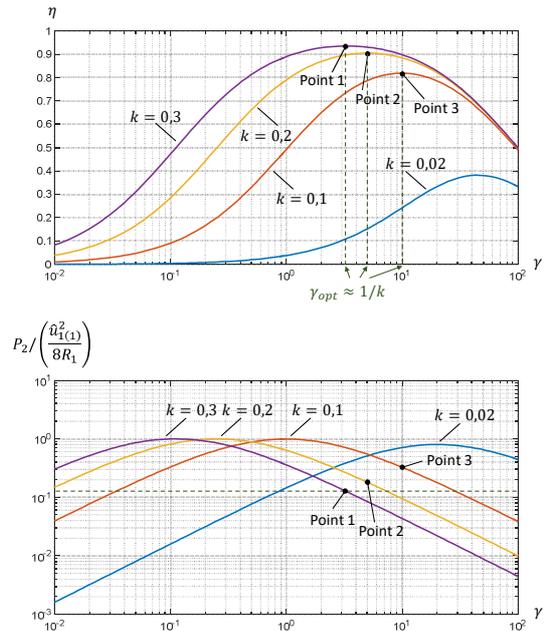


Figure 31 : maintien de la puissance à couplage variable à efficacité énergétique maximale

### 3. Bilan et conclusion

Le transfert d'énergie par induction électromagnétique est une idée ancienne déjà imaginée par Tesla en 1899 [18]. Si les principes sont connus depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, sa mise en œuvre ne va pas sans poser de nombreux problèmes.

Les progrès réalisés à partir des années 1980 en électronique de puissance ont permis de relancer ces technologies. Depuis quelques dizaines d'années, elles suscitent un regain d'intérêt et sont développées et commercialisées pour réaliser la recharge, par exemple, de téléphones portables ou de brosses à dents électriques. Elles sont également utilisées avec succès dans des équipements médicaux implantables et permettent de recharger des équipements tels que des pacemakers et des cœurs artificiels. Dans ces applications, les puissances mises en jeu sont assez modestes.

Partant de cela, les constructeurs automobiles proposent d'utiliser ce type de système à des puissances bien plus importantes pour recharger les véhicules électriques. L'enjeu réside alors dans la nécessité de réaliser le transfert d'énergie avec un rendement énergétique correct tout en garantissant un niveau de rayonnement limité à proximité du dispositif afin d'assurer la sécurité des personnes situées dans le voisinage. Étudiée depuis une dizaine d'année, la technologie de recharge sans contact de véhicules en est encore à ses débuts et de nombreux travaux académiques et industriels ont été proposés et sont encore en cours sur le sujet.

Cet article donne les bases permettant de comprendre les difficultés associées à cette technologie et propose une démarche permettant de dimensionner un système de transfert d'énergie par induction.

### Références

- [1] <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>
- [2] Règlement (CE) du Parlement européen et du Conseil établissant des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules légers, Avril 2009 : <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-6-2019-INIT/fr/pdf>
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Magne\\_Charge](https://en.wikipedia.org/wiki/Magne_Charge)
- [4] C. T. Rim and Chris Mi, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles*. 2017
- [5] <https://www.waseda.jp/top/en-news/49596>
- [6] A. Brecher and D. Arthur, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications (FTA Report No. 0060)," no. 0060, pp. 1–61, 2014
- [7] [http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE\\_11\\_20171201.pdf](http://witricity.com/wp-content/uploads/2017/12/DRIVE_11_20171201.pdf)
- [8] <https://www.pluglesspower.com/gen2-tech-specs/>
- [9] U. C. Berkeley, "Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction and Testing Program Phase 3D," *Traffic*, 1995
- [10] [http://www.serpentine.ch/p\\_realisations/Realisations.html](http://www.serpentine.ch/p_realisations/Realisations.html)
- [11] C. B. Auvigne, "Electrical and Magnetical Modeling of Inductive Coupled Power Transfer Systems PAR," École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2015
- [12] K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," *World Electr. Veh. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 848–857, 2013
- [13] K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, "Design and evaluation of a wireless power transfer system with road embedded transmitter coils for dynamic charging of electric vehicles," *World Electr. Veh. J.*, vol. 6, no. 4, pp. 848–857, 2013
- [14] <https://www.fabric-project.eu/>
- [15] [https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST\\_OLEV\\_en.pdf](https://olev.kaist.ac.kr/20120323/sub02/KAIST_OLEV_en.pdf)
- [16] A. Caillierez, « Etude et mise en oeuvre du transfert de l'énergie électrique par induction : application à la route électrique pour véhicules en mouvement », Thèse Université Paris-Saclay, 2016
- [17] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar, and I. Stevanović, "The  $\eta$ - $\alpha$ -Pareto front of inductive power transfer coils," in Proc. 38th IECON, 2012, pp. 4270–4277
- [18] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_power\\_transfer](https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer)
- [19] Karim Kadem, « Modélisation et optimisation d'un coupleur magnétique pour la recharge par induction dynamique des véhicules électriques », Thèse Université Paris-Saclay, 2020
- [20] Paul-Antoine Gori, « Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique », Thèse Université Paris-Saclay, 2019

# INTÉGRATION DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE DANS LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

**SYLVIE COURTY**

*Enedis, Directrice Etudes & Développement, Programme Mobilité Electrique*

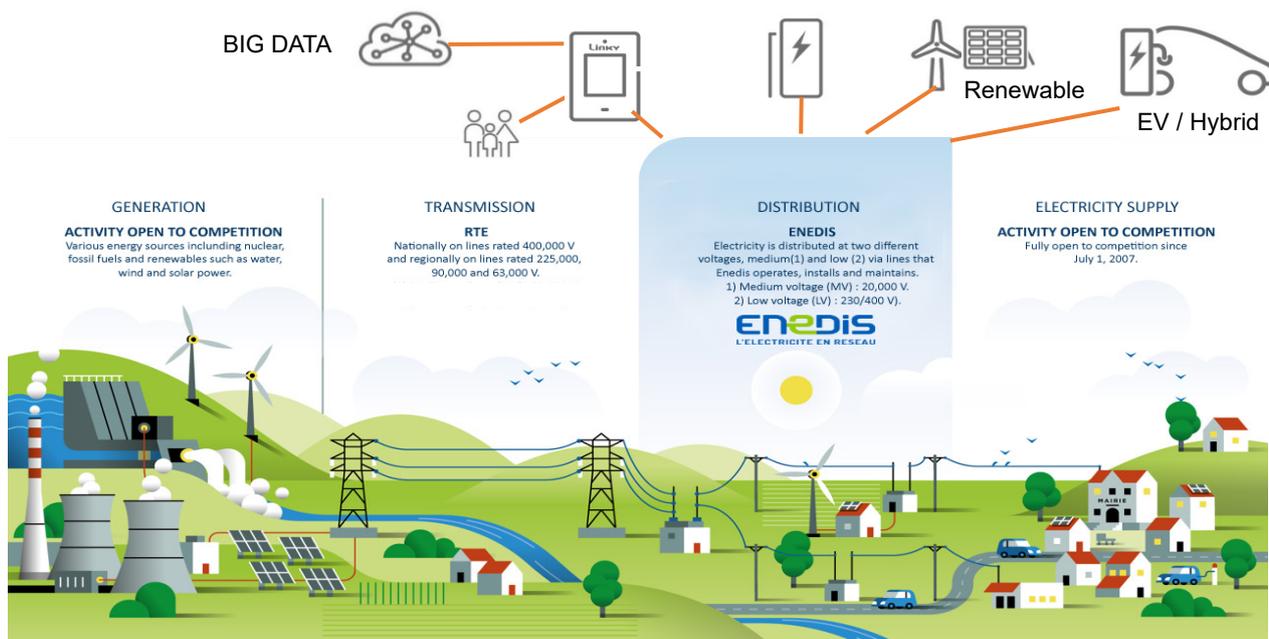


Figure 1 : Enedis : opérateur de distribution de l'électricité

Enedis est l'opérateur de distribution de l'électricité sur 95 % du territoire métropolitain français

La responsabilité d'ENEDIS va du poste source (point frontière avec RTE) jusqu'au compteur du client particulier en basse tension.

Nos missions principales sont :

- Raccorder les clients
- Développer et moderniser le réseau
- Assurer le comptage de l'énergie pour les utilisateurs d'électricité
- Accompagner les territoires dans leur projet
- Exploiter et gérer les incidents 24h/24 et 7J/7
- Piloter le réseau à partir de 30 agences de conduite régionales réparties sur toute la France.

La mobilité électrique constitue un nouvel usage de l'électricité

Les installations qui sont nécessaires pour recharger les véhicules, les points de charge, sont directement ou indirectement raccordées au réseau de distribution d'électricité. Dans les deux cas, l'électricité consommée est acheminée par le réseau de distribution d'électricité.

Le déploiement à grande échelle du véhicule électrique signifie pour Enedis de :

- concevoir les solutions avec les clients, partenaires ou territoires, et si besoin, de tester des solutions avant leur généralisation ;
- réaliser les connexions nouvelles sur le réseau de distribution, le cas échéant de renforcer le réseau pour accueillir ces connexions ;
- anticiper les besoins en investissement en prenant en compte les autres usages ;
- mener des travaux de R&D pour prendre en compte les évolutions de comportement, les technologies en développement et pour contribuer à l'élaboration des normes internationales ;
- poursuivre l'électrification de sa propre flotte d'entreprise, développer son parc de points de charge et le pilotage associé.

## 1. La mobilité électrique est réalisable :

1.1. Les points de charge lorsqu'ils s'insèrent dans une installation existante.

Si la mobilité électrique s'approvisionne directement ou indirectement sur le réseau, les installations de charge n'ont pas systématiquement un impact sur ce dernier. En effet, dans beaucoup de situations décrites ci-après, la recharge d'un véhicule électrique ne fait que s'ajouter aux consommations d'un site déjà existant et ne modifie pas son dispositif d'acheminement de l'électricité.

**A l'échelle d'une maison, l'arrivée d'un véhicule électrique n'a qu'un impact très limité sur le réseau d'électricité.** Comme le montre une étude réalisée par Enedis sur un panel de 13000 utilisateurs de véhicules électrique, l'usager organise sa consommation totale de la maison de façon à ne pas être obligé d'augmenter la puissance souscrite de son abonnement auprès des fournisseurs d'électricité.

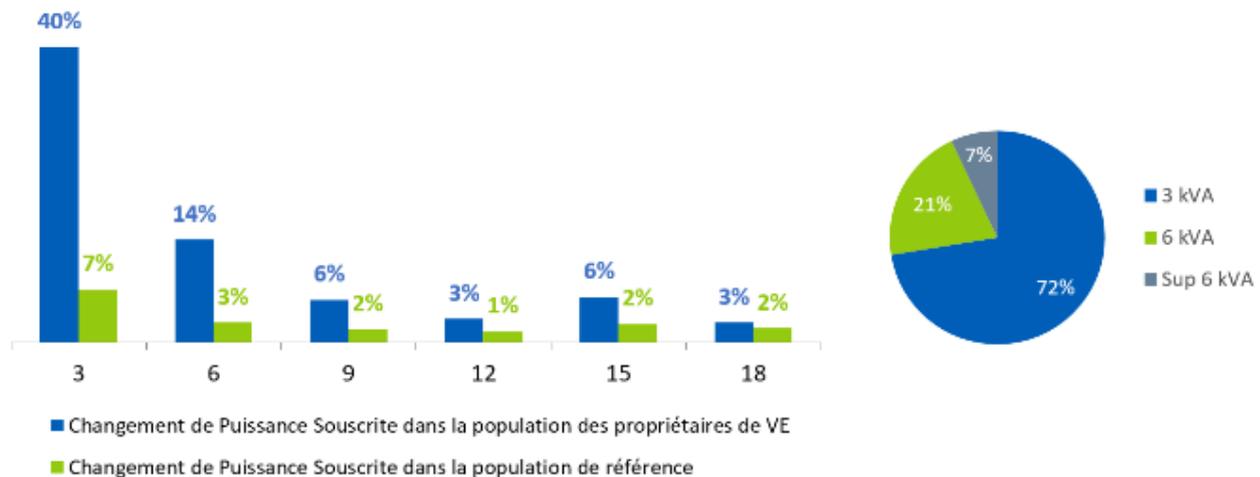


Figure 2 : Taux d'augmentation de puissance souscrite (kVA) (à gauche) et sur le niveau d'augmentation (à droite) suite à l'achat d'un véhicule électrique

Les bornes sur voies publiques sont complémentaires à la recharge à domicile, pour un complément de charge. C'est aussi une solution pour les usagers sans parking privé. La recharge sur les réseaux d'éclairage public est une solution de bornes de recharge sur voie publique, rendue possible par l'économie d'énergie réalisée par la mise en place d'ampoules LED basse consommation. Pour le réseau de distribution, ce nouvel usage ainsi que l'installation de recharge raccordée au lampadaire ne nécessitent pas de travaux, à l'exception de la pose d'un compteur dans la borne de recharge et de son exploitation dans la durée.

De plus en plus de centres commerciaux installent des bornes de recharge sans pour autant modifier leur alimentation électrique ; ils organisent la charge pour en limiter l'impact.

Il en est de même pour les entreprises qui équipent leur parking de bornes de recharge. Les gestionnaires des sites utilisent des outils de pilotage afin d'éviter d'augmenter l'abonnement ou des travaux de renforcement des câbles et transformateurs électriques.

1.2. Les points de charge qui nécessitent la création d'une nouvelle connexion au réseau public de distribution

L'installation de certaines bornes de recharge nécessite :

- soit un nouveau branchement au réseau public de distribution, avec ou sans extension de réseau, c'est généralement le cas des bornes de recharge ou grappes de bornes déployées dans les villes, sur la voie publique ou le long des autoroutes. C'est aussi le cas de certaines installations dans les parkings d'immeubles d'habitation. En France, le coût des travaux est pris en charge à 40%<sup>1</sup> par

Enedis. Le demandeur prend donc à sa charge 60% de la facture globale (on dit que le taux de « réfaction » est de 40%). Les 40% pris en charge par Enedis sont financés par le TURPE (Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Electricité)

- soit un nouveau branchement avec ou sans extension, et qui nécessite de renforcer le réseau (cf. §suivant).

1.3. Les points de charge pour les longues distances

Outre la mobilité quotidienne, Enedis étudie aussi la mobilité longue distance. En dépit des déboires du réseau Corri-Door, les installations de points de charge sur autoroutes et au voisinage des autoroutes vont se multiplier.

<sup>1</sup> La Loi d'Orientation des Mobilités prévoit que le taux de réfaction évoqué plus haut sera rehaussé à 75% dans certaines conditions.

Pour se projeter à plus long terme, Enedis a réalisé en 2018 une étude sur les 407 stations-services sur autoroute afin d'évaluer les éventuels besoins d'adaptation et d'investissements à terme dans de nouveaux postes sources.

Le scénario étudié par Enedis est le suivant : l'installation sur chacune de ces stations-service sur autoroute de « stations de recharge » de 5 MW chacune correspondant par exemple à 100 points de charge de 50 kW (ou à plus de 30 points de charge à 150 kW ou de 15 points de charge à 350 kW). Ce type de puissance engendre nécessairement la création d'un branchement dédié depuis le poste source le plus proche.

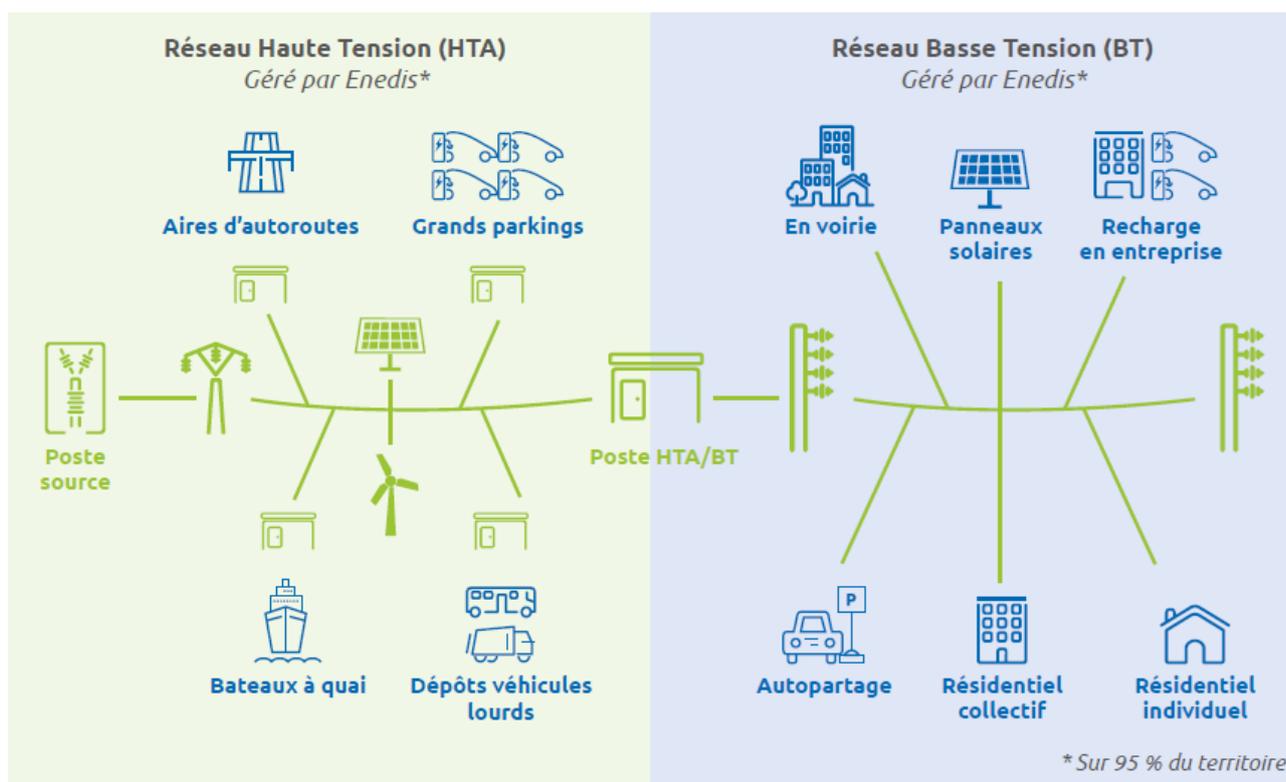


Figure 3 : rayon d'action d'un poste HTA/BT

Les résultats de l'étude montrent que l'installation d'une telle infrastructure de recharge :

- dans 80 % des cas, ne nécessite que des travaux de création de lignes ;
- dans 20 % des cas, nécessite des travaux de renforcement du poste source (ajout ou modification du transformateur associé par exemple) ;
- pour 4 cas seulement sur 407, nécessite la création de deux postes sources.

**Si les futures « stations de recharge » sur autoroute devaient plutôt se stabiliser autour d'une puissance de 2 MW, aucun poste source supplémentaire ne devrait être créé.**

Ces résultats ont été confortés par des travaux complémentaires de modélisation des flux de fréquentations générés par les chassés croisés estivaux sur le réseau autoroutier ; **il en résulte à la fois une confirmation de la pertinence du palier de puissance**

**à 5 MW précédemment utilisé et des disparités importantes à prendre en compte d'une aire à l'autre.**

**2. L'impact de la mobilité électrique sur le réseau est modéré :**

2.1. Le développement de l'infrastructure de recharge est intégré au réseau électrique à l'échelle locale

A ce jour, la totalité des infrastructures de recharges est connectée au réseau de distribution en moyenne tension (HTA) ou basse tension (BT) comme l'illustre le

schéma ci-dessous. Sont aussi connectés au réseau de distribution plus de 400 000 installations de production solaire et éolienne.

Le rayon d'action d'un poste HTA/BT dépend de la puissance et des caractéristiques des charges à alimenter. Globalement, il est de l'ordre de 500m en zone rurale ou semi-rurale et plutôt de l'ordre de 250m en zone urbaine dense. La puissance raccordée à un tel poste va de 60 à 1 000 kVA.

Le périmètre couvert par les postes sources va de quelques kilomètres en zone urbaine dense à quelques dizaines de kilomètres en zone rurale. Ils alimentent, via les postes HTA/BT ou en direct, quelques milliers à quelques dizaines de milliers de consommateurs par poste, et réceptionnent la production éolienne et celle des grands parcs photovoltaïques au sol.

### Anticiper le renforcement du réseau de distribution

Même si un raccordement pris isolément ne conduit pas nécessairement à un renforcement du réseau, l'augmentation des raccordements au réseau doit être anticipée pour définir les besoins de renforcement, afin de garantir la qualité du service aux utilisateurs : continuité de l'acheminement, résilience du réseau aux défauts, gestion des pics de consommation et de production, prise en compte des amplitudes météorologiques.

C'est pourquoi, des études technico-économiques réalisées régulièrement aux niveaux des 740 000 postes HTA/BT et des 2 200 postes sources permettent de recenser les besoins et de définir, le cas échéant, la manière dont la hausse des sollicitations sera prise en compte, soit par des solutions relevant de l'exploitation des réseaux, soit par des investissements de renforcement.

Sont notamment pris en compte dans les analyses des besoins de renforcement :

- en premier lieu le raccordement des nouveaux utilisateurs (aujourd'hui environ 300 000/an), la mobilité électrique faisant partie des nouveaux usages.
- des déplacements d'ouvrages à la demande de tiers (réseaux sur des tracés de nouvelles voies routières par exemple),
- des adaptations de réseau pour répondre aux développements économiques de certaines zones, des remplacements de réseaux fragilisés présentant un nombre d'incidents supérieur à la moyenne,
- des enfouissements de réseaux dans certaines zones soumises à des aléas climatiques importants (exemple de zones littorales ou boisées),
- des scénarios dans lesquels le réseau est fortement sollicité : pic de production au moment où la consommation est faible et réciproquement, combinés à des phénomènes météorologiques extrêmes.

### Piloter l'exploitation du réseau

Enedis a développé des outils de pilotage et d'optimisation du réseau, centralisés dans des sites sécurisés (~30 en France), grâce notamment aux nouveaux moyens de digitalisation et télécommunication. Ainsi, Enedis est capable par exemple de réalimenter plus de 2/3 des clients à distance en quelques minutes grâce à des algorithmes décisionnels de conduite du réseau.

En outre pour éviter des investissements ou les décaler dans le temps, Enedis a développé des outils d'optimisation des schémas électriques d'exploitation, rendant dynamique la conduite des réseaux de distribution en reportant des consommations d'un poste sur l'autre, d'un câble sur l'autre. Ceci est rendu possible par les nombreux capteurs implantés sur le réseau. Ils mesurent

notamment la tension en tout point du réseau, permettant ainsi à Enedis de garantir la sécurité des biens et des personnes ainsi que la qualité de fourniture de l'électricité aux consommateurs.

### Maîtriser les pics locaux de consommation ou de production

Enedis a modifié en profondeur sa manière d'exploiter le réseau afin d'intégrer la production des énergies renouvelables, les installations de stockage et les dispositifs d'autoconsommation. Ainsi, les règles de conception ont évolué : si les sections de câbles étaient auparavant décroissantes de l'amont vers l'aval, ce n'est aujourd'hui plus le cas. De même, le régime des protections du réseau était unidirectionnel, ne voyant le flux d'électrons que dans un seul sens. Il est désormais bidirectionnel. Enedis gère à présent des hausses de tension en plus des chutes de tension le long du réseau.

Ainsi, les règles de conception ont évolué : si les sections de câbles étaient auparavant décroissantes de l'amont vers l'aval, ce n'est aujourd'hui plus le cas. De même, le régime des protections du réseau était unidirectionnel, ne voyant le flux d'électrons que dans un seul sens. Il est désormais bidirectionnel. Enedis gère à présent des hausses de tension en plus des chutes de tension le long du réseau.

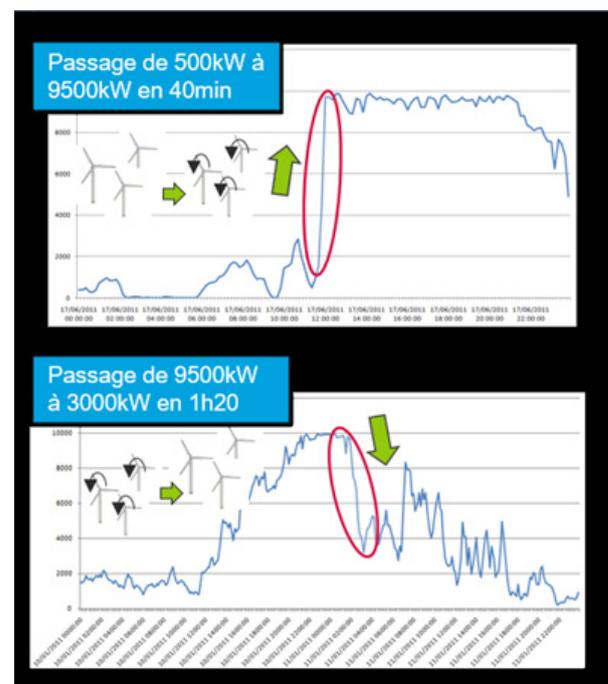


Figure 4 : courbes de production d'un site éolien de 10 MW (pas de 10min)

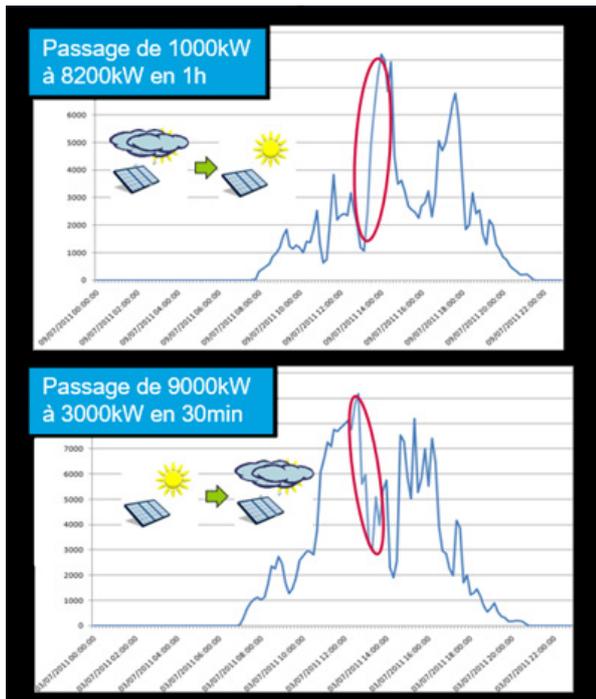


Figure 5 : courbes de production d'un site photovoltaïque de 10 MW (pas de 10 min)

Ainsi, les règles de conception ont évolué : si les sections de câbles étaient auparavant décroissantes de l'amont vers l'aval, ce n'est aujourd'hui plus le cas. De même, le régime des protections du réseau était unidirectionnel, ne voyant le flux d'électrons que dans un seul sens. Il est désormais bidirectionnel. Enedis gère à présent des hausses de tension en plus des chutes de tension le long du réseau.

**Le pilotage du réseau permet également de maîtriser des pics de sollicitation conséquents.** Les figures ci-dessus montrent l'ampleur de ces pics de sollicitation liés à la production renouvelable au niveau des postes sources.

Les mêmes types de moyens seront mis en œuvre pour gérer les pics de sollicitation du réseau causés par des afflux locaux et ponctuels de nombreux véhicules électriques.

**Ces évolutions ajoutées à la robustesse du réseau, à l'anticipation des besoins en renforcement du réseau dus à la croissance globale des usages électriques et à l'intelligence croissante embarquée dans la gestion du système de distribution ont donc créé des conditions favorables à l'intégration de la mobilité électrique.**

De surcroît, la capacité de programmer la recharge des véhicules permettra aux acteurs du « marché » d'inciter les consommateurs à recharger leurs véhicules lors des pics de production locale, ce qui aura pour conséquence d'atténuer les pics locaux de sollicitation, et le refoulement de la production locale sur le réseau de transport (RTE). (cf 2.6)

## 2.2. L'impact financier de l'intégration de la mobilité électrique

L'évaluation des besoins d'investissement sur le réseau de distribution repose sur des scénarios d'évolution des consommations et des productions à l'échelle locale, et de leur traduction en sollicitation effective sur le réseau de distribution.

Le développement de la mobilité électrique a été intégré dans ces prévisions en 2018 en se plaçant à un horizon 2035. Cette première estimation est indicative et elle devra être régulièrement actualisée en fonction de multiples paramètres : développement effectif de la mobilité électrique, installation de nouveaux points de charge et de leur puissance, habitudes des consommateurs... C'est pourquoi des études complémentaires seront réalisées en 2020.

L'impact prévisionnel en investissements de l'intégration de la mobilité électrique montre que :

- Les montants estimés croissent au rythme du marché, et restent inférieurs sur les 15 prochaines années à 10% du total des investissements d'ENEDIS. Les opérations de raccordement des bornes au réseau de distribution représentent les  $\frac{3}{4}$  du montant, tandis que le  $\frac{1}{4}$  du montant restant est lié à des renforcements (câbles et/ou transformateurs).
- Les montants estimés sont inférieurs aux montants liés à la croissance des énergies renouvelables estimés dans la même période.

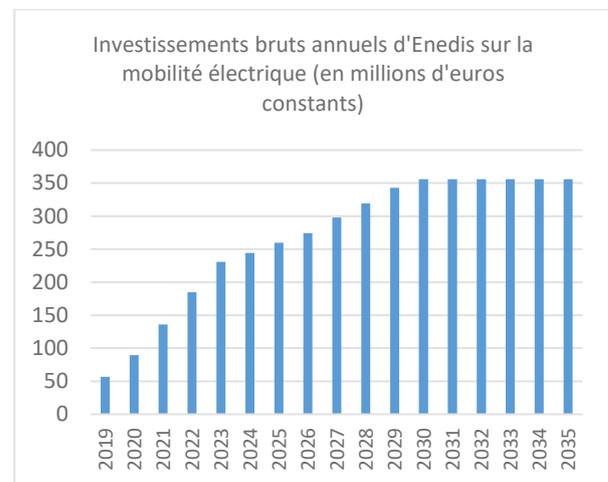


Figure 6 : Estimation des investissements d'Enedis nécessaires à l'intégration de 9 millions de véhicules électriques sur les réseaux d'ici à 2035.

## LES VÉHICULES ROUTIERS FONDÉS SUR LA PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE / PRINCIPES ET ÉLÉMENTS DU SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLES (PARTIE 1)

OLIVIER BÉTHOUX, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS À SORBONNE UNIVERSITÉ, ENSEIGNANT-CHERCHEUR AU LABORATOIRE GEEPS

**Résumé :** Porté par quelques marchés de niche et une recherche applicative de quelques décennies, les systèmes pile à combustible (PàC) tendent progressivement vers une maturité, au point que de nombreux acteurs se posent la question de l'intérêt et de l'intensité de son déploiement dans le secteur du transport en général. Ces 2 articles visent à éclairer ce débat du point de vue du transport routier. La contribution se focalise essentiellement sur la description du véhicule à PàC afin d'en comprendre les atouts, les limites et les voies actuelles de progrès.

Ce premier article, après une introduction générale, présente le principe de fonctionnement d'une PàC d'un point de vue thermodynamique afin de décrire les promesses de l'association réservoir – PàC et de détailler la notion de rendement tant potentiel que réel. Dans un second temps, il décrit les principaux constituants de la PàC afin d'en faire ressortir les contraintes et comprendre les pistes d'innovation permettant d'atteindre les feuilles de route de la filière automobile (du véhicule léger au poids lourd, en passant par les engins de chantier). Enfin, en s'appuyant sur la description précédente, la troisième partie aborde l'association de la PàC et de ses indispensables auxiliaires qui lui permettent de constituer le système pile

### 1. Contexte : l'hydrogène au service d'une nouvelle mobilité ?

La mobilité est en profonde mutation sociétale (auto-partage, covoiturage, restrictions sélectives de circulation en centre-ville, etc.) et technologiques (en France, les véhicules rechargeables électriquement ont une part de marché de 2,5% en 2019). Les essences, carburants liquides très denses énergétiquement (pouvoir calorifique massique de l'ordre de  $44[MJ.kg^{-1}]$ ), faciles à transvaser (temps de recharge < 5 minutes) et à stocker (vessies en plastique de forme adaptée à l'habitacle) se sont imposées comme ressource énergétique hégémonique du transport routier jusqu'à créer des problèmes de santé publique particulièrement aigus dans les grands centres urbains. En se fondant sur des preuves scientifiques irréfutables, l'OMS a classé en 2012 les émissions issues des moteurs diesel comme des cancérigènes certains [1, 2]. Cette grande stabilité a permis d'optimiser le moteur à combustion interne, convertisseur de puissance dont le rendement et les densités de puissance massique et volumique n'ont fait que croître en un siècle, permettant, par effet rebond, un accroissement considérable de la masse des véhicules pour maximiser des critères de confort, de sécurité et de statut social.

Cependant, la fiscalité (par exemple, pénalisation financière des constructeurs ne respectant pas un seuil de consommations moyennes normalisées sur les ventes en zone euro) et les normes (Euro6,

Chine6 encore plus sévère et structurante pour le marché mondial compte tenu des volumes impliqués, ...) imposent aux constructeurs automobiles la recherche de solutions viables à grande échelle qui n'émettent pas localement de dioxyde de carbone et de polluants (Oxydes d'azote, particules fines, etc.). Parallèlement, si les réserves mondiales de pétrole sont depuis très longtemps estimées à 50 années de la consommation contemporaine [3], le retour sur investissement énergétique [4] des gisements ne cesse de se détériorer [5, 6] entraînant la recherche d'un autre modèle de mobilité fondé sur les énergies de flux (donc issues du rayonnement solaire à court terme, c'est-à-dire le solaire, la biomasse, l'éolien, l'hydrolien, ...) plutôt que celles de stock (comme l'uranium, le charbon, le pétrole et le méthane).

Sur un périmètre économique et géographique restreint, le vecteur électrique est idéal de par le silence de la machine électrique comme de son rendement élevé (> 90 à 95% sur une grande plage de puissance) et de sa bidirectionnalité en puissance associée à l'excellent rendement charge – décharge des batteries Li-Ion (> 90 à 95%) [7]. Cette bidirectionnalité efficace permet de réduire la consommation globale des trajets en récupérant l'énergie de freinage en cycle urbain (véhicule individuel en trajet pendulaire domicile – travail, bus de proximité, camions de livraison, ...). En revanche, l'utilisation intensive (taxis, auto-partage, livraison) et les longs trajets routiers (transports interurbains) se heurtent à un besoin de stockage élevé et donc à l'augmentation de la masse de la batterie qui

embarque sur ses électrodes les réactifs nécessaires à la future conversion électrochimique. Le premier verrou réside dans l'augmentation de la masse à vide transportée qui se répercute négativement sur le coût de possession, sur la consommation et sur la puissance de la chaîne de traction. En effet, au premier ordre, la consommation d'un véhicule routier est proportionnelle à sa masse : pour un véhicule particulier urbain, elle est estimée entre 100 et 120 [ $Wh \cdot km^{-1} \cdot t^{-1}$ ] et augmente au-delà de 90 [ $km \cdot h^{-1}$ ] [7]. Le second verrou consiste en l'allongement des temps de charge (et donc de la durée d'indisponibilité du véhicule pour un usage intensif) et/ou la nécessité de puissances de recharge très élevées, qui affectent la stabilité du réseau électrique comme le coût de l'infrastructure afférente et par là le coût d'usage de la solution « véhicule électrique à batterie ». Des solutions de recharge sur la route par caténaire (expérimentée sur une portion de 2 x 5 km d'autoroute allemande proche de Francfort) ou par induction (prototype de route de 100 mètres mis en place par Qualcomm et Vedecom à Versailles - Satory) permettent d'envisager une réduction de la capacité embarquée au prix d'une complexification considérable de l'infrastructure et d'une réduction du rendement de charge [8]. Il est donc admis que dans un moyen terme de quelques décennies, ce segment du marché sera difficile à satisfaire avec les technologies actuelles et en développement de véhicules à batterie [9].

Tout en conservant l'intérêt de la traction électrique, l'utilisation d'un système pile à combustible pour réaliser l'essentiel de la conversion électrochimique est un levier pour rompre le cercle vicieux décrit précédemment : autonomie → masse → puissance et consommation. En effet, avec cette solution, le stockage est déporté dans un réservoir optimisé uniquement pour emmagasiner efficacement la plus grande densité (massique et volumique) de réactifs et autoriser un rechargement rapide en fin d'utilisation (~ min). Par ailleurs l'un des réactifs n'est tout simplement pas stocké par un moyen technologique puisque le dioxygène est prélevé, à la demande, dans l'air ambiant. Ainsi, l'augmentation d'autonomie induit une augmentation très contenue de la masse embarquée, ce qui affecte faiblement la puissance de traction. De plus, le réservoir de dihydrogène n'étant pas la partie noble du système, l'accroissement de sa capacité n'a qu'un faible impact sur le coût global de possession. En dernier lieu, le plein d'énergie se fait très rapidement par transfert de matière d'un grand réservoir stationnaire vers le petit réservoir embarqué. C'est un aspect

essentiel pour des utilisations intensives (poids lourds inter cités, taxis, auto partage, etc.). Telle est la promesse de l'intégration du système pile à combustible dans les objets de mobilité.

Si le principe de la pile à combustible est ancien (milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle), ses optimisations technologiques avec une finalité industrielle ont débuté tardivement (seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle) sur le marché extrêmement étroit des vols spatiaux habités, donc en dehors de toute contrainte de coût. Au tournant du siècle, certains constructeurs automobiles (GM, Daimler, PSA, Toyota, ...) ont engagé des programmes de recherche pour amener cette brique technologique vers la maturité d'un produit de grande consommation. En 2020, force est de constater que le pari de la maturité technologique est en passe d'être gagné. En effet, la preuve de l'intégration véhicule a été faite dans plusieurs applications. Les constructeurs asiatiques Toyota, Hyundai et Honda fabriquent et commercialisent depuis quelques années des véhicules à pile à combustible de pré-série. Le marché est pour l'heure subventionné (comme d'ailleurs l'ensemble du marché du véhicule électrique dans le monde) avec un soutien particulièrement prononcé en Chine (depuis 2019, environ 30[k\$] de subvention par voiture hydrogène !). À Paris, la flotte de taxis Hype exploite de manière intensive (plusieurs chauffeurs par véhicule) aujourd'hui (début 2020) 130 et demain près de 600 véhicules de ce type (fin 2020) en s'appuyant sur 4 stations de recharge (Pont de l'Alma, Orly, Roissy et Loges-en-Josas). D'autres expérimentations ont également lieu dans le secteur des poids lourds : à Versailles (ligne 264), deux bus à pile à combustible viennent d'être mis en circulation, tandis que la SNCF vient de commander 15 TER à hydrogène au groupe Alstom qui expérimente déjà ce concept sur l'infrastructure ferrée allemande (depuis 2018 en Basse Saxe sur un tronçon d'une centaine de kilomètres). D'autre part, une autre application se développe sans bruits et sans subventions : le marché des chariots de manutention d'intérieur. Pour des utilisations en 3 x 8 et 7 jours sur 7, il est d'ores et déjà plus intéressant de posséder un unique chariot alimenté à l'hydrogène que d'en avoir le double à batteries pour assurer les rotations utilisation / recharge. En France, citons la plateforme logistique du groupe Carrefour qui exploite à Vendin en Vieil 137 chariots électriques alimentés par pile à combustible. La figure 1 illustre quelques-unes de ces applications pionnières de l'utilisation du dihydrogène pour la mobilité électrique.



a) Engin de manutention (ici plateforme logistique du groupe Carrefour)



b) Flotte de taxi (ici Hype, 1<sup>ère</sup> flotte de taxi hydrogène mondiale)



c) Bus hydrogène (ici les premiers bus à hydrogène circulant dans les Yvelines)

Figure 1 : utilisation du dihydrogène dans les véhicules :  
a) Chariot élévateur, b) Flotte de taxis (Hype), c) Bus hydrogène

## 2. La pile à combustible pour l'application traction

Après avoir évoqué les éléments importants du cahier des charges des applications automobiles, ce paragraphe vise à aborder la pile à combustible d'un point de vue systémique afin d'en dégager les grands contours. Cette première approche permet de définir la notion de rendement et d'éclairer les écarts entre le rendement thermodynamique théorique et le rendement effectivement obtenu.

### 2.1. Cahier des charges

La pile à combustible intégrée dans un véhicule doit pouvoir fonctionner dans un environnement très exigeant : vibrations, plage de température élevée (typiquement de  $-20[^\circ\text{C}]$  à  $+45[^\circ\text{C}]$ ), temps de démarrage rapide avec possibilité de fournir la moitié de la puissance nominale au-delà des 30 premières secondes, puissance de traction fortement variable, nombreux cycles de marche-arrêt et durée de vie supérieure à  $5000[h]$ . Par ailleurs, comme tout système embarqué, les densités massique et volumique sont scrutées de près. A tous ces critères techniques s'ajoutent les coûts de possession et d'utilisation qui sont particulièrement contraignants, notamment sur le marché du véhicule particulier. On voit donc que pour cette utilisation intermittente, le technologue est amené à adopter un compromis. Pour d'une part obtenir des démarrages rapides et peu énergivores et d'autre part

éviter des efforts mécaniques fatiguant les structures multi-matériaux lors des phases de marche/arrêt, on privilégie des systèmes fonctionnant à une température proche de la température ambiante. D'un autre point de vue, l'évacuation des calories issues des pertes est généralement un poste important en termes de masse et de volume. Aussi, pour favoriser les échanges thermiques avec l'ambiant mais aussi stimuler les réactions chimiques sans procédé catalytique coûteux (loi d'Arrhenius), on recherche des températures élevées au sein du réacteur.

Afin de comprendre le dispositif technologique mis en œuvre pour répondre au mieux à ce cahier des charges, nous allons, dans un premier temps, nous intéresser aux principes régissant le convertisseur de puissance, organe central du système pile à combustible.

### 2.2. Principe de fonctionnement et implications

A l'instar des batteries, la pile à combustible est le siège de deux demi-réactions d'oxydo-réduction (figure 2), nécessitant que les réactifs ne soient pas mis en contact direct mais isolés par un électrolyte qui a la double fonction de séparer les réactifs et de permettre le passage ionique nécessaire au couplage des deux réactions électrochimiques. Le dispositif électrique alimenté assure quant à lui le pont électronique et permet ainsi de récupérer l'énergie utile sous forme de travail des forces électriques  $W_{elec}$  [10].

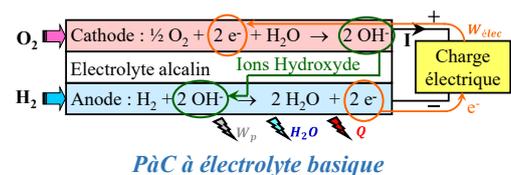
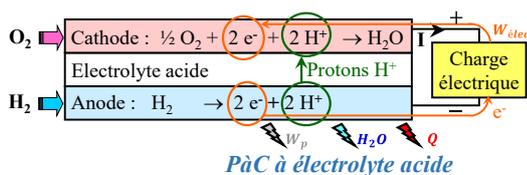


Figure 2 : Pile à combustible, siège de réactions d'oxydo-réduction

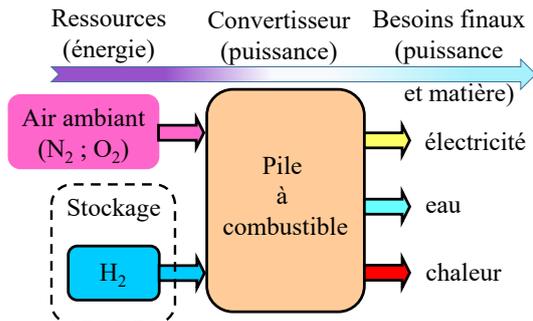


Figure 3 : Principe fonctionnel d'un système pile à combustible

En revanche, le système pile à combustible (figure 3) s'oppose aux batteries en ce sens que, si les réactifs ( $H_2$  et  $O_2$  dans l'application automobile) sont bien consommés aux électrodes, ceux-ci sont amenés en temps réel et à la demande à partir de réservoirs. Structurellement sont donc dissociées les fonctions de conversion (puissance) et de stockage (énergie). On voit par-là qu'une promesse de cette technologie est de découpler l'optimisation du réacteur, de celle des stockeurs d'énergie potentielle que sont les réservoirs de dihydrogène voire de dioxygène. Si, pour les groupes auxiliaires de puissance des vols spatiaux habités ou des sous-marins, ces deux réservoirs sont obligatoires, les applications terrestres permettent de supprimer le réservoir de dioxygène en prélevant ce dernier dans l'air au fur et à mesure de sa consommation par la pile : c'est là un second facteur d'optimisation qui d'ailleurs devient un des espoirs d'amélioration de la densité énergétique des batteries Lithium au travers des futurs développements des batteries Li-air [11]. Dans ce cadre, le dihydrogène paraît un candidat solide car son pouvoir calorifique inférieur (PCI) est d'environ  $120[MJ.kg^{-1}]$  tandis que le PCI du carburant pour diesel lui est 2,7 fois inférieur avec une valeur légèrement inférieure à  $45[MJ.kg^{-1}]$ .

Dans le cas du transport, et pour des vitesses de croisière raisonnables, la puissance nécessaire est déterminée par la masse du véhicule qui gouverne les phases d'accélération ainsi que le passage des rampes ascendantes. L'autonomie, quant à elle, est uniquement corrélée à la taille du réservoir ainsi qu'à sa rapidité de recharge. Pour les véhicules à batterie, les réactifs doivent être stockés au sein des électrodes de l'accumulateur afin d'assurer l'autonomie désirée : pour garantir des besoins ponctuels de grande autonomie, l'usager doit alors accepter un surcoût et un surpoids importants en achetant un véhicule à batterie de grande capacité. Inversement, le coût principal du véhicule pile à combustible est lié à son convertisseur (puissance) et l'augmentation du stockage (énergie) affecte peu masse et coût, d'autant plus que sa recharge par transfert de matière étant très rapide, une autonomie de  $500[km]$  à  $600[km]$  est amplement suffisante. Le constructeur japonais Toyota qui consacre d'importants efforts au développement de la mobilité hydrogène en donne l'illustration à la figure 4 au travers du coût global des deux types de véhicules électriques en fonction de l'autonomie prévue.

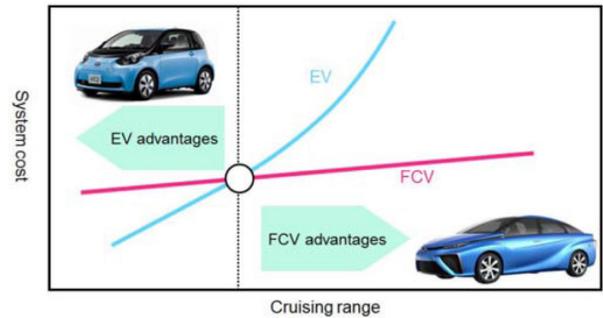


Figure 4 : Comparaison des véhicules à batterie (EV) et à pile à combustible (FCV) selon [12]

La figure 3 donne le principe de la pile à combustible (PàC). Au travers de la notion de tri-générateur (électricité, eau et chaleur), elle rappelle ainsi la première réalisation industrielle de la PàC, celle embarquée dans tous les vols spatiaux habités depuis la capsule Gemini (1965). C'est d'ailleurs, ce qui suscite l'intérêt actuel de l'aéronautique pour intégrer des systèmes pile à combustible comme auxiliaire de puissance (APU) à bord des avions commerciaux.

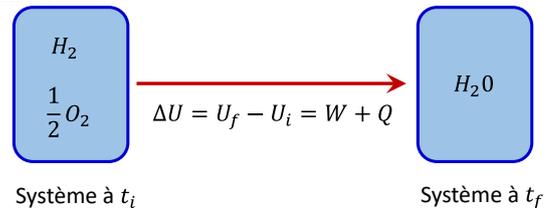


Figure 5 : Système thermodynamique étudié

Selon la première loi de la thermodynamique appliquée au système de la figure 5, la réaction-bilan  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  permet de convertir une énergie interne électrochimique  $U$

- en travail  $W$  des forces extérieures au système étudié, dont une partie  $W_p$  (liée aux forces de pression) est subie et l'autre partie  $W_{elec}$  (correspondant aux forces électriques) est recherchée,
- et en chaleur  $Q$  qui doit être dissipée dans l'environnement pour maintenir le réacteur à sa température de référence.

La réaction ayant lieu à pression constante (en général la pression atmosphérique), la notion de variation d'enthalpie  $\Delta H$  (ou encore pouvoir calorifique  $PC$ ) intègre cette notion de travail dans la loi de conservation de l'énergie pour une transformation isobare. Du point de vue du système étudié (figure 5), on a donc :

$$\Delta H = (\Delta U - W_p) = W_{elec} + Q$$

La seconde loi de la thermodynamique introduit le concept d'entropie  $S$  et institue le principe d'asymétrie entre travail  $W$  et chaleur  $Q$ . Si la transformation d'énergie directe engendre de la chaleur, cette même transformation contrôlée afin d'obtenir du travail nécessite un échange minimal d'énergie thermique  $Q_{rev} = T \cdot \Delta S$  (à iso-température). Celui-ci serait

théoriquement mesurable pour un système à l'équilibre, donc avec une réaction infiniment lente (c'est-à-dire à puissance nulle). Dans la pratique, pour pouvoir fournir une puissance utile  $P_{elec}$  non nulle, le système est en déséquilibre et, à cette chaleur réversible minimale, s'ajoute une chaleur irréversible témoin des pertes définitives liées à ce déséquilibre. L'enjeu du technologue est d'en comprendre les sources afin de réduire leurs conséquences sous les contraintes de masse, volume et coût.

Quoiqu'il en soit, l'ingénieur cherchant à ne valoriser que la production électrique  $W_{elec}$  connaît sa limite supérieure de rendement : le rendement thermodynamique  $\eta_{th}$  donné par la variation d'enthalpie  $\Delta H$  et d'entropie  $\Delta S$  de la réaction bilan ( $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ ) qui est la même quel que soit le type d'électrolyte :

$$\eta_{P\grave{a}C} = \frac{W_{elec}}{\Delta H} \leq \eta_{th} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

où  $G$  est l'énergie libre de Gibbs, variable d'état définie à partir des autres variables d'état thermodynamique par :

$$G = H - T \cdot S$$

Dans les conditions standards ( $25[^\circ C]$  et  $1[atm]$ ) et en se rapportant à la consommation d'une mole de dihydrogène, la réaction produit une variation d'enthalpie de  $\Delta H^0 = -286 [kJ \cdot mol^{-1}]$  dans le cas de la production exclusive d'eau liquide (donc avec récupération de la chaleur latente du changement de phase eau vapeur - eau liquide (condensation), cf. Pouvoir Calorifique Supérieur : PCS). De plus, cette transformation chimique nécessite, dans les conditions standards, une quantité de chaleur réversible  $T^0 \cdot \Delta S^0 = -49 [kJ \cdot mol^{-1}]$ . Le travail théorique récupérable  $W_{elec}^{th}$  sous forme électrique est  $W_{elec}^{th} = \Delta G^0 = \Delta H^0 - T^0 \cdot \Delta S^0 = -237 [kJ \cdot mol^{-1}]$ . Par conséquent, dans ces conditions, le rendement thermodynamique  $\eta_{th}^0$  est d'environ 83 %. Compte-tenu du signe négatif de  $\Delta S$ , ce rendement thermodynamique diminue quand la température  $T$  du réacteur augmente ( $\Delta G$  qui est négatif tend vers 0). Du point de vue du seul potentiel, tout paraît donc pousser à la diminution de la température  $T$  de fonctionnement. Mais, dans les faits, la loi d'Arrhénius nous indique qu'il est d'autant plus facile de tendre vers ce rendement thermodynamique que la température des réactifs est élevée (et que l'énergie d'activation de la réaction est faible).

Notons que le rendement des moteurs à combustion est estimé en adoptant le PCI (Pouvoir calorifique Inférieur) et non le PCS. Si on exclut la chaleur latente de condensation de l'eau, le rendement théorique standard s'élève à 94,5 % ! Dans les faits, les piles destinées à l'automobile opèrent à de basses températures (80 à 90°C) et le système d'évacuation des calories produites doit envisager le pire cas pour lequel toute la chaleur latente de vaporisation de l'eau est à extraire thermiquement.

Le rendement réel quant à lui se mesure très bien au travers de la différence de potentiel  $V$  entre électrodes,

puisque le travail électrique lié à la consommation d'une mole de dihydrogène se calcule par :

$$W_{elec} = -nFV = -\Delta G^0$$

où  $n$  est le nombre d'électrons échangés pour une molécule de  $H_2$  consommée et  $F = 96\,485 [C \cdot mol^{-1}]$  est la valeur absolue de la charge d'une mole d'électrons (nombre de Faraday).

La même réaction-bilan  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  peut recouvrir deux mécanismes très différents. En effet, les réactions d'oxydo-réduction aux électrodes dépendent de la nature de l'électrolyte, c'est-à-dire s'il est acide (prépondérance d'ions hydronium  $H_3O^+$ ) ou basique (ions hydroxyde  $OH^-$  majoritaires). La figure 2 illustre les réactions en jeu dans les deux cas ainsi que les flux ioniques à travers chaque électrolyte. Dans les faits, les piles alcalines dites AFC sont la réalisation industrielle historique embarquée dans les premiers vols spatiaux habités (Gemini, Apollo, navette) : elles utilisent un électrolyte alcalin liquide. Si elles fonctionnent avec un très bon rendement sur une large plage de température ( $\theta \in [50^\circ C, 250^\circ C]$ ) et des catalyseurs moyennement coûteux (à base de Nickel à l'anode et d'argent ou d'or à la cathode), cette pile présente comme inconvénient d'exiger une alimentation en oxygène pur car le dioxyde de carbone est un poison pour son électrolyte (l'hydroxyde de potassium aqueux KOH est précipité par le  $CO_2$ ). Notons néanmoins que cette technologie représente actuellement la solution la plus mature et la moins chère pour réaliser la production de dihydrogène (et de dioxygène) par électrolyse de l'eau. Dans les années 1980, le développement d'un électrolyte solide fondé sur une membrane polymère acide solide et extrêmement fine (de la centaine à la dizaine de microns) a permis de construire une nouvelle filière de pile basse température : les PàC à membrane échangeuse de protons, dite PEMFC. Malgré des coûts encore rétrogrades (environ 30 fois supérieurs à la cible de 15€/m<sup>2</sup>), des difficultés de recyclage de ces polymères, et la nécessité de catalyser les réactions acides (basses températures) avec des catalyseurs nobles (platine), les développements actuels se concentrent sur cette filière PEMFC. Les raisons principales sont la compacité du convertisseur de puissance lui-même, sa bonne tenue mécanique à un environnement difficile comme les vibrations, et un système complet plus simple que l'AFC.

Pour les deux types de réacteurs (alcalin ou acide), le coefficient  $n = 2$  car, par molécule de dihydrogène consommée, deux électrons sont libérés à l'anode et absorbés à la cathode. La tension thermodynamique d'équilibre aux conditions standard est donc :

$$V_{th}^{ocv^0} = \frac{-\Delta G^0}{2F} = 1,23 [V]$$

Dans les faits on obtient une valeur plus faible et cela d'autant plus que la densité de courant  $j$  aux électrodes augmente. La figure 6 trace la caractéristique J-V. Elle illustre également les écarts à la situation idéalisée de l'équilibre thermodynamique qui sont donc synonymes de phénomènes irréversibles (pertes). Par rapport à la tension thermodynamique, on distingue plusieurs raisons à ces « irréversibilités ».

$$V = V_{th}^{OCV} - \underbrace{\left( \frac{\Delta V_{perm} + \Delta V_{act}}{A + B \ln\left(\frac{j}{j_0}\right)} \right)}_{\substack{\Delta V_{perm} + \Delta V_{act} = A + B \ln\left(\frac{j}{j_0}\right)}} - \underbrace{\left( \frac{\Delta V_{Ohm}}{\Re j} \right)}_{\Delta V_{Ohm} = \Re \times j} - \underbrace{\left( \frac{\Delta V_{Conc}}{C \exp(j)} \right)}_{\Delta V_{Conc} = C \exp(j)}$$

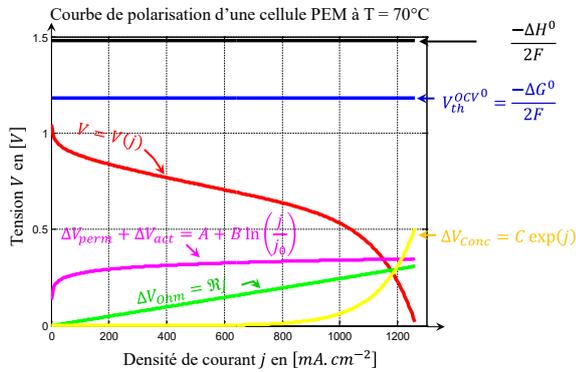


Figure 6 : tension aux bornes d'une pile à combustible, ainsi que les principales chutes de tension

Dans l'ordre d'importance, on trouve :

- En particulier à cause de sa très faible épaisseur, la membrane n'est pas parfaitement imperméable aux réactifs. En particulier, la perméation d'une faible quantité de H<sub>2</sub> à travers la membrane électrolytique altère le potentiel d'équilibre (j = 0), ce qui conduit à une tension mesurée V<sup>OCV</sup> inférieure à V<sub>th</sub><sup>OCV</sup>. La valeur typique de V<sup>OCV</sup> est de l'ordre de 1[V], ce qui constitue une perte ΔV<sub>perm</sub> significative.
- Surmonter l'énergie d'activation nécessaire à la réaction est responsable de pertes, nommées pertes d'activation. À l'équilibre, les réactions ayant également lieu, ces pertes sont également responsables de l'écart entre V<sup>OCV</sup> et V<sub>th</sub><sup>OCV</sup>. En déséquilibre (j ≠ 0), ce phénomène est décrit par la relation de Butler-Volmer :

$$j = j_0 \times \left\{ \exp\left(\frac{\alpha 2F}{RT}(V - V^{OCV})\right) - \exp\left(-\frac{(1 - \alpha) 2F}{RT}(V - V^{OCV})\right) \right\}$$

Dès que la densité de courant j est significative, cette relation peut se simplifier en la relation de Tafel qui indique une chute de tension d'activation obéissant à la densité de courant selon une loi logarithmique. On voit par-là que cette chute est particulièrement significative pour les faibles densités de courant.

$$\Delta V_{act} = V - V^{OCV} = \frac{RT}{\alpha 2F} \times \ln\left(\frac{j}{j_0}\right)$$

Notons que les chutes de tension (en magenta sur la figure 7) dues à la fois à la compétition des couples électrochimiques et aux pertes d'activation sont prépondérantes sur toute la plage d'utilisation de la pile en fonctionnement nominal. Cela justifie les efforts portés à la fois sur la catalyse (qui permet de trouver d'autres voies réactionnelles impliquant des énergies d'activation moindres) et sur la membrane qui permet l'isolement des parties cathodiques et anodiques.

- L'épaisseur de la membrane est l'aboutissement d'un compromis puisqu'elle permet le transport des protons H<sup>+</sup> et d'éviter la diffusion des autres espèces. Les chutes de tension liées à la mobilité des ions hydronium H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> à travers l'électrolyte sont linéaires et augmentent proportionnellement avec l'épaisseur de la membrane. On parle globalement de pertes ohmiques pour faire référence à cet aspect auquel s'ajoute au second ordre les pertes électroniques liées à la mobilité des électrons à travers l'électrode. On caractérise ces pertes par le coefficient macroscopique  $\Re$ , s'exprimant en [Ω.m<sup>2</sup>] :

$$\Delta V_{Ohm} = \Re \times j$$

Ces pertes sont en général moins importantes et deviennent du même ordre de grandeur que les précédentes uniquement lorsqu'on atteint des puissances proches de la puissance nominale de la pile. Toutefois, il est important de maintenir le coefficient  $\Re$  à sa valeur nominale  $\Re^{nom}$ . Dans le cas des membranes actuelles en polymère fluoré, cela nécessite essentiellement qu'elles soient parfaitement hydratées.

- Les réactifs étant consommés à l'interface entre électrode et électrolyte, il s'installe un gradient de pression partielle entre les amenées de gaz et la surface de l'électrolyte. Le taux de réaction maximal (j<sub>max</sub>) est donc lié à la quantité de réactif qui peut diffuser à travers l'électrode poreuse. Dans des conditions nominales (pores non-obstrués), cette densité de courant n'est jamais atteinte. Mais quoiqu'il en soit, on assiste à des pertes liées à la migration des réactifs et produits. En première approximation, on constate une chute de tension ΔV<sub>Conc</sub> suivant une loi exponentielle (souvent reliée à la loi de Nernst indiquant la baisse de l'énergie libre de Gibbs en fonction des concentrations de réactifs et de produits, mais en réalité plus importante puisque la loi de Nernst ne décrit que les baisses réversibles de potentiel).

$$\Delta V_{Conc} = C \times \exp(j)$$

Lorsque la densité de courant j s'approche de j<sub>max</sub>, la chute de tension devient très significative (courbe jaune sur la figure 7). On voit donc l'importance de préserver une valeur j<sub>max</sub> élevée, ce qui concrètement signifie d'éviter le bouchage des pores de l'électrode, en particulier par l'eau produite qui doit essentiellement s'évacuer sous forme de vapeur d'eau. Compte-tenu de la nécessité de maintenir la membrane à un niveau très hydraté, ce point d'équilibre est délicat à assurer et maintenir.

Pour donner des ordres de grandeurs des réalités constatées sur le terrain et observées en 2020, la puissance nominale est définie pour une tension de cellule de V<sup>nom</sup> = 0,7[V], correspondant dans le secteur automobile à un compromis proche de j<sup>nom</sup> ≅ 1,0 [A.cm<sup>-2</sup>]. En adoptant le PCI (à l'instar des moteurs à combustion) qui correspond, pour le dihydrogène, à une tension de 1,25[V], le rendement de

la PàC seule est de  $\eta_{PàC} = \frac{0,7}{1,25} = 56\%$ . Rappelons que le point de vue du PCI est spécieux, en particulier puisqu'il faut évacuer, au moins en partie, la chaleur latente de condensation.

Pour produire une puissance de  $1[kW]$  dans ces conditions, la charge électrique doit donc prélever un courant de  $\frac{10^3}{0,7} = 1,43[kA]$ , ce qui nécessite de consommer un débit massique de dihydrogène de  $\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{2F} (1,43 \times 10^3) = 14,8 [mg \cdot s^{-1}]$ . Cela signifie qu'il faut  $53,4 [g/kWh]$  de  $H_2$  dans ces conditions opératoires. Parallèlement, à la cathode, le débit d'air est piloté par la demande en dioxygène. La proportion d' $O_2$  dans l'air étant  $\chi_{O_2} \cong 0,21$ , le débit massique d'air est de  $\dot{m}_{air} = \frac{1}{\chi_{O_2}} \frac{M_{air}}{4F} (1,43 \times 10^3) = 511 [mg \cdot s^{-1}]$ , ce qui correspond à un débit minimum d'air de  $\dot{vol}_{air} = 0,43 [L \cdot s^{-1}]$ . Dans les faits, pour garantir un bon approvisionnement de dioxygène à la cathode, le débit réellement fourni est quasiment doublé (donc proche d'un litre par seconde).

### 3. Constituants de la PàC

Une cellule fournit une tension extrêmement faible ( $\leq 1,0[V]$ ). Par conséquent, l'obtention d'une tension compatible avec l'application nécessite d'empiler les cellules élémentaires pour réaliser une association électrique série (figure 7). La cellule constitue donc la brique élémentaire de la PàC. Comme schématisé sur la figure 8, elle est constituée de deux plaques bipolaires prenant en sandwich une association membrane-électrode (qualifiée par l'acronyme AME en français et MEA pour "Membrane Electrode Assembly" en anglais). Plus précisément et en partant du cœur de la pile, on trouve : la membrane (M pour "Membrane" en anglais), l'électrode avec une couche active (AL pour "Active Layer" en anglais) puis une couche de diffusion (GDL pour "Gas Diffusion Layer" en anglais) et enfin une plaque bipolaire (BP pour "Bipolar Plate" en anglais).

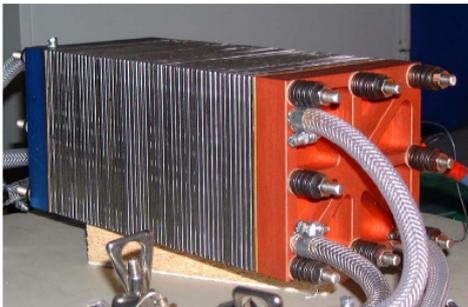


Figure 7 : Empilement de cellules élémentaires (« stack ») produit par le fabricant allemand UBZM (laboratoire GeePs)

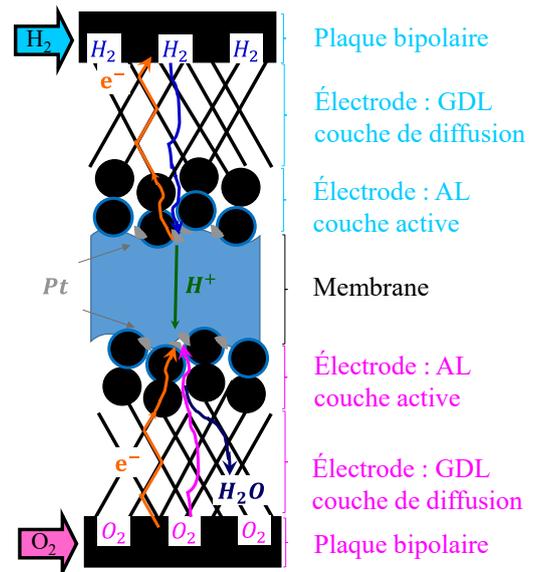


Figure 8 : détail de la cellule : assemblage membrane-électrode (AME)

#### 3.1. La membrane

L'électrolyte solide est constitué d'une fine membrane fluoro-polymère quasi imperméable aux réactifs et laissant passer les protons  $H^+$  associés à une ou plusieurs molécules d'eau. On parle de transport électro-osmotique quantifié par son coefficient électro-osmotique qui est défini par le nombre de molécules d'eau transportées par chaque proton : sa valeur qui dépend de la membrane et de son hydratation est couramment de l'ordre de 2. La résistivité protonique de la membrane est fortement influencée par sa teneur en eau. Lorsque la cellule est neuve, il faut donc procéder à une séquence de rodage qui consiste à la faire fonctionner suivant un protocole précis afin d'obtenir sa bonne humidification pour son utilisation optimale dans le système [13, 14]. La minimisation de la durée de ce processus est un enjeu majeur des grandes séries [15 - 17]. D'un point de vue industriel, le rodage de la PàC peut être vu comme le cycle de charge puis décharge que doivent subir les cellules des batteries Li-ion avant d'être définitivement scellées [11]. Comme lui, ce processus de finition demande du temps et de l'énergie. En revanche, contrairement à la batterie Li-ion, il est intéressant de noter que, suite à un arrêt prolongé ( $>$  mois), la cellule peut se trouver asséchée et un cycle de remise en condition s'avère alors nécessaire. D'autre part, le chargement en eau contribue à une augmentation significative de son volume. Son assèchement à l'arrêt et son hydratation en fonctionnement contribuent à créer d'importants cyclages des contraintes mécaniques qui peuvent finir par entraîner des microfissures délétères de la membrane.

Par ailleurs, pour des raisons de tenue mécanique et de conductivité protonique, la membrane doit être maintenue à des températures inférieures à  $100[^\circ C]$ . La membrane de référence est le Nafion, marque déposée par DuPont ; c'est un dérivé du Téflon possédant des groupes acides sulfoniques  $SO_3H$  qui permettent un passage optimal des protons  $H^+$  à  $80[^\circ C]$ .

Par l'adjonction de différents composants comme des oxydes de silicium ( $SiO_2$ ), on parvient à étendre cette plage de température. Néanmoins, ce type de polymères contraint les systèmes PàC à fonctionner à une température de l'ordre de  $70[^\circ C]$  à  $80[^\circ C]$ . Cette gamme de température peut entraîner une formation trop importante d'eau liquide à l'intérieur de l'électrode engendrant son bouchage même partiel. C'est la raison pour laquelle, des recherches actives tentent de développer des membranes fonctionnant à plus haute température. De surcroît, une plus haute température de fonctionnement permet de réduire la surface de l'échangeur thermique ce qui permet d'assurer une meilleure intégration au véhicule. A titre indicatif, le circuit de refroidissement des moteurs à combustion interne se situe à  $90[^\circ C]$  pour la plupart des points de fonctionnement et sa gestion thermique peut le faire évoluer entre  $82[^\circ C]$  et  $110[^\circ C]$ . Dans l'absolu, cet écart peut paraître minime, mais ce qui est dimensionnant est bien entendu l'écart de température à l'ambient qui peut atteindre ( $T_{amb}^{Max} \cong 45^\circ C$ ) : aussi, dans ces conditions, toute augmentation de température entraîne des gains appréciables sur le volume du système. Des membranes hybrides constituées d'une matrice polymère contenant de l'acide phosphorique ont ainsi été développées [18]. Elles présentent l'avantage de fonctionner jusqu'à des températures d'environ  $150[^\circ C]$  et de ne pas nécessiter d'eau liquide pour assurer une bonne conductivité des protons  $H^+$  : on parle alors de pile « HT-PEM » (acronyme anglais pour membrane échangeuse de protons à haute température). Son utilisation est néanmoins réservée à des dispositifs statiques ou des alimentations auxiliaires à fonctionnement régulier. En effet, sa conductivité protonique est très faible à température ambiante. De plus, au démarrage, son fonctionnement nécessite un préchauffage au-delà de  $100[^\circ C]$ , et sans production d'électricité, afin d'éviter l'extraction de l'acide phosphorique par l'eau liquide que produirait la cathode [19]. Tous ces phénomènes empêchent des démarrages rapides dans les conditions normales d'utilisation d'un véhicule ( $T_{stockage} \in [-40^\circ C, +60^\circ C]$  et  $T_{utilisation} \in [-20^\circ C, +45^\circ C]$ ) et rendent énergétiquement coûteux des consommations intermittentes. De plus, l'épaisseur est importante conduisant à des réalisations volumineuses.

Si la membrane est aujourd'hui un constituant fonctionnel, il reste encore des progrès à accomplir en termes de (i) coût, de (ii) production et recyclage, et de (iii) température de fonctionnement.

### 3.2. La couche active de l'électrode

Les deux demi-réactions ont lieu dans la zone de triple contact entre un gaz, des ions et des électrons. A l'anode, il faut effectivement avoir simultanément du dihydrogène gazeux  $H_2$ , des électrons  $e^-$  et des protons  $H^+$ , tandis qu'à la cathode, la réaction nécessite la présence de dioxygène gazeux  $O_2$ , des électrons  $e^-$  et des protons  $H^+$ . La réaction a donc lieu à l'interface entre l'électrode poreuse et l'électrolyte qui doivent être intimement liés.

Pour que le gaz parvienne à l'interface en limitant les pertes de charges, l'électrode doit être poreuse avec des tailles de pores suffisantes. Inversement, pour que les électrons atteignent facilement le point de triple contact, l'électrode poreuse doit être constituée d'un matériau très bon conducteur ; à cet effet, le noir de carbone est le matériau couramment utilisé.

Compte-tenu de la faible température de fonctionnement (faible énergie thermique des réactifs), il est important de catalyser la réaction avec des métaux nobles (en l'occurrence le platine) afin de créer des chemins réactionnels à faible énergie d'activation. Le catalyseur doit être placé sur la zone de triple contact et doit avoir la forme géométrique conduisant au plus grand rapport entre surface effective et volume. C'est la raison pour laquelle le platine est constitué de grains de quelques nanomètres de diamètre. Ce point est particulièrement sensible car le platine est un métal précieux. Il est à noter que d'importants efforts de recherche conduisent à limiter son usage, soit du point de vue du processus de dépôt pour garantir que celui-ci ait bien lieu à l'interface et non dans une zone inutile, soit en synthétisant de nouveaux catalyseurs aux propriétés similaires permettant de limiter ou de s'affranchir de son usage [20].

En conclusion, l'interface entre l'électrode et l'électrolyte est appelée la « couche active ». Cette dernière est constituée d'un mélange très fin ( $\cong 10[\mu m]$ ) de matériaux : fluoro-polymère (pour s'amalgamer avec l'électrolyte), téflon (pour son caractère hydrophobe permettant de limiter l'engorgement en eau) et de particules de carbone (conductrices) sur lesquelles sont déposées des grains de platine (catalyseur des réactions). La figure 9 donne une image obtenue par microscope à balayage électronique de l'aspect d'une couche active [21]. En raison de l'utilisation du platine, la couche active est la partie la plus coûteuse de l'AME. Sachant que ce coût est un facteur déterminant pour la mise à l'échelle de la production, un important travail sur la catalyse demeure nécessaire pour le baisser.

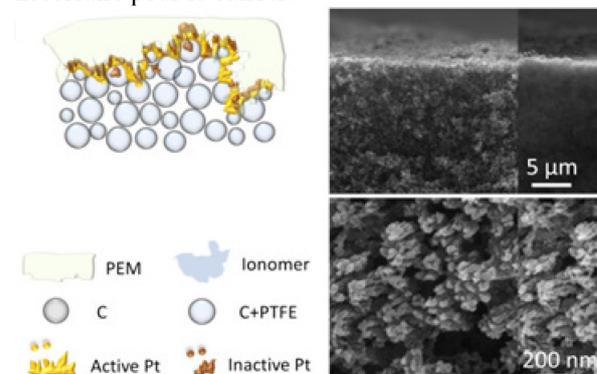


Figure 9 : Détail de la couche active d'un assemblage membrane-électrode [21]

### 3.3. La couche de diffusion de l'électrode

La partie supérieure de l'électrode a pour double fonction de diffuser les gaz pour homogénéiser la concentration des réactifs dans la couche active et de conduire les électrons. C'est la raison pour laquelle, elle est réalisée en tissu de carbone ( $\cong 100[\mu\text{m}]$ ) rendu partiellement hydrophobe par imprégnation de téflon. La figure 10 montre des vues réalisées au microscope à balayage électronique des deux types de couche de diffusion réalisés avec des fibres de carbone.

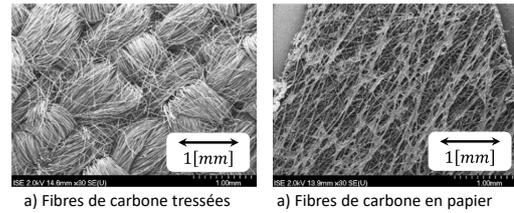


Figure 10 : Image au microscope à balayage électronique (MEB) des deux technologies de couches de diffusion [22]

### 3.4. Plaques bipolaires

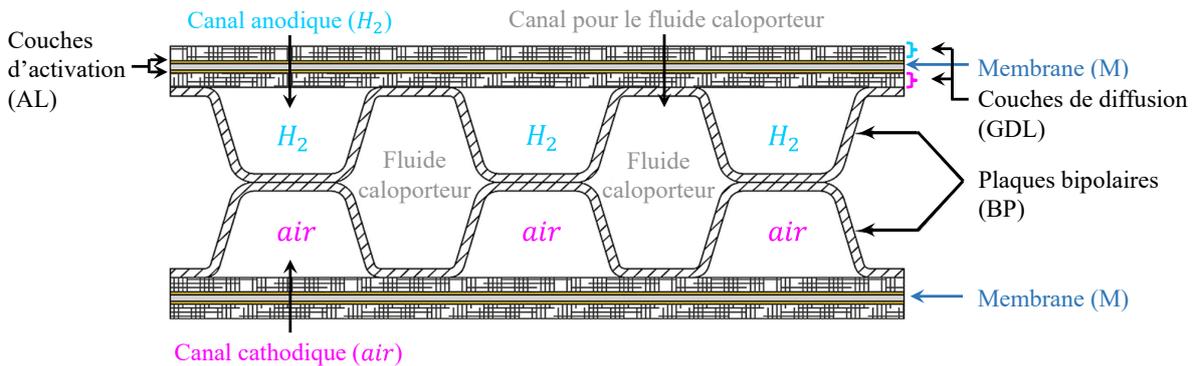


Figure 11 : Coupe d'une plaque bipolaire avec ses trois canaux, d'après [23]  
a) canal anodique ( $H_2$ ) | b) canal cathodique (air) | c) canal du fluide caloporteur

Les plaques bipolaires ont pour quadruple fonction d'amener les fluides de manière séparée (les réactifs ainsi que le fluide caloporteur), d'évacuer les produits dont l'eau (ce qui nécessite une hydrophobicité des surfaces), de conduire le courant électronique vers le collecteur de courant alimentant la charge électrique et d'assurer la tenue mécanique de l'AME et de l'empilement de cellules (« stack » en anglais). La conception des canaux (forme du canal et tracé entrée → échappement illustré à la figure 11) relève d'une étude approfondie permettant d'assurer au mieux toutes ces fonctions en garantissant la meilleure répartition (température et réactifs) sur la surface active de l'AME

[24]. En particulier, elle résulte d'un compromis entre, d'une part, une largeur importante synonyme d'une bonne homogénéité des réactifs, de faibles pertes de charge et d'un risque diminué d'engorgement, d'autre part, une largeur étroite diminuant les pertes Joule [25] ; la figure 12 en donne une illustration schématique. De même, les canaux véhiculant le fluide réfrigérant entrent à proximité des alimentations en réactifs (donc les moins humides) et sort au voisinage des échappements d'air et d' $H_2$  les plus chargés en humidité. En effet, la pression de vapeur saturante évolue selon une loi exponentielle (loi expérimentale d'Antoine) : à titre d'exemple, l'humidité relative d'un mélange à pression constante augmente de 18% lors d'une baisse de température de  $80[^\circ\text{C}]$  à  $75[^\circ\text{C}]$ .

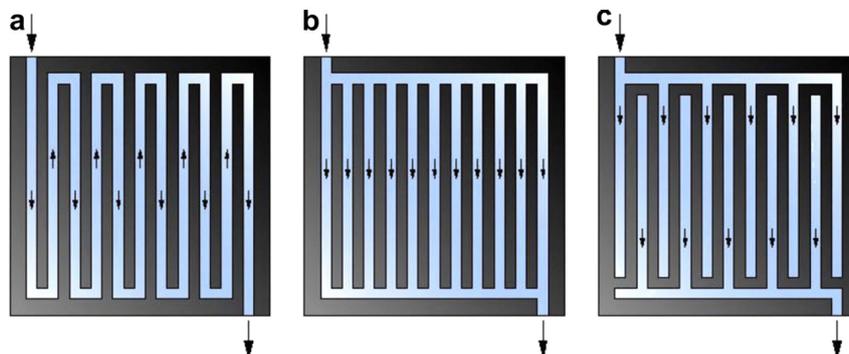


Figure 11 : Quelques formes de canaux de distribution des réactifs et d'évacuation des produits [24]  
a) canaux en serpentins | b) canaux parallèles | c) canaux inter digités (\*)

(\*) Note : Les canaux inter digités sollicitent fortement le phénomène de convection sous les dents de la plaque bipolaire.

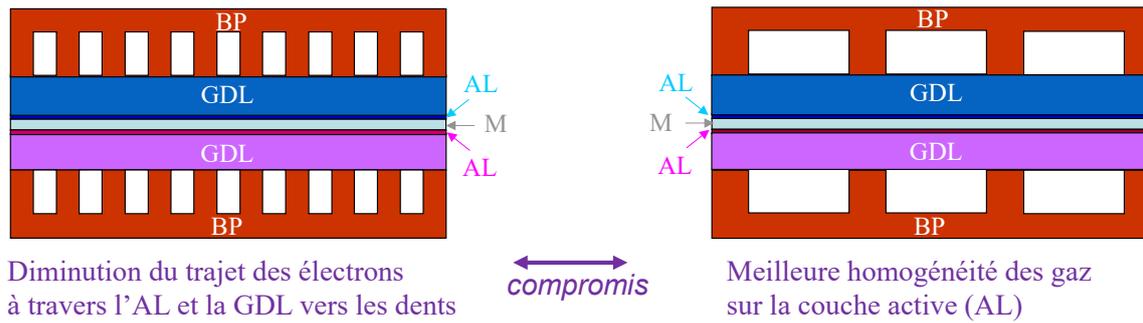


Figure 12 : Compromis sur la largeur des canaux

Pour les réaliser, il existe plusieurs technologies. Pour des raisons de compacité ( $\cong 10^{-1}[mm]$ ) et de cadence de production (en prévision des grandes séries), la filière automobile privilégie leur réalisation par des plaques métalliques embouties auxquelles on ajoute un revêtement anticorrosion. Initialement, les plaques d'acier étaient traitées par un dépôt de métaux précieux anticorrosion, mais aujourd'hui, on obtient de bonnes propriétés en termes de conductivité électronique et de tenue à la corrosion sans recourir à des métaux précieux. En conclusion, on peut considérer que ce constituant est quasiment arrivé à maturité. Il reste néanmoins quelques avancées à faire pour en diminuer encore le coût afin d'atteindre un objectif compatible avec un marché de masse. En effet, sur les marchés de niche de 2020, les plaques bipolaires interviennent pour environ 30% du prix d'un assemblage de PàC de type PEM [24].

#### 4. Système Pile à Combustible

L'empilement de cellules constitue le réacteur dans lequel se passe la réaction électrochimique. C'est un convertisseur de puissance qui doit être placé dans des conditions opératoires idoines (température, pressions, etc.) et recevoir les réactifs nécessaires à son fonctionnement puisque le stockage (énergie) de ceux-ci a été déporté. Pour obtenir la puissance électrique à la demande, la pile à combustible proprement dite est entourée d'auxiliaires au fonctionnement coordonné ; cet ensemble constitue le système pile à combustible. La figure 13 en donne le schéma synoptique. On trouve quatre sous-systèmes en interaction et contrôlés par des boucles locales.

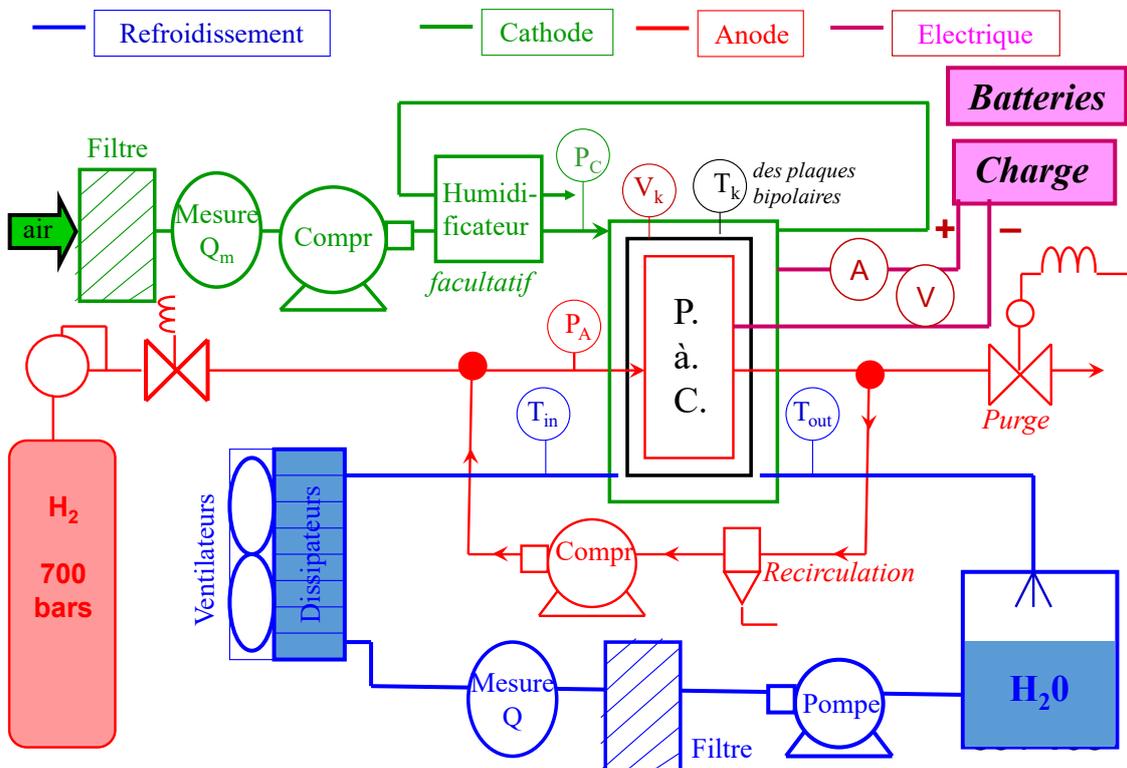


Figure 13 : Synoptique d'un système pile à combustible

#### 4.1. La ligne d'air (représentée en vert sur la figure 13)

La ligne d'air est pilotée en débit massique par le contrôle d'un compresseur d'air. La consigne de débit est imposée par le courant délivré par la PàC à la charge ainsi qu'à ses propres auxiliaires. L'air prélevé à l'extérieur (réservoir gratuit et non embarqué !) doit être filtré afin d'éviter d'empoisonner la cathode et en particulier son catalyseur sensible au monoxyde d'oxygène (CO), aux suies (HC), etc. à des quantités extrêmement faibles. De plus l'air sec se composant essentiellement de diazote (78,08 %), le compresseur d'air doit mettre en mouvement par surpression une masse très importante d'air afin de fournir la quantité suffisante de dioxygène (20,95 % de l'air sec) au point de triple contact de la cathode. Comme on l'a vu, on privilégie un coefficient stœchiométrique de 1,6, c'est-à-dire que la ligne d'air doit apporter presque deux fois plus d'air qu'exigé par la réaction. Malgré d'énormes progrès réalisés sur ce constituant, le compresseur d'air est un des postes énergétiques ayant un impact très significatif sur le rendement global du système. Dans [26], J-P Poirot-Crouvezier propose un système pile à combustible dédié à la traction capable de fournir une puissance nette nominale de 50,0[kW] à l'aide d'une PàC de 54,3[kW] alimentée par un compresseur d'air basse pression (1,3 [bar]) de 1,71[kW] représentant donc 40% des consommations auxiliaires égales à 4,3[kW].

Sur le schéma, on remarque un humidificateur d'air dans l'amenée d'air. Il permet par échange diffusif et transfert de chaleur d'injecter une partie de l'humidité de l'échappement d'air chaud vers son entrée d'air initialement sec et frais. Ainsi l'humidificateur homogénéise les températures et les taux d'humidité relative dans la cathode évitant des zones asséchées au droit des départs des canaux et des zones saturées voire

engorgées au droit des sorties. Deux technologies cohabitent [26]. La première consiste à interfacer l'air humide en sortie de cathode avec l'air sec entrant par l'intermédiaire d'une membrane polymère du même type que celle utilisée comme électrolyte de la PEMFC ; elle a en effet la double propriété d'être étanche aux gaz et perméable à l'eau [27]. La seconde possibilité réside dans l'utilisation d'une roue enthalpique constituée de matériaux absorbant l'eau [27, 28]. Cette technologie éprouvée est issue des systèmes de climatisation des bâtiments ; dans le cas présent, elle permet d'absorber l'humidité en sortie de cathode pour la déposer en entrée de cathode. Notons que Toyota a proposé et produit à partir de 2014 le premier système pile à combustible sans humidificateur [27, 29], ce qui simplifie le système, réduit les pertes de charges et améliore le prix et la compacité du système en éliminant un constituant. Pour cela, Toyota a réduit (d'un 1/3) l'épaisseur de la membrane fluoro-polymère échangeuse de protons. En plus d'améliorer la conductivité protonique, cet amincissement permet de renforcer le phénomène de diffusion de l'eau entre la cathode, où l'eau est produite ( $1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ ) et l'anode, où l'eau est prélevée par migration des protons  $H^+$  (phénomène d'électro-osmose déjà décrit au § 3.1.). Comme l'électro-osmose est uniforme et que la rétrodiffusion ne l'est pas car elle dépend intimement du gradient de concentration local entre les pressions partielles de vapeur d'eau cathodique et anodique, on assiste à une circulation de l'eau qui homogénéise les humidités relatives si l'on prend soin de choisir des écoulements anodique et cathodique en contre-courant (figure 14). C'est cette gestion en flux inversés associée à un renforcement de la rétrodiffusion qui assure, par conception, une humidification adéquate et homogène de la cellule.

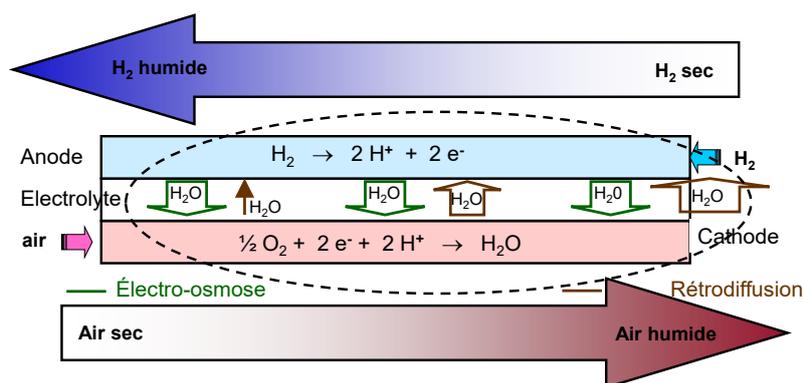


Figure 14 : Principe de l'homogénéisation de la teneur en eau dans l'AME d'une cellule de PàC

Enfin le débit massique d'air  $Q_m$  est mesuré avec un débitmètre à fil chaud, ce qui assure une dynamique de mesure élevée. C'est la dynamique mécanique du groupe moto-compresseur ( $\cong 1[s]$ ) qui limite la dynamique de la réponse de la boucle d'air. Pour assurer le bon fonctionnement du cœur de pile et éviter tout phénomène de manque d' $O_2$ , le débit d'air est affecté d'un coefficient stœchiométrique supérieur à 1 :

typiquement 1,6 (avec une plage métier comprise entre 1,3 et 2,0).

#### 4.2. La ligne de dihydrogène (représentée en rouge sur la figure 13)

Contrairement à la ligne d'air qui dispose d'un réservoir naturel, la ligne de dihydrogène débute par un réservoir technologique. Le coût et l'encombrement de ce dernier ne sont pas négligeables. En effet, compte-tenu de sa très faible masse molaire ( $M_{H_2} = 2,02[g.mol^{-1}]$ ), le dihydrogène doit être stocké à pression élevée et donc avec des formes et des matériaux optimisés. Aujourd'hui, les constructeurs automobiles intègrent des réservoirs de forme cylindrique (avec têtes sphériques) capables de supporter une pression de 700[bar] pendant toute la durée de vie du véhicule voire au-delà (réemploi ou utilisation pour un autre usage éventuellement moins contraignant). Notons que deux standards de haute pression coexistent encore : réservoirs de type III (350[bar]) et de type IV (700[bar]). Leur densité massique est similaire car la nécessité de tenir une pression double nécessite l'emploi d'une plus grande quantité de matière ; en revanche, la densité volumique est clairement favorable aux réservoirs de type IV [26]. Si les véhicules industriels (camions, bus) ont, un temps, privilégié la solution plus encombrante (type III), il semble que les usages (véhicules légers et poids lourds) convergent vers une technologie commune afin de réduire les coûts par standardisation (fabrication, homologations). Le réservoir est constitué de 3 couches fonctionnelles [30]. Du cœur à l'extérieur, on trouve (pour le type IV) (i) l'enveloppe étanche (« liner » en anglais) qui assure l'imperméabilité vis-à-vis de la molécule de  $H_2$  (en matériau polymère avec dépôt interne métallique essentiellement en aluminium), (ii) une structure résistante aux contraintes mécaniques réalisée avec un renfort de fibres de carbone, (iii) une couche extérieure de protection réalisée en fibres de verre associée à une résine. Avec ce type de réservoir, on est désormais capable d'atteindre un rapport entre la masse de  $H_2$  comprimée et la masse du réservoir de l'ordre 6% avec une cible à 8%. Parmi, les véhicules commercialisés, citons la Toyota Mirai embarquant un réservoir de 5,0[kg $_{H_2}$ ] et une densité massique de 5,70% et la nouvelle Hyundai Nexo dotée d'un réservoir de 6,33[kg $_{H_2}$ ] et une densité massique de 7,18% [31].

Embarquer  $m_{H_2} = 5[kg]$  dans un véhicule léger permet d'assurer une autonomie sur le cycle d'homologation WLTC d'environ 550 [km] (0,9[kg] pour 100[km]) [30]. A la température standard de 25[°C], la loi des gaz parfaits (voir ci-dessous) nous indique que ce véhicule doit donc embarquer un réservoir de : 88,6 [L] de volume intérieur. Toutefois, il faut considérer une température de 125[°C] afin de prendre une marge de sécurité par rapport à la température maximale de stockage du véhicule (65[°C]). Aussi est-on conduit à adopter un volume intérieur de 118,3 [L].

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2}RT}{M_{H_2}P}$$

De plus, en adoptant une densité gravimétrique de 6% pour le système de stockage, les 5[kg $_{H_2}$ ]

nécessitent un réservoir de 88,3 [kg] de masse à vide, soit 93,3 [kg] lorsque le réservoir est plein. A titre comparatif, la même quantité d'énergie stockée nécessite environ 14,0[kg] d'essence ou de diesel, ce qui représente environ 18,5[L] d'essence ou 16,5[L] de carburant diesel. En adoptant le point de vue plus réaliste de l'autonomie, cela signifie un réservoir d'environ 33[L] pour la motorisation essence et de 25[L] pour le diesel, de masse négligeable et de forme parfaitement modulable pour assurer la meilleure intégration véhicule.

On voit par cet exemple que, même si les densités gravimétrique et volumétrique ainsi que le facteur de forme du réservoir  $H_2$  sont moins intéressants que ceux d'un réservoir d'hydrocarbures, la technologie hydrogène est très séduisante pour des mobilités grandes distances, comparativement aux solutions à batteries. Bien évidemment, la réalisation de réservoirs polymorphes est un des axes de recherche prometteur pour améliorer l'intégration au véhicule.

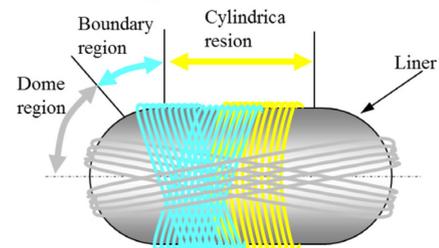


Figure 15 : Synoptique des deux premières couches du réservoir [29]

La ligne de dihydrogène est pilotée en pression afin d'assurer un différentiel nul entre les pressions anodique et cathodique, garant de l'intégrité mécanique de la très fine membrane polymère. Pour cela, le contrôleur actionne l'électrovanne située en sortie de détente afin d'admettre plus ou moins de  $H_2$  sous pression dans le cœur de la PàC. La sortie de la ligne de  $H_2$  est normalement bouchée. La ligne de  $H_2$  est néanmoins purgée périodiquement afin d'évacuer le diazote qui diffuse de la cathode (air) vers l'anode et dilue ainsi le dihydrogène. On considère en général qu'un pourcent de carburant est globalement perdu lors de ces purges successives. Il est important de signaler la nécessité d'assurer une recirculation de  $H_2$  afin d'homogénéiser, sur toute la surface de l'AME, les pressions partielles du mélange  $H_2$ ,  $N_2$  et  $H_2O_{vap}$ . Pour cela il faut donc réaliser ce circuit de retour dans lequel l'élément essentiel est la pompe de recirculation (forte contrainte sur son étanchéité). En l'absence de recirculation, on assiste rapidement à un phénomène de stratification de l'azote avec une faible concentration en  $H_2$  proche de l'échappement qui engendre une disparité importante dans la distribution de densité de courant  $j$  sur l'AME : ce phénomène est illustré schématiquement à la figure 16.

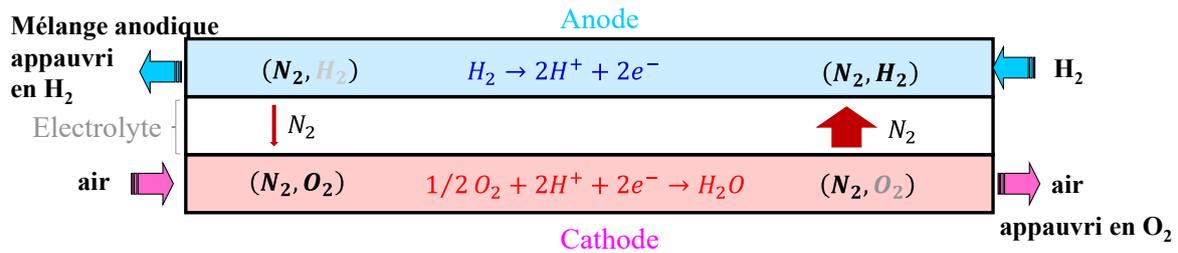
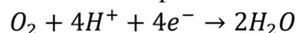


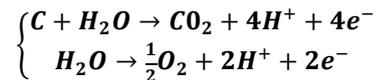
Figure 16 : Stratification de l'azote anodique en l'absence de recirculation d'homogénéisation des pressions partielles (les notions liées à la vapeur d'eau ont déjà été indiquées à la figure 14)

Le fait que les réactifs soient apportés à la demande engendre également un impact négatif significatif sur la durée de vie de la PàC de type PEMFC lors des phases d'arrêt et de démarrage [32, 33, 34]. En effet, l'arrêt de la PàC amène l'air à remplir le compartiment anodique initialement rempli de dihydrogène. Pour redémarrer la PàC, l'hydrogène est à nouveau introduit à l'anode et expulse l'air. Pendant ces deux phases transitoires, on constate la coexistence fugace du dihydrogène et de l'oxygène à l'électrode négative. La surface de l'AME qui est normalement alimentée (à droite sur la figure 17) se comporte comme un générateur à fort potentiel électrique car à densité de courant  $j$  quasi nulle. La seconde partie de l'AME (à gauche sur la figure 17) est électriquement interconnectée à la première via les électrodes et ne peut que se comporter comme une charge électrique à cause de la présence du dioxygène de part et d'autre de la membrane. S'agissant de la partie gauche de l'AME,

- la présence d'électrons à l'anode favorise l'oxydation du dioxygène  $O_2$  présent, selon l'équation électrochimique :



- tandis qu'à l'électrode positive, le potentiel est suffisant pour provoquer l'oxydation du carbone  $C$  ou de l'eau  $H_2O$ , tous deux présents dans la couche active, selon l'équation électrochimique :



On constate donc une circulation de protons  $H^+$  dans le sens attendu dans la partie droite de l'AME et dans le sens opposé dans la partie gauche de l'AME et une production de  $CO_2$  à l'anode qui est mesurable en laboratoire. En revanche, même si le couple électrochimique ( $C/CO_2$ ) possède une énergie d'activation élevée impliquant une faible densité de courant interne, ce phénomène (révélé par la présence de  $CO_2$ ) provoque la corrosion des particules de carbone qui sont le matériau de support du catalyseur  $Pt$  : on assiste à la destruction de la surface nanostructurée de la couche active associée à la dissolution du platine dont les grains se dispersent dans la structure et deviennent inactifs tout en s'agrégeant au gré du flux d'évacuation de l'eau. La figure 18 illustre ce phénomène en montrant des images de couches actives neuve (a) et dégradée (b) réalisées par Transmission Electron Microscopie (TEM). Ce phénomène peut entraîner un déclin très rapide des performances de la PàC et doit être combattu en réduisant au minimum la durée de ce front ( $H_2/O_2$ ). C'est pour cette raison que les arrêts de pile sont suivis d'une purge énergétique du compartiment anodique par l'air ambiant afin de chasser rapidement le dihydrogène résiduel

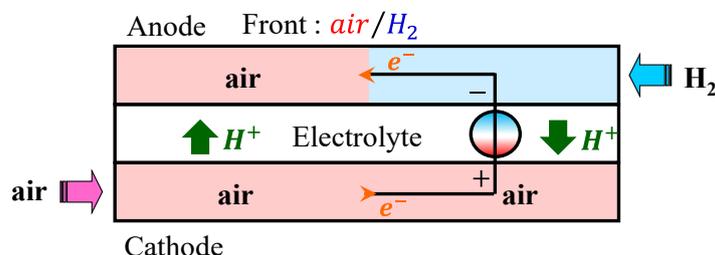


Figure 17 : Front  $H_2/air$  lors d'une phase de démarrage

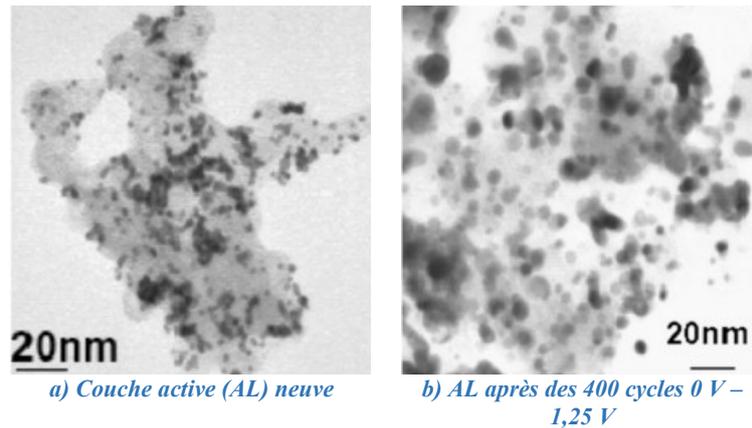


Figure 18 : Particules de platine sur support carbone (points sombres) avant (a) et après (b) l'exposition à 400 variations de potentiel entre 0,0 [V] et 1,25 [V] [35].

#### 4.3. La ligne électrique (représentée en mauve sur la figure 13)

La tension délivrée par une pile à combustible varie fortement selon son point de fonctionnement, typiquement de 100 % pour le fonctionnement à vide à 70 % pour le fonctionnement à pleine puissance. Par ailleurs, l'empilement de cellules élémentaires est contraint par des considérations mécaniques, d'homogénéité de serrage par exemple. Aussi, le nombre de cellules connectées en série est-il technologiquement restreint, ce qui signifie que la tension maximale délivrée  $V_{PàC}^{max}$  est limitée et peut ne pas atteindre la tension nominale permettant d'alimenter la machine électrique de manière optimale via son onduleur [36]. A titre indicatif, notons que la PàC embarquée dans la Toyota Mirai est constituée d'une unique rangée de 370 cellules permettant de fournir une puissance nominale de 114[kW] [37]. Sa tension  $V_{PàC}$  varie donc de 370[V] à 260[V] environ pour un courant nominal de 440[A]. Pour alimenter l'ensemble onduleur-machine (« inverter – motor » de la figure 19) qui exige une tension maximale de  $V_{Bus\_DC}^{max} = 650[V]$ , cette tension  $V_{PàC}$  doit donc être augmentée et asservie. C'est le rôle du hacheur élévateur unidirectionnel (cf "boost" sur la figure 19). Ce convertisseur est placé en série dans la chaîne de conversion et son rendement affecte, en permanence, le rendement global du système. Il est essentiel que le rendement du hacheur  $\eta_{hach}$  reste à une valeur élevée sur une grande plage de puissance, car la traction automobile est caractérisée par une dynamique de puissance très importante [38]. La stratégie adoptée par Toyota réside dans le fractionnement de puissance qui est assez logique compte-tenu de l'important courant nominal de plusieurs centaines d'Ampère issu de la PàC [39, 40]. Pour la Mirai, le convertisseur de puissance est ainsi constitué de la mise en parallèle de 4 cellules élémentaires de commutation dont les commandes sont entrelacées pour minimiser les ondulations de courant dans la PàC comme dans le condensateur  $C_{bus}$  du bus haute tension. La réduction de l'amplitude des ondulations de courant est favorable vis-à-vis de la durée de vie de la PàC qui est minorée par rapport à une

situation idéale sans ondulations dues au découpage MLI [41]. Pour les faibles puissances, une seule cellule est opérationnelle évitant ainsi les pertes fatales des 3 autres cellules. La stratégie de gestion du convertisseur consiste à mettre en fonctionnement un plus grand nombre de cellules au fur et à mesure que la puissance appelée à la pile augmente [12]. Cette stratégie permet d'améliorer significativement le rendement pour les points de fonctionnement à puissance partielle ; le convertisseur gagne 10 points de rendement pour un fonctionnement à  $P_{PàC} = 15[kW]$  (soit environ 13% de la puissance nominale) dont l'occurrence est élevée. La figure 20 donne une illustration de ce principe.

Du point de vue système, ce convertisseur est un des postes énergétiques clef des auxiliaires du système pile. Dans [26], J-P Poirot-Crouvezier considère que, pour une cinquantaine de kilowatts, un rendement de 97 % est tout à fait réalisable sur une large plage de fonctionnement. Pour le système PàC évoqué en [26], cela signifie que ce convertisseur doit évacuer environ 1,63[kW] lorsqu'il délivre sa puissance nette nominale de 50,0[kW], ce qui, avec 38% des consommations auxiliaires, représente donc le même ordre de grandeur que le compresseur d'air.

Les recherches actuelles visent bien-entendu à réduire encore les pertes du convertisseur tout en assurant son intégration au système. En relation avec ce dernier aspect, un des points critiques réside dans les températures de refroidissement des composants actifs à semi-conducteur. Dans les réalisations, les interrupteurs utilisés (IGBT et diodes) sont en silicium et nécessitent souvent un fluide de refroidissement à une température de 60[°C] inférieure à celle du fluide de la PàC, actuellement de (70[°C]), mais visant à terme une consigne plus élevée de l'ordre de 100[°C] (pour garantir une température d'AME inférieure à 120[°C] [42]. Dans le contexte actuel, le circuit de refroidissement doit posséder plusieurs boucles de refroidissement à des températures différentes, ce qui le rend complexe et donc coûteux et volumineux. C'est la raison pour laquelle, l'effort de recherche vise à assurer un fonctionnement du système à une température unique de fluide de refroidissement [26] ; l'utilisation de composants à grands gaps à l'instar des carbures de silicium (SiC) ou des nitrures de gallium (GaN) laisse entrevoir des perspectives prometteuses en ce sens

s'accompagnant de surcroît d'une diminution des pertes de conversion électrique-électrique [39, 43].

Figure 19 : Chaîne de traction hybride d'un véhicule pile à combustible.

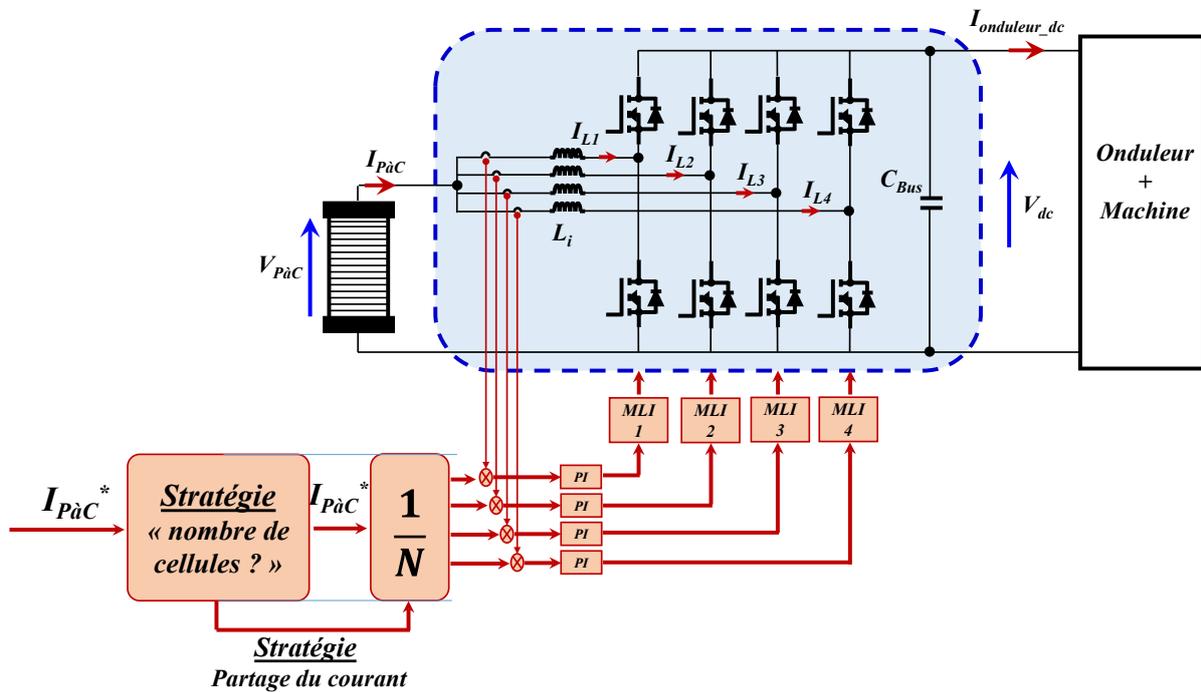
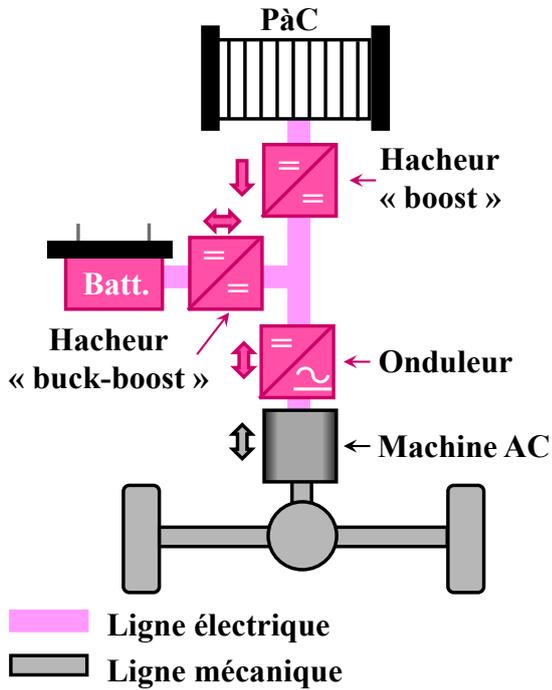


Figure 20-a : Structure du hacheur élévateur dédié à la PàC.

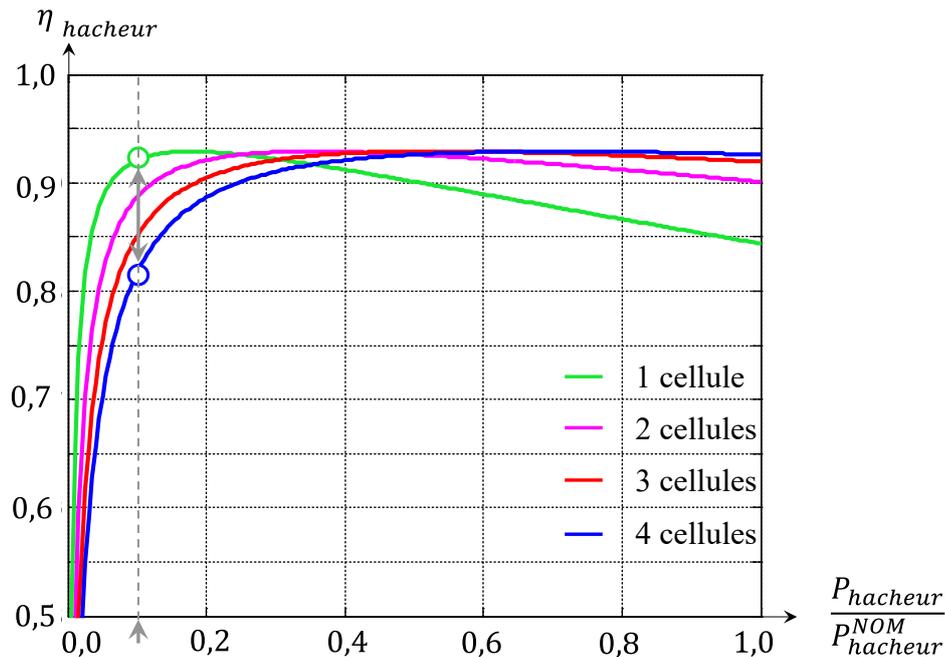


Figure 20-b : Courbes de rendement associées au hacheur élévateur dédié à la PàC.

La chaîne onduleur-machine étant bidirectionnelle en puissance, les véhicules électrifiés ont la capacité de récupérer une partie de l'énergie cinétique de freinage comme de l'énergie potentielle lors des descentes. C'est le rôle de l'association batterie-convertisseur placée en dérivation sur le bus continu. Ce second convertisseur est un hacheur bidirectionnel (convertisseur "buck-boost" sur la figure 19) qui adapte les niveaux de tension entre le bus continu et la batterie dont la tension dépend de l'état de charge et de la température et est limitée par le nombre optimal de cellules à placer en série.

D'un point de vue fonctionnel, le système d'alimentation est hybride [44] et la puissance appelée par la charge (traction et auxiliaires de bord) peut être délivrée par une infinité de combinaisons ( $P_{PàC}$ ,  $P_{Batt}$ ). La fonction de répartition de ces deux puissances s'établit dans le respect des caractéristiques des deux sources électrochimiques [45]. La batterie étant capable de délivrer une puissance importante avec une grande dynamique, son rôle est de répondre aux transitoires de puissance qui pourraient affecter directement la tension du bus continu. Le contrôle du hacheur "buck-boost" dédié à la batterie est donc dévolu à l'asservissement de la tension du bus DC. La consigne de cet asservissement peut éventuellement être adaptée par une stratégie générale visant à minimiser les pertes de l'ensemble convertisseurs – machine. Une telle stratégie prend en compte le point de fonctionnement et s'appuie principalement sur la vitesse du véhicule. Dans le même temps, le contrôle du hacheur "boost" permet de maîtriser la puissance délivrée par la pile qui ne peut varier que lentement (rampe de quelques secondes) afin de respecter la dynamique de la ligne d'air limitée par celle de son compresseur. Transitoirement, la batterie fournit donc l'écart entre la puissance exigée par la chaîne de traction et celle que peut délivrer la PàC ; les réactifs de la batterie étant situés au niveau de ses

électrodes, les variations brusques de puissance n'affectent en aucune manière la durée de vie de la batterie.

D'un point de vue dimensionnel, toutes les possibilités sont envisageables. En effet, si le réservoir de dihydrogène apporte une autonomie élevée par son coût limité et sa haute densité énergétique, les choix de la puissance de la PàC et de l'énergie de la batterie d'appoint sont intimement liés.

L'hybridation légère (qualifiée de « full-power » par Toyota) se trouve à une extrémité de la palette des possibles. Cette solution consiste à attendre de la batterie uniquement la récupération d'énergie ainsi que la compensation des temps de réponse du système PàC et l'assistance des démarrages à froid. Cette architecture conduit à concevoir un système PàC capable de répondre à toutes les puissances à fournir, en particulier les accélérations et les passages de rampes. La batterie doit être capable de fournir sur une courte durée les puissances à fournir et à récupérer ; sa conception est donc typée « puissance ». Ce type d'architecture est courant dans les véhicules particuliers légers développés par les constructeurs asiatiques. Le SUV Hyundai Nexa comme la berline Toyota Mirai en sont deux illustrations (figure 21). Cette dernière embarque une batterie nickel-hydrure métallique (Ni-MH) de faible capacité :  $1,6[kWh]$ . Le système PàC a quant à lui la même puissance nette que la machine électrique de traction :  $114[kW]$ . C'est la raison pour laquelle les anglo-saxons adoptent la terminologie « full-power » pour cette architecture hybride. Le système PàC de la Mirai prélève son énergie dans deux réservoirs de dihydrogène ayant une capacité totale de  $122,4[L]$  qui permet de stocker  $5[kg]$  de  $H_2$  à  $700[bar]$  [46]. La densité massique de ce stockage est de  $5,7\%$  tandis que la densité en puissance de la PàC est de  $3,1[kW \cdot L^{-1}] / 2,0[kW \cdot kg^{-1}]$  ce qui est supérieur à la

cible 2020 du ministère de l'énergie américain (US DoE) ( $2,5[kW \cdot L^{-1}]/2,0[kW \cdot kg^{-1}]$ ) et proche de sa future cible 2025 ( $2,5[kW \cdot kg^{-1}]$ ) [42]

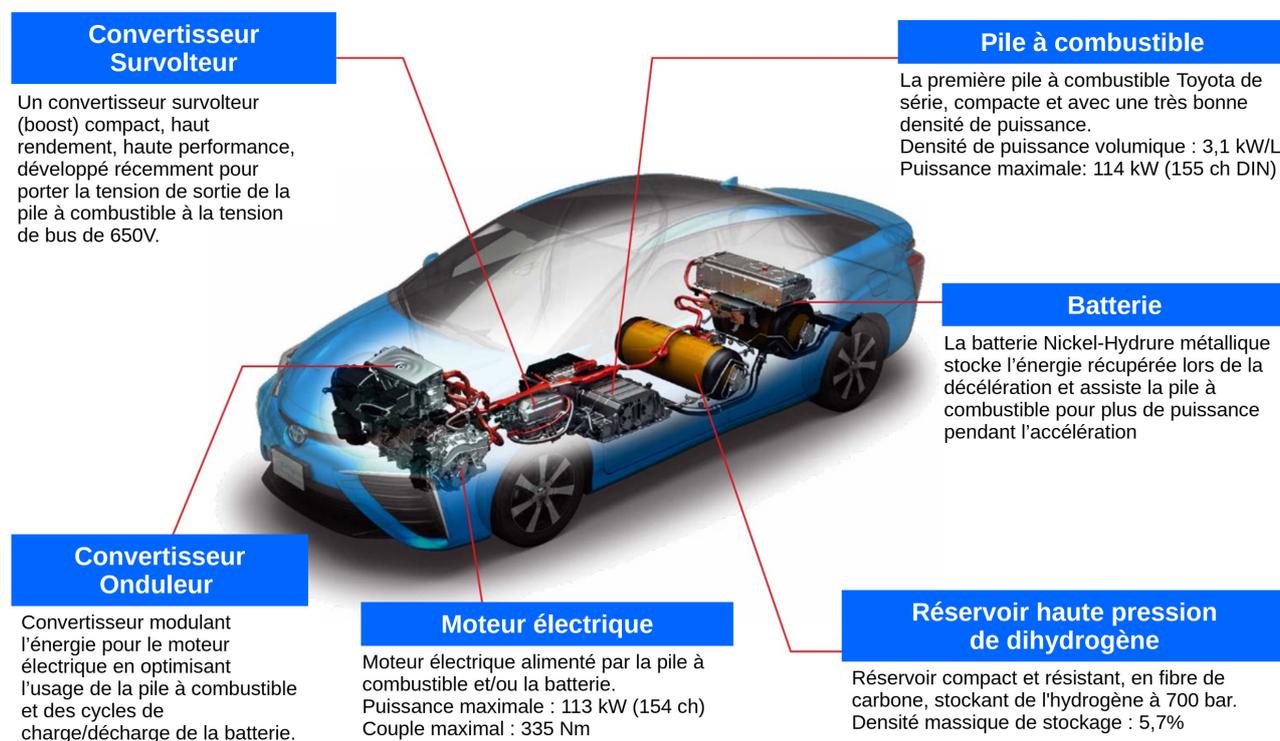


Figure 21 : Berline Toyota Mirai et ses principaux composants [46]

A l'opposé, l'association réservoir  $H_2$  - système PàC peut jouer le rôle de prolongateur d'autonomie. Dans ce cas, la batterie intégrée est celle d'un véhicule électrique à batterie et le système hydrogène permet d'en étendre l'autonomie pour accéder à des usages intensifs. Dans ces conditions, le système PàC est de faible puissance car il est uniquement prévu pour fournir la puissance moyenne requise sur le trajet. Son coût de possession est donc très réduit et son utilisation optimale car proche d'un régime permanent facile à optimiser en termes de rendement et de durée de vie. Cette solution est aujourd'hui adoptée par le groupe Renault qui s'est associé avec la société Symbio (co-entreprise des groupes Michelin et Faurecia) pour produire des véhicules de service hybrides : Renault Kangoo ZE  $H_2$  et Master ZE  $H_2$ . Le véhicule utilitaire léger Renault Kangoo ZE RE $H_2$  est doté d'une batterie Lithium-ion de  $33[kWh]$  ainsi que d'un réservoir de  $1,78[kg]$  de  $H_2$  associé à une pile à combustible de  $5[kW]$ . Cette dernière valeur doit être comparée à la puissance nominale de la machine de traction qui est de  $44[kW]$ . Si les véhicules dits « full power » ont un rapport de puissance de 100%, nous voyons que ce rapport tombe à 11,4% dans cette réalisation de type « range extender ». Ce rapport est

encore plus faible (8,8 %) dans le cas du Master ZE Hydrogen, car ce dernier embarque la même PàC (et la même batterie) mais a une motorisation un peu plus puissante ( $57[kW]$ ). Il est d'ailleurs intéressant de noter que le système PàC est optimisé pour une faible dynamique de fonctionnement puisque sa puissance minimale est la moitié de sa puissance maximale:  $P_{PàC}^{min} = 2,37[kW]$ . Cela permet d'obtenir un système PàC compact dont la densité volumique est de  $3,0[kW \cdot L^{-1}]$ . Le Master est équipé de deux réservoirs de  $700[bar]$  de  $106[L]$  en capacité de stocker  $4,18[kg]$  de  $H_2$ . En revanche, le réservoir du Kangoo est de type III avec une pression nominale de  $350[bar]$  et de ce fait plus volumineux que ceux de type IV : le volume de l'unique réservoir de la Kangoo est en effet de  $74[L]$ . En dernier lieu notons que l'apport en énergie électrique est significatif. En effet, en considérant un rendement électrique de 50%, les  $1,78[kg]$  peuvent fournir  $29,7[kWh_e]$  tandis que les  $4,18[kg]$  fournissent  $69,7[kWh_e]$ . Parallèlement, en hiver, lorsque le chauffage est nécessaire, la puissance thermique est fournie par la chaleur produite par la PàC ce qui évite de minorer le trajet réalisable. En fonction du point de fonctionnement du système PàC, la puissance thermique varie entre  $1,6[kWh_{th}]$  et  $4,8[kWh_{th}]$



Figure 22 : Véhicule Utilitaire Léger Renault Kangoo ZE H2 de type « prolongateur d'autonomie » [26]

Entre ces deux taux d'hybridation extrêmes ( $\cong 10\%$  à  $100\%$ ), d'autres architectures ont été développées ; pour ces dernières, les anglo-saxons parlent d'hybridation « mid-power ». Le SUV Mercedes GLC F-cell développé par Daimler en est une illustration parfaite. La capacité de la batterie ( $13,5[kWh]$ ) permet de réaliser les trajets courants :  $50[km]$  d'autonomie en cycle NEDC. Cette autonomie est quasiment multipliée par dix grâce aux  $4,4[kg]$  de  $H_2$  embarqués dans deux réservoirs de type IV ( $700[bar]$ ). La machine électrique de traction peut délivrer une puissance de  $147[kW]$ , alors que le système PàC a une puissance nominale de quelques dizaines de  $[kW]$ , typiquement dans la plage  $[30kW - 80kW]$ , ce qui signifie un taux d'hybridation autour de  $30\%$ . Par ailleurs, la recharge complète de la batterie utilise un chargeur de puissance modeste ( $7,4[kW]$ ) ayant un faible impact sur le réseau électrique et s'effectue dans un temps réduit de  $1H30$  (la capacité nette de la batterie n'étant que de  $9,3[kWh]$ ).



Figure 23 : Véhicule Léger Mercedes GLC F-Cell : hybridation intermédiaire (mild-hybrid) avec une PàC d'une cinquantaine de  $kW$ .

#### 4.4. La ligne thermique (représentée en bleu sur la figure 13)

La gestion thermique constitue un élément essentiel à la fois du point de vue de l'encombrement du système PàC et de son bon fonctionnement.

En premier lieu, il est important de souligner que le système PàC doit évacuer une puissance thermique similaire à sa puissance électrique. Si ce ratio est plus intéressant que dans un moteur thermique pour l'automobile qui a un rendement moyen de l'ordre de  $20\%$  et un rendement maximal de l'ordre de  $40\%$  ( $42\%$

pour un moteur diesel et  $36\%$  pour un moteur à essence), il convient de souligner que la température de refroidissement de la PàC est généralement de  $70[^\circ C]$  seulement alors que pour un moteur thermique elle évolue autour de  $90[^\circ C]$  (avec des excursions particulières entre  $82[^\circ C]$  et  $110[^\circ C]$ ). Cet écart de  $20[^\circ C]$  entraîne un surdimensionnement de la surface de l'échangeur thermique avec l'air ambiant, ce qui modifie le dessin de la calandre et augmente le coefficient de traînée ( $C_x$ ) du véhicule. En effet, dans le cas défavorable du cahier des charges ( $T_{amb}^{max} = 45[^\circ C]$ ), l'écart relatif de  $(T_{refroid} - T_{amb})$  entre le véhicule à PàC et le véhicule thermique classique est de  $-45\%$  ! Pour augmenter la température du fluide thermique, deux voies sont explorées concomitamment. La première consiste à chercher des membranes conservant leurs tenues mécaniques comme leur conductivité protonique au-delà de la limite actuelle de  $80[^\circ C]$  à  $90[^\circ C]$  [19]. L'intérêt de cette première approche est d'augmenter la température de la réaction électrochimique et de réduire la contrainte sur le catalyseur en termes de charge massique par unité de surface et de seuil de concentration d'empoisonnement. La seconde est systémique. Elle consiste à développer un « capteur logiciel » permettant de déduire en temps réel la distribution de température à la surface de la membrane. Le cœur d'un tel algorithme se construit autour d'un modèle de l'AME et de ses amenées nourri en temps réel par les mesures non invasives implantées pour assurer le contrôle du système pile : températures en entrée et en sortie de PàC, débits massiques du circuit de refroidissement, du circuit cathodique et anodique, courant et tension de la PàC, etc. Ce type de modèle existe déjà pour concevoir les AME et les canaux des plaques bipolaires. En revanche, il doit être adapté afin de prendre en compte les contraintes de mise en œuvre temps réel dans un calculateur de bord [47]. Son utilisation systématique permettra d'adopter une démarche moins conservatrice (marges de sécurité importantes pour éviter d'atteindre la température maximale de la membrane) et ainsi d'augmenter la température du circuit de refroidissement.

De plus, nous avons déjà souligné la nécessité de refroidir d'autres constituants que le cœur de pile comme les convertisseurs d'électronique de puissance et la machine électrique à différentes températures, ce qui ne manque pas de complexifier le système et a un impact sur son coût, son volume et sa fiabilité (la thermique

étant un élément hautement critique). Cette volonté d'uniformiser les températures de refroidissement implique un travail sur les différents dispositifs du système : composants grand gap pour les hacheurs et l'onduleur de traction, conception d'une machine synchrone sans terres rares, etc.

Par ailleurs, un important travail porte sur la capacité calorifique de la PàC. En effet, pour obtenir un démarrage rapide de la PàC par temps froid ( $T_{dém}^{min} = -30[°C]$ ), il est impératif de porter la température de la PàC au-delà de  $0[°C]$  avant que l'eau produite n'ait eu le temps de geler et ainsi de boucher les électrodes et d'endommager définitivement leur structure poreuse. Ce travail sur la capacité calorifique rejoint la volonté d'augmenter la puissance massique de la PàC. Aujourd'hui, et grâce à des procédures adaptées d'arrêt (assèchement des électrodes) et de démarrage, la mise en route rapide par grand froid est considérée comme parfaitement maîtrisée [37, 42, 46, 48]. Et de manière plus générale, la gestion thermique est intimement liée à la gestion hydrique de l'AME qui constitue un point essentiel de son bon fonctionnement en régimes transitoires comme en régime permanent [49].

Du point de vue du contrôle (figure 13), le fluide caloporteur est régulé en température entrante et sortante grâce (i) à la maîtrise de son débit massique (en effet,  $\Delta T$  est d'autant plus faible que ce débit est élevé) et (ii) de la puissance calorifique évacuée (au travers du coefficient d'échange entre le dissipateur et l'ambient). Enfin ajoutons que cette gestion thermique, quel que soit le point de fonctionnement, est rendue délicate par la variété de situations. À titre d'exemple, le compresseur a tendance à échauffer l'air comprimé : à ce titre, l'air apporté à la PàC peut nécessiter un refroidissement lors de fonctionnements à pleine puissance, alors que l'air insufflé à faible puissance peut nécessiter un

réchauffement en entrée de PàC. L'amenée d'air à la chambre cathodique nécessite donc des échangeurs pilotés.

#### 4.5. Rendement système

Les quatre paragraphes précédents ont montré le système PàC dans sa complexité structurelle et la sophistication de sa gestion. Ces deux aspects sont intimement liés à la volonté initiale de découpler les optimisations de puissance (PàC) et d'énergie (réservoir  $H_2$ ). Nous avons donc ainsi pu constater que le fonctionnement du système PàC nécessite de nombreux auxiliaires pour synchroniser la demande de puissance électrique avec les conditions optimales de fonctionnement de la PàC. Ceux-ci ont une consommation indexée à la puissance électrique nette délivrée : cette puissance auxiliaire est toutefois non nulle lorsque la puissance nette l'est. Aussi, le rendement du système PàC est-il systématiquement inférieur à celui de la PàC : très faible voire nul lorsque la puissance prélevée est réduite, le rendement système se rapproche du rendement de la PàC (sans l'atteindre) lorsque la charge augmente. Aussi, la courbe de rendement système en fonction de la puissance prélevée suit-elle une courbe en cloche avec un maximum à une puissance nette intermédiaire (figure 24). Sur cette figure, on constate que le rendement moyen sur un profil de mission sera diminué par les périodes d'utilisation à faible charge. C'est en ce sens qu'une hybridation plus significative (mild-hybrid voire range extender), permettant de découpler la demande instantanée de la puissance PàC, peut assurer un meilleur rendement global qu'une hybridation avec une batterie de faible énergie (full hybrid) [50].

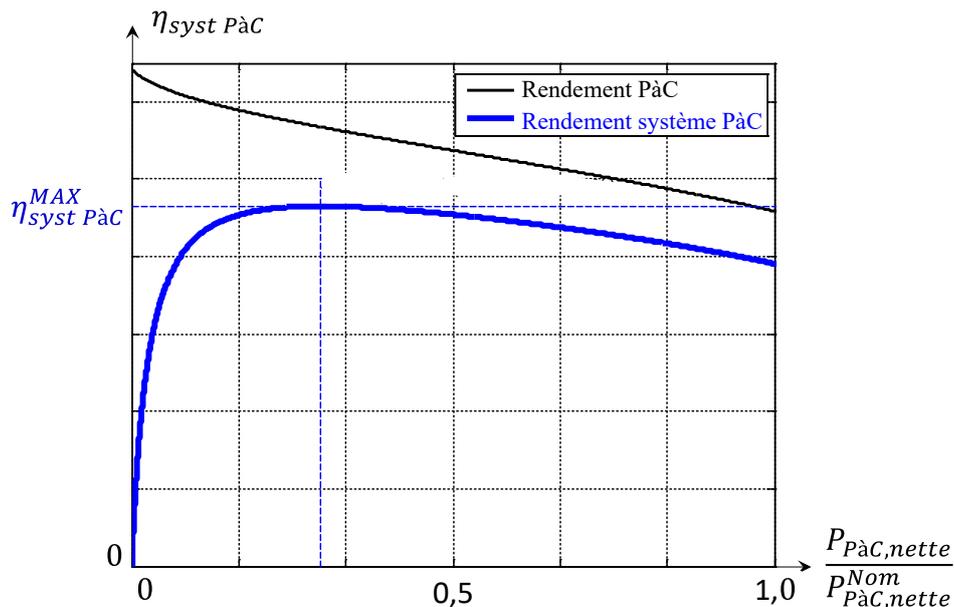


Figure 24 : courbe de rendement d'un système pile à combustible

## 5. Bibliographie

- [1] AC Olsson, et al., “Exposure to diesel motor exhaust and lung cancer risk in a pooled analysis from case-control studies in Europe and Canada”, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, Octobre 2011, 183(7):941-8, doi: 10.1164/rccm.201006-0940OC, Epub 2010 Oct 29.
- [2] Kate Kelland, “Diesel exhaust fumes can cause cancer, WHO says”, Reuters, 12 juin 2012.
- [3] BP Statistical Review of World Energy 2019
- [4] J. Lambert and Charles Hall, “EROI of Global Energy Resources Preliminary, Status and Trends”, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, 2012
- [5] M.C. Guilford, C.A. Hall, P. O'Connor, C.J. Cleveland, “A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production”, *Sustainability* 2011, 3, 1866-1887.
- [6] Nabil Wakim, « Le modèle du pétrole de schiste américain suscite des interrogations - la fracturation hydraulique nécessite des dépenses importantes et la rentabilité tarde à venir », *Le monde*, mardi 13 août 2019.
- [7] Daniel Chatroux, « Transport électrique routier – Batteries pour véhicules électriques », *Techniques de l'Ingénieur*, D5565, 10 mai 2015
- [8] Eric Labouré, « Recharge sans contact de véhicules électriques », *La Revue 3EI*, N°100, Avril 2020
- [9] Fabrice Le Berr, Anthony Juton, « Le véhicule électrifié, une solution d'avenir pour l'automobile ? », *La Revue 3EI*, N° 99, Janvier 2020
- [10] Frano Barbir, “PEM Fuel Cells: Theory and Practice”, Edition 2, 31 décembre 2012, Academic Press, ISBN 9780123983725
- [11] Valérie Sauvant-Moynet, François Orsini, Anthony Juton, « Les batteries », *La Revue 3EI*, N° 99, Janvier 2020
- [12] Y. Hasuka, H. Sekine, K. Katano, and Y. Nonobe, “Development of Boost Converter for MIRAI”, SAE Technical Paper, 2015-01-1170, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1170.
- [13] Zhigang Qi, Arthur Kaufman, “Activation of low temperature PEM fuel cells”, 2002.
- [14] Changxing Yang, Mingruo Hu, Chen Wang, Guangyi Cao, “Activation of proton-exchange membrane fuel cells via CO oxidative stripping”, 2005.
- [15] Hyundai Motor Company Patent, “Apparatus and method for acceleratively activating fuel cell”, 2011.
- [16] Xiao-Zi Yuan, Shengsheng Zhang, Jian Colin Sun, Haijiang Wang, “A review of accelerated conditioning for a polymer electrolyte membrane fuel cell”, 2011.
- [17]. Zhigang Qi, Arthur Kaufman, “Quick and effective activation of proton exchange membrane fuel cells”, 2002.
- [18] Amani Al-Othman, Paul Nancarrow, Muhammad Tawalbeh, Ahmad Ka'ki, Karim El-Ahwal, Bassam El Taher, Malek Alkasrawi, “Novel composite membrane based on zirconium phosphate-ionic liquids for high temperature PEM fuel cells”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.112, en cours de publication.
- [19] R.E. Rosli, A.B. Sulong, W.R.W. Daud, M.A. Zulkifley, T. Husaini, M.I. Rosli, E.H. Majlan, M.A. Haque, “A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, N° 14, 2017, pp. 9293-9314, ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.211.
- [20] “Non-Precious Metal Catalysts: Cathode Catalyst Layer Design Considerations for High Performance and Stability”, conférence SSI-21, Padoue, Italie. juin 2017
- [21] Anna Ostroverkh, Viktor Johánek, Martin Dubau, Peter Kúš, Ivan Khalakhan, Břetislav Šmíd, Roman Fiala, Michal Václavů, Yevhenii Ostroverkh, Vladimír Matolín, “Optimization of ionomer-free ultra-low loading Pt catalyst for anode/cathode of PEMFC via magnetron sputtering”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, N° 35, 2019, pp. 19344-19356, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.206>.
- [22] A Oedegaard, C Hebling, A Schmitz, S Møller-Holst, R Tunold, “Influence of diffusion layer properties on low temperature DMFC”, *Journal of Power Sources*, Vol. 127, N° 1–2, 2004, pp. 187-196, ISSN 0378-7753, doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.015.
- [23] Yu Leng, Pingwen Ming, Daijun Yang, Cunman Zhang, “Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, flow channel design and forming processes”, *Journal of Power Sources*, Vol. 451, 2020, 227783, ISSN 0378-7753, doi : 10.1016/j.jpowsour.2020.227783.
- [24] Tabbi Wilberforce, Zaki El Hassan, Emmanuel Ogungbemi, O. Ijaodola, F.N. Khatib, A. Durrant, J. Thompson, A. Baroutaji, A.G. Olabi, “A comprehensive study of the effect of bipolar plate (BP) geometry design on the performance of proton exchange membrane (PEM) fuel cells”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 111, 2019, pp. 236-260, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2019.04.081.
- [25] Clemens Fink, Nicolas Fouquet, “Three-dimensional simulation of polymer electrolyte membrane fuel cells with experimental validation”, *Electrochimica Acta* 2011, Vol 56, Num 28, pp 10820-10831, doi: 101016/j.electacta201105041.
- [26] Jean-Philippe Poirot-Crouvezier, « Transport électrique routier – Véhicules à pile à combustible », *Techniques de l'ingénieur*, D5570, nov. 2015.
- [27] Yafei Chang, Yanzhou Qin, Yan Yin, Junfeng Zhang, Xianguo Li, “Humidification strategy for polymer electrolyte membrane fuel cells – A review”, *Applied Energy*, Vol. 230, 2018, pp 643-662, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.125>.
- [28] A. Casalegno, S. De Antonellis, L. Colombo, F. Rinaldi, “Design of an innovative enthalpy wheel based humidification system for polymer electrolyte fuel cell”,

International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, N° 8, 2011, pp 5000-5009, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.012>.

[29] Hiroyuki Yumiya, Mikio Kizaki, Hisao Asai, “Toyota Fuel Cell System”, EVS28, May 2015, Corée, World Electric Vehicle Journal Vol. 7 - ISSN 2032-6653, 2015 WEVA

[30] AFHYPAC, « stockage de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé », mémento de l'hydrogène, fiche 4.2, [http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche4.2 - Stockage hydrogène comprimé\\_rev d ec2016 ThA.pdf](http://www.afhypac.org/documents/tout-savoir/Fiche4.2 - Stockage hydrogène comprimé_rev d ec2016 ThA.pdf)

[31] Bruno G. Pollet, Shyam S. Kocha, Iain Staffell, “Current status of automotive fuel cells for sustainable transport”, Current Opinion in Electrochemistry, Vol. 16, 2019, pp 90-95, ISSN 2451-9103, doi: 10.1016/j.coelec.2019.04.021.

[32] Nicolas Linse, thèse de doctorat, Start/stop phenomena in polymer electrolyte fuel cell”, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20132, 2012, , <https://doi.org/10.3929/ethz-a-007110293>

[33] C.A. Reiser, L. Bregoli, T.W. Patterson, J.S. Yi, J.D. Yang, M.L. Perry, T.D. Jarvi, “A reverse-current decay mechanism for fuel cell”, Electrochemical and Solid-State Letters 8 (2005) A273–A276.

[34] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, “A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation”, Journal of Power Sources, Volume 194, Issue 1, 20 October 2009, Pages 130-145

[35] C. Grolleau, C. Coutanceau, F. Pierre, J. Leger, “Effect of potential cycling on structure and activity of Pt nanoparticles dispersed on different carbon supports”, Electrochimica Acta 53(24), 2008, 7157-7165

[36] Xavier Rain, « Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques », La Revue 3EI, N° 99, Janvier 2020

[37] Norishige Konno, Seiji Mizuno, Hiroya Nakaji, and Yuji Ishikawa, “Development of Compact and High-Performance Fuel Cell Stack”, SAE Int. J. Alt. Power. 4(1):123-129, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1175>.

[38] Toufik Azib, Olivier Béthoux, Ghislain Remy, Claude Marchand, Eric Berthelot, “An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitors Power Source”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, N° 12, December 2011, pp 4024 - 4031, DOI: 10.1109/TIE.2010.2044123.

[39] Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Béthoux, Daniel Hissel, Zoubir Khatir, “A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications”, Energy Conversion and Management, Volume 105, 15 November 2015, pp. 716-730, ISSN 0196-8904, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.060.

[40] Olivier Béthoux, Eric Labouré, Ghislain Remy, Eric Berthelot, “Efficiency-optimal power partitioning for improved partial load efficiency of electric drives”, Electric Power Systems Research, Vol. 142, January

2017, pp.176-189, ISSN 0378-7796, doi: 10.1016/j.epsr.2016.09.014.

[41] B. Wahdame, L. Girardot, D. Hissel, F. Harel, X. François, D. Candusso, M.C. Pera, L. Dumercy, “Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2018 (ISIE 2018), pp. 1495-1500, June 30 2018-July 2 2018.

[42] U.S. DRIVE, “Fuel Cell Technical Team Roadmap”, November 2017

[43] Antoine Cizeron, Javier Ojeda, Olivier Béthoux, « Perspectives d'intégration pour la chaîne de conversion d'énergie des véhicules électrifiés », La Revue 3EI, N° 100, Avril 2020

[44] B. Davat, S. Astier, T. Azib, O. Béthoux, D.Candusso, G. Coquery, A. De Bernardinis, F. Druart, B. Francois, M.G. Arregui, F. Harel, D. Hissel, J-P Martin, M-C Pera, S. Pierfederici, S. Rael, D. Riu, S. Sailler, Y. Bultel, T. Creuzet, C. Turpin, T. Zhou, “Fuel cell-based hybrid systems”, Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on, pp.1-11, 1-3 July 2009

[45] Toufik Azib, Olivier Béthoux, Ghislain Remy, Claude Marchand, “Saturation Management of a Controlled Fuel-Cell/Ultracapacitor Hybrid Vehicle”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 60, N° 9, November 2011, pp 4127 - 4138, doi: 10.1109/TVT.2011.2165092.

[46] Toyota, “outline of the Mirai”, [https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota Mirai FCV\\_Posters\\_LR\\_tcm-11-564265.pdf](https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/Toyota Mirai FCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf)

[47] E. Tardy, F. Courtois, M. Chandesris, J.-P. Poirot-Crouvezier, A. Morin, Y. Bultel, “Investigation of liquid water heterogeneities in large area PEM fuel cells using a pseudo-3D multiphysics model”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 145, 2019, 118720, ISSN 0017-9310, doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118720.

[48] Yueqi Luo, Kui Jiao, “Cold start of proton exchange membrane fuel cell”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 64, 2018, pp. 29-61, ISSN 0360-1285, doi: 10.1016/j.pecs.2017.10.003.

[49] F. Nandjou, J.-P. Poirot-Crouvezier, M. Chandesris, J.-F. Blachot, C. Bonnaud, Y. Bultel, “Impact of heat and water management on proton exchange membrane fuel cells degradation in automotive application”, Journal of Power Sources, Vol. 326, 2016, pp. 182-192, ISSN 0378-7753, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.07.004.

[50] A. Ceschia, T. Azib, O. Béthoux and F. Alves, (2020), “Optimal design methodology for sizing a fuel cell/battery hybrid power source”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, doi: 10.1177/0957650920910346

# LES VÉHICULES ROUTIERS FONDÉS SUR LA PILE À COMBUSTIBLE À HYDROGÈNE / PERSPECTIVES POUR LA PILE À COMBUSTIBLE ET L'INFRASTRUCTURE HYDROGÈNE DANS LE TRANSPORT ROUTIER (PARTIE 2)

OLIVIER BÉTHOUX, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS À SORBONNE UNIVERSITÉ, ENSEIGNANT-CHERCHEUR AU LABORATOIRE GEEPS

**Résumé :** Porté par quelques marchés de niche et une recherche applicative de quelques décennies, les systèmes pile à combustible (PàC) tendent progressivement vers une maturité, au point que de nombreux acteurs se posent la question de l'intérêt et de l'intensité de son déploiement dans le secteur du transport en général. Ces 2 articles visent à éclairer ce débat du point de vue du transport routier. La contribution se focalise essentiellement sur la description du véhicule à PàC afin d'en comprendre les atouts, les limites et les voies actuelles de progrès.

Ce second article questionne la pertinence de la solution hydrogène pour le transport routier, rendue très concrète par la maturité à venir des systèmes PàC. Aussi, l'article ouvre-t-il une fenêtre de réflexion sur le déploiement de la mobilité hydrogène au travers d'indications sur les éléments structurants de la chaîne complète : cette dernière inclut la production, le stockage et la distribution du dihydrogène. Ce sujet ouvert et partiellement documenté permet d'aborder la conclusion et les perspectives des applications automobiles à hydrogène.

## 1. Quelles perspectives pour les véhicules hydrogène ?

### 1.1. Véhicules hydrogène : Projets de démonstration en cours

Comme nous l'avons vu dans la première partie de cet article, la recherche appliquée de ces dernières décennies ainsi que les déploiements de systèmes pile à combustible sur des marchés de niche (APU de vols spatiaux, groupes électrogènes silencieux, chaudières fournissant de l'électricité, chariots élévateurs, etc.) ont permis de faire progresser la technologie des piles basse température à membrane échangeuse de protons de manière significative. Les progrès sont dès aujourd'hui suffisants pour se projeter dans une intégration au sein de véhicules routiers permettant d'assurer la puissance de traction. Plusieurs démonstrateurs ont été réalisés, et plusieurs constructeurs proposent des intégrations réussies dans des véhicules légers à PàC de présérie. Les puissances des systèmes PàC embarqués peuvent atteindre la centaine de **kW**. Étant donné que le domaine d'intérêt des véhicules à PàC se centre sur les usages intensifs et les charges utiles élevées, il est tout naturel que ces mêmes constructeurs cherchent à décliner leurs solutions vers des véhicules industriels lourds comme des camions et des bus (figure 25). Dans ce contexte, la partie la plus chère (PàC et dans une moindre mesure le réservoir) peut facilement être réalisée par associations de briques élémentaires éprouvées ; cette démarche se réalise avec un découplage total des aspects énergie

(autonomie) et puissance (masse à déplacer). Pour atteindre le stockage suffisant, il suffit d'embarquer le nombre suffisant de réservoirs de dihydrogène. Pour satisfaire la puissance de traction, il suffit de connecter électriquement le nombre adéquat de systèmes PàC. De cette manière, les développements peuvent être beaucoup plus facilement amortis et les coûts réduits, ce qui est un des verrous à lever pour généraliser cette filière en devenir. Par ailleurs, l'association de plusieurs PàC ouvre des degrés de liberté dans leur gestion puisque la puissance globale est issue de plusieurs puissances partielles. Cette architecture permet à la fois d'envisager des stratégies de fractionnement de la puissance en vue d'augmenter le rendement global sur cycle [51] et/ou la durée de vie [52], mais également d'assurer la continuité de service par des fonctionnements en mode dégradé [53, 54]. Par conséquent, le concepteur dispose d'un levier intéressant pour repousser les limites d'usage et atteindre les exigences les plus contraignantes de l'application automobile.

Parmi les multiples exemples de véhicules lourds en cours de déploiement, citons le bus Businova développé par le constructeur français Safran en association avec Symbio et Michelin. Ce bus d'une petite centaine de places est alimenté par une architecture à prolongateur d'autonomie (« range extender »). La machine de traction de **250[kW]** est alimentée tout à la fois par une batterie Lithium-ion de **132[kWh]** et par une pile à combustible de **30[kW]** prélevant son dihydrogène dans 4 réservoirs sous **350[bar]**, embarquant jusqu'à **30[kg]** de carburant gazeux. Dans cette application la

contrainte volumique a été détournée en plaçant les réservoirs sur le toit du bus.

Hyundai, quant à lui, a choisi une architecture « mid-power » pour la réalisation de son poids lourd Xcient FC de 33 tonnes [55]. Celui-ci connecte en parallèle deux piles de  $95[kW]$  et embarque 7 réservoirs de  $700[bar]$  capables de stocker  $35[kg]$  de  $H_2$ . Comme le montre la figure 25-b), ces réservoirs sont logés à l'arrière du tracteur, dans l'espace laissé libre entre celui-ci et la remorque. Notons que l'intégralité du système de stockage à hydrogène (dont les réservoirs) sera produite dès 2021 par l'équipementier français Faurecia (site de Bavans). Du point de vue de l'usage, l'énergie embarquée permet de parcourir  $400[km]$  puisqu'on considère que la consommation moyenne de ce type de véhicule est de  $1200[Wh.km^{-1}]$  à  $1400[Wh.km^{-1}]$ . Ajoutons que si le système PàC a un rôle prépondérant, la batterie reste indispensable pour maintenir une vitesse

de croisière élevée lors des passages de rampe ; pour ce type de poids lourds (Classe 8), on considère usuellement une augmentation de la puissance à la roue de l'ordre de  $100[kW]$  par pourcentage de pente à une vitesse de croisière de  $80[km.h^{-1}]$ . L'ensemble batterie-PàC-réservoir du Xcient FC est de 1 tonne alors que pour le même usage il aurait fallu embarquer 3 tonnes de batterie Lithium-ion. Outre un coût de possession moindre, cela signifie que la charge utile est augmentée de 2 tonnes par rapport au même camion purement à batterie. La charge utile de ce type de camion étant de l'ordre de 60% de la masse totale, ce gain représente 10% de charge utile, sans parler des autres aspects : les dépenses d'investissement (OPEX) élevées d'un véhicule doté d'une batterie Lithium-ion de 3 tonnes, sa fonctionnalité d'usage limitée par de longs temps de recharge (immobilisation non productive) et la nécessité de prélever localement et ponctuellement une puissance très élevée sur le réseau électrique.



Figure 25 : Développement de projets de poids lourds à PàC

a) Bus à hydrogène de Safrabus (Businova) | b) Camion 33T de Hyundai (Xcient-FC)

Dans le transport automobile, les projets pilotes d'utilisation de l'hydrogène énergie existent depuis la fin des années 1990 ; ils atteignent des échelles de préséries depuis la fin des années 2010. Toutes ces expérimentations permettent aujourd'hui de tirer des enseignements, à la fois sur l'écart des performances actuelles par rapport à la cible du marché, mais également sur les progrès réalisés en deux décennies et les évolutions à venir. Les développements suivants considèrent, dans un premier temps, le strict périmètre du véhicule, puis élargissent l'analyse à l'ensemble de l'écosystème : production – transport – distribution du dihydrogène.

### 1.2. Véhicules hydrogène : niveau de maturité des briques technologiques et tendances associées

Le partenariat américain « US Drive » entre le ministère de l'énergie (DoE) et l'industrie automobile américaine émet tous les 4 ans des feuilles de route. La dernière publication date de 2017 et analyse la situation observée pour la comparer avec les objectifs de la filière automobile (« US Drive » pour « Driving Research and

Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability ») [42]. Le ministère de l'énergie (DoE) américain pilote et finance régulièrement des projets sur la question de l'hydrogène-énergie et des piles à combustible [56]. Parallèlement, sous l'égide de l'Union Européenne, l'industrie européenne s'est associée pour piloter et structurer la filière hydrogène dans le programme « Fuel Cells and Hydrogen - Joint Undertaking » (FCH-JU) [57]. Au niveau français, les acteurs de la filière automobile (PFA) ont établi en 2020 des préconisations sur le développement technique de la mobilité hydrogène [58]. Même si les valeurs absolues diffèrent, les constats sont proches. En ce qui concerne le véhicule, les trois défis à relever sont la diminution des coûts ainsi que les augmentations de la durée de vie et de la densité de puissance (figure 26). Pour atteindre ce triple défi, plusieurs leviers sont à la disposition des concepteurs ; toutefois leurs effets peuvent être antagonistes, en particulier sur les critères coût et durée de vie. C'est certainement ce qui rend encore incertain la rapidité des progrès annoncés vers les spécifications techniques rappelées au tableau 1.

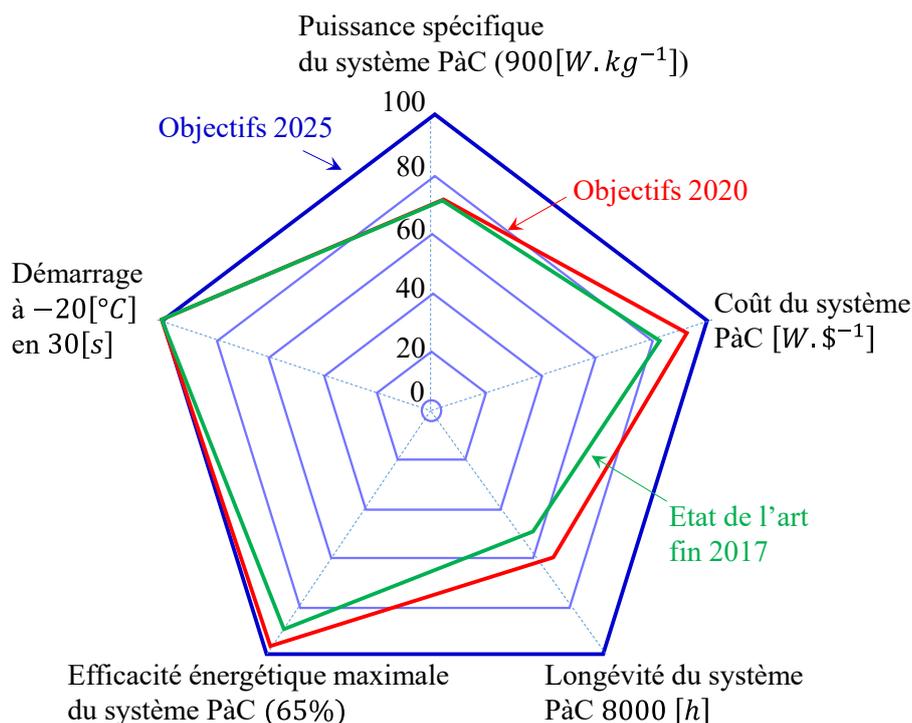


Figure 26 : Comparaison de la feuille de route 2025 des systèmes PàC pour le transport routier par rapport à l'état constaté, en 2017, des performances, d'après [42]  
bleu : feuille de route 2025 | rouge : feuille de route 2020 | vert : constat 2017

Caractéristique du système PàC	Unité	2017	Obj. 2020	Obj. 2025
Rendement énergétique maximal	%	60	65	65
Puissance spécifique (*)	[W.kg <sup>-1</sup> ]	659	650	900
Coût	[\$.kW <sup>-1</sup> ]	45	40	35
Démarrage à temp. ambiante de -20°C	[s]	20	30	30
Longévité sur des cycles automobile	[h]	4130	5000	8000
Temp. de démarrage sans assistance	[°C]	-30	-30	-30

(\*) Si d'un point de vue système, l'objectif de puissance spécifique est de **900[W.kg<sup>-1</sup>]**, celui pour la seule PàC est de **2700[W.kg<sup>-1</sup>]** avec, en 2017, un état de l'art de **2000[W.kg<sup>-1</sup>]**.

Tableau 1 : Spécifications techniques du cahier des charges automobile selon [42]

### Durée de vie

La durée de vie du système PàC est fondamentalement conditionnée par celle de la cellule élémentaire et particulièrement de son AME. La durée de vie est définie comme la durée pendant laquelle la PàC passe de 100 % à 90 % de ses performances. Plus précisément, la tension de la PàC est mesurée à son courant nominal ; une dégradation inférieure à 10 % est attendue. Cette durée moyenne des flottes expérimentées n'a pas cessé d'augmenter, passant de **950[h]** en 2006 à **2 500[h]** en 2009 puis **4130[h]** en 2016. À cette date, le véhicule PàC ayant atteint la plus grande durée de vie effectuait **5648[h]** de fonctionnement. Il reste donc une marge de progression significative avant de satisfaire le cahier des charges de **8000[h]** jugé acceptable par la filière et correspondant

grossièrement à une distance parcourue de **240 000[km]** [42].

Par ailleurs, pour les premières flottes, ayant donc pu être expérimentées sur une plus longue période, on constate que la durée de vie est doublée si on accepte une dégradation de 30 % des performances [42]. On remarque également que plus la taille des particules de platine est importante, plus la durée de vie est élevée [42]. Or le volume d'une sphère étant proportionnel au cube de son rayon alors que sa surface est proportionnelle au carré de celui-ci, on voit bien qu'à quantité de matière donnée (volume), il vaut mieux fragmenter la matière pour en augmenter la surface effective ; l'équation suivante le montre : l'augmentation de  $N$  (fragmentation) implique

l'augmentation de *Surf*, c'est-à-dire des zones potentielles de réaction électrochimique.

$$\begin{cases} Vol \propto Nr^3 \\ Surf \propto Nr^2 \end{cases} \Rightarrow Surf \propto N^{1/3} \times Vol^{2/3}$$

Ce constat montre bien qu'il y a antagonisme entre les deux critères de performance : durée de vie et coût. Cela s'explique par la plus grande fragilité de la liaison platine – polymère – graphite. Une fois la particule libérée de cette zone de triple contact suite à de multiples agressions parasites, elle n'est plus efficace pour favoriser la réaction [59].

### Coût

Le coût du système PàC réside essentiellement dans les constituants suivants : l'AME et particulièrement la membrane et son catalyseur, les plaques bipolaires, les auxiliaires et le réservoir et les systèmes de protection et

de distribution associés. Ces coûts sont liés tout à la fois aux matériaux et aux processus de fabrication à mettre en œuvre. Sans que l'on connaisse leur coût réel, les véhicules légers commercialisés en 2020 ont un prix de vente unitaire d'environ **65[k€]** hors taxes. Au sein de la Communauté Européenne, il faut déboursier **78900€** pour la Toyota Mirai et **79900€** pour la Hyundai Nexo (TTC). Ces réalisations sur des séries très limitées ne permettent pas de donner une idée précise du coût de systèmes produits à grande échelle (dans un premier temps les cibles sont de 500 000 véhicules/an). Néanmoins, certains éléments de réflexion peuvent être apportés afin d'explicitier les principaux leviers de la baisse des coûts. [60, 61]. La figure 27 donne une photographie de la répartition actuelle des coûts des systèmes PàC embarqués d'une puissance de l'ordre de **80[kW]** [61].

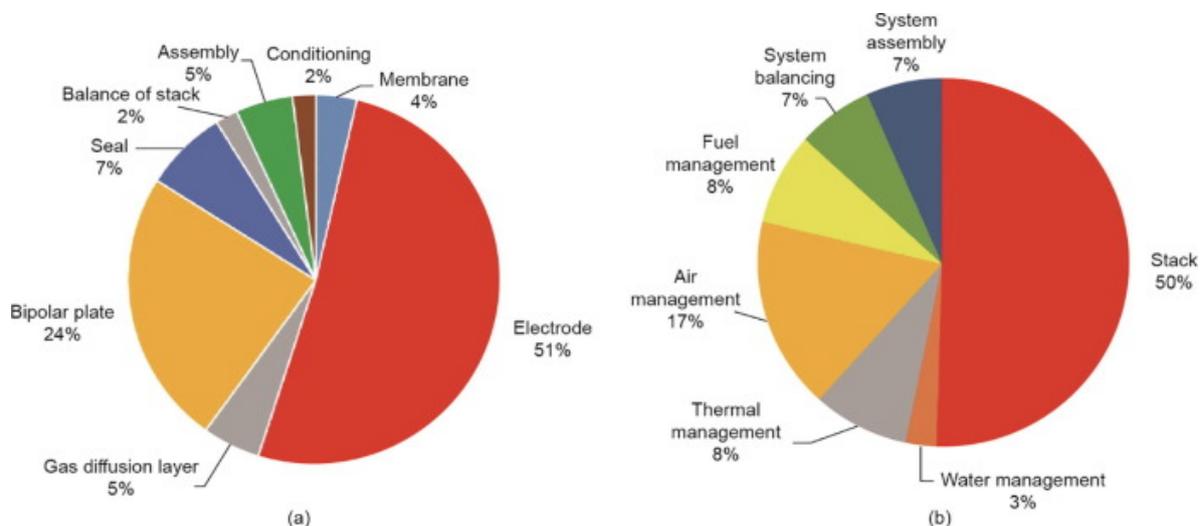


Figure 27 : Répartition des coûts d'un système PàC d'une puissance nette de 80[kW] [61].  
(a) coût de la pile; (b) coût du système PàC complet.

Le dihydrogène est un gaz très réactif entraînant la corrosion des métaux, et cela d'autant plus que le faible rayon atomique de l'hydrogène lui permet de pénétrer profondément à l'intérieur des structures, dont les structures métalliques et ceci même dans les conditions standards. Aussi, observe-t-on une dégradation des propriétés mécaniques des matériaux exposés à un tel environnement agressif [62]. Ainsi, la dégradation des plaques bipolaires peut entraîner, entre autres phénomènes préjudiciables, l'augmentation de la chute de tension par accroissement de la résistance de contact. C'est la raison pour laquelle les plaques bipolaires, particulièrement exposées à la corrosion, doivent être protégées par un revêtement anti-corrosion ayant de plus d'excellentes propriétés de conduction thermique et électronique (pour répondre aux fonctionnalités des plaques bipolaires). Ce traitement (matériaux et processus de dépôt) renchérit le coût des plaques bipolaires, dont on considère aujourd'hui qu'elles comptent pour 20 à 30 % de la valeur de la cellule [61]. De nombreux travaux visent à prolonger la tendance de diminution du coût des plaques bipolaires [23]. Citons la piste d'un acier inoxydable non traité, comme l'expérimente Hyundai avec la PàC de la Nexo [63, 64],

celle des revêtements très adhérents à l'acier inoxydable, bon marché et avec peu de défauts pour limiter les points de fragilité, et enfin le travail sur les processus de mise en forme afin de pouvoir réaliser au plus près les côtes des canaux qui sont issues d'une démarche d'optimisation [25].

Du point de vue du système PàC complet, les composants auxiliaires qui permettent d'assurer le parfait conditionnement en temps réel du cœur de pile ont également un impact significatif sur les coûts puisqu'ils contribuent à la moitié de son coût (figure 27). Contrairement à une bonne partie de la PàC (électrodes, plaques bipolaires, membranes, couches de diffusion, ...), ces composants auxiliaires sont souvent issus de développements industriels et sont donc déjà arrivés à maturité. Sur ces composants, l'effet d'échelle est globalement très favorable. Toutefois, une autre voie explorée consiste en la simplification du système qui peut avoir le triple avantage de diminuer le coût, l'encombrement et d'augmenter la fiabilité. Comme déjà décrit précédemment, une conception optimisée de la pile peut conduire à garantir l'auto-humidification adaptée de l'AME, supprimant ainsi l'humidificateur [65]. Une autre piste éventuellement complémentaire

consiste à développer une membrane capable de supporter des températures un peu plus élevées, ce qui permettrait de réduire la taille de l'échangeur thermique et potentiellement de s'affranchir de l'humidificateur d'air. De plus, comme évoqué précédemment, s'affranchir de multiples températures de refroidissement est également un levier significatif dans la baisse des coûts (ainsi que des volumes et des occurrences de défaillances).

En dernier lieu, évoquons la nécessaire diminution du coût du stockage sous pression et du système associé. Cet ensemble est relativement coûteux : en effet, le réservoir doit supporter une pression élevée et des gradients de pression importants lors des remplissages. De plus l'ensemble du dispositif doit être conçu pour éviter les risques liés à sa très grande réactivité. C'est pourquoi, le coût demeure significatif, de l'ordre de **800** [€/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>]. La filière européenne comme la filière américaine se fixent un objectif de réduction de ce coût respectivement à **400** [€/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>] et **300** [€/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>] pour une production de 500 000 unités par an [56, 58]. Pour cela, les effets de volume sont particulièrement attendus.

### Platine

Le platine (Pt) représente la part essentielle du coût des électrodes (figure 27). Toute action conduisant à la réduction de la charge en platine est donc essentielle pour la maîtrise du coût global du système PàC. Notons que cet effort porte principalement sur la couche active cathodique car la réaction de réduction de l'oxygène est beaucoup plus lente que l'oxydation du dihydrogène ; la cathode nécessite donc des charges élevées en Pt, typiquement de  $\cong 0,35$  [mg.cm<sup>-2</sup>] [31]. Plus fondamentalement, et au-delà du strict aspect des coûts, le platine est une matière première critique, puisqu'il est actuellement essentiel pour le fonctionnement des systèmes PàC embarqués dans les véhicules automobiles et qu'il y a un risque majeur sur son approvisionnement. En effet, le platine est un métal précieux et géographiquement mal réparti. Les réserves mondiales de platine sont estimées à 13 000 tonnes avec une répartition concentrée dans peu de pays : principalement en Afrique du Sud (80%) et en Russie. Du point de vue des mines actuelles, en 2017 la production de platine était de 190 tonnes issues à 75 % de l'Afrique du Sud (**143** [t]). Les autres pays producteurs étaient la Russie (**21,8** [t]), le Zimbabwe (**14** [t]), le Canada (**9,5** [t]) et les États-Unis (**4,0** [t]). Ajoutons que les caractéristiques physico-chimiques de ce métal en font un matériau clef pour de nombreuses applications : le secteur automobile absorbe 42% de la production (essentiellement pour les pots catalytiques des moteurs diesel), la joaillerie 38 % tandis que 20% du platine est destiné à d'autres secteurs industriels [66]. Aussi, l'Union Européenne a-t-elle classé le platine (ainsi que le cobalt (Co) nécessaire aux batteries Lithium-ion) parmi les 14 matières premières les plus critiques. On voit ainsi que le passage de la production de présérie à la production de masse peut se heurter à un mur. C'est la raison pour laquelle la filière automobile envisage la réduction de la charge de platine afin que

l'industrie automobile procède à un transfert d'usage des pots catalytiques de motorisation de type diesel vers les électrodes de PàC embarqués dans les véhicules électrifiés. Ce scénario est d'autant plus réaliste que des filières de recyclage très efficaces se sont développées : on considère qu'il est possible de récupérer 95 % du platine d'un pot catalytique [58]. Par ailleurs, dans un scénario complémentaire et plus lointain, les fabricants d'électrodes pourraient parvenir à obtenir les performances exigeantes de l'application automobile avec des catalyseurs sans platine.

Ces dernières décennies la réduction de la charge en Pt par unité de surface a été régulière et très significative (figure 28) [26]. Les systèmes PàC actuellement embarqués pour la traction automobile atteignent un niveau de performance de l'ordre de **0,125 g<sub>Pt</sub>/kW<sub>elec</sub>** [42]. Ce qui signifie qu'il faut une dizaine de grammes de platine pour assurer la conversion électrochimique  $H_2 \rightarrow W_{elec}$  d'un véhicule électrique léger à PàC : **12,5 g<sub>Pt</sub>** pour **100** [kW]. Comparativement, pour le post-traitement des gaz issus de la combustion, les pots d'échappement catalytiques des véhicules diesel d'environ 100 [kW] ont une charge en platinoïdes (c'est-à-dire le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt)) de l'ordre de **3** [g], avec typiquement 2/3 de Pt et 1/3 Pd. Concernant les véhicules à essence de même puissance, l'ordre de grandeur est de **1 à 2** [g] de métaux précieux par véhicule avec un ratio typique de : 90%Pd / 10%Rh. Il apparaît donc vital pour développer une filière automobile à hydrogène de réduire la charge en platine d'un facteur 10, voire de s'en passer. Les voies explorées consistent à garantir une meilleure répartition des nano grains de catalyseur ainsi que de privilégier des catalyseurs bi ou tri-métalliques. Ces deux démarches doivent prendre en compte le cycle de vie de l'électrode : une meilleure intégration du Platine réduit son utilisation mais rend plus difficile et contraignant son recyclage. Cette démarche conduira donc fatalement à un compromis entre intégration et recyclage. La troisième voie explorée est de concevoir des catalyseurs sans platine voire sans platinoïdes (à savoir le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'iridium (Ir) et le platine (Pt) qui tous sont des composants extrêmement rares sur la croûte terrestre). Cette possibilité a déjà été explorée avec succès permettant la réalisation de PàC beaucoup moins compactes que celles envisagées dans les applications automobiles [67, 68]. En effet, l'activation de la réduction du dioxygène exige de grandes quantités de ces catalyseurs, augmentant d'un facteur 100 l'épaisseur de la couche active (par rapport à la catalyse fondée sur les platinoïdes) ce qui induit une augmentation substantielle des pertes ohmiques et de transport [31]. De plus, ces AMEs utilisant des catalyseurs sans platinoïdes souffrent d'une durée de vie diminuée par une dégradation plus rapide de leurs sites catalytiques par production cathodique plus importante de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) sous-produit très corrosif que l'on cherche à éviter [69]. Intégrer des systèmes PàC sans

platinoïde dans l'automobile demeure, en 2020, un grand défi ; la capacité à le relever dans cette forme radicale ou plus simplement dans la réduction drastique de la charge en Pt aura un impact sur l'intensité de la pénétration de la filière hydrogène dans le secteur de l'énergie et dans celui des transports en particulier.

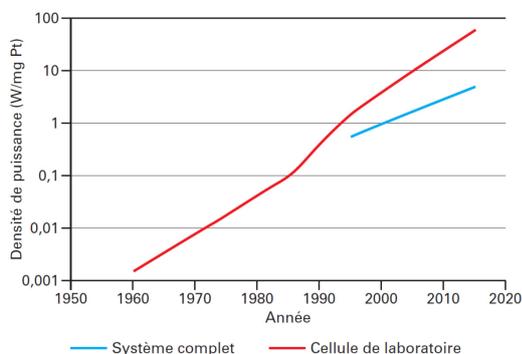


Figure 28 : Evolution sur 6 décennies de la charge en platine dans les PàC de type PEM [26].

## 2. Développement d'une infrastructure

La perspective d'envisager, à moyen terme, la généralisation des véhicules routiers (voitures, camions, bus, engins de chantier) à PàC nous conduit à penser l'ensemble de l'infrastructure nécessaire pour diffuser cette technologie. Cette vision générale nous amène à confronter la pertinence de la mobilité ainsi créée vis-à-vis des enjeux européens et mondiaux : une mobilité « bas carbone », un raccourcissement des chaînes logistiques, une résilience aux pénuries des sources d'approvisionnement et une souveraineté régionale. Cela nous entraîne donc à prendre du recul par rapport au seul véhicule et à envisager le dihydrogène comme un vecteur énergétique à produire, transporter, stocker et distribuer. La partie dédiée à l'infrastructure à développer est traitée d'un point de vue système avec la volonté d'esquisser les principaux déterminants qui la gouvernent. Il est important de noter qu'une telle infrastructure  $H_2$  existe depuis plus d'un siècle mais que la généralisation du vecteur hydrogène énergie au transport conduira à en augmenter considérablement l'intensité et à ramifier cette infrastructure à une échelle très fine jamais envisagée jusqu'alors.

Pour obtenir une bonne pénétration commerciale de ce type de véhicule, la filière automobile française considère que le prix du  $H_2$  distribué au client doit être de **7,3 €/kg** (TVA comprise, hors marges) [58]. Outre les taxes, la construction de ce coût est influencé par le mode de production, mais également par le stockage, l'acheminement et la distribution finale.

### 2.1. Production de dihydrogène

Si l'élément hydrogène  $H$ , premier élément du tableau périodique, est un des plus abondants de l'univers et de la terre, il n'en reste pas moins que sa présence sous forme de gaz dihydrogène  $H_2$  est rarement observée et globalement mal comprise. A ce stade, le dihydrogène est donc un vecteur énergétique produit à

partir des multiples molécules (eau, hydrocarbures, biomasse, etc.) dans lesquelles les atomes d'hydrogène sont insérés. Comme on l'a vu, son intérêt énergétique réside dans sa grande densité massique et volumétrique (si tant est qu'il est à de hautes pressions) et sa rapidité et sa relative facilité de transvasement des hautes vers les plus basses pressions.

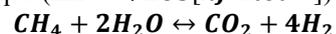
D'un point de vue industriel, le dihydrogène est utilisé depuis plus d'un siècle, quasi exclusivement comme gaz de processus. En 2018, la consommation mondiale de dihydrogène s'est élevée à  $74 \times 10^6 [t_{H_2}]$  : 80% ont été utilisés pour la production d'ammoniac ( $NH_3$ ), produit clef des fertilisants azotés, le reste pour éliminer le soufre des hydrocarbures, comme agent réducteur dans les aciéries, l'industrie du verre, etc. [70]. À cette même date, la France en a consommé environ  $1 \times 10^6 [t]$ . Or, le parc français de véhicules particuliers légers est d'environ  $33 \times 10^6$  unités. 10 millions de ces véhicules, parcourant une moyenne de  $20000 [km]$  chacun, nécessiteraient  $2 \times 10^6 [t]$  de dihydrogène supplémentaire pour le territoire français, ce qui reviendrait donc à tripler la production de  $H_2$ . Cet ordre de grandeur, qui ne prend en compte qu'une partie du besoin de mobilité, montre que l'effort d'investissement sur l'infrastructure de production, mais également de stockage-transport-distribution, est considérable et aura un impact fort sur les bilans écologiques, économiques et sociaux.

La production du dihydrogène peut être réalisée par de multiples processus, dont les niveaux de maturité vont des phases de recherche jusqu'au déploiement d'applications commerciales à grande échelle depuis de nombreuses décennies [71, 72]. Sans entrer dans tous leurs détails, ni viser une description exhaustive, les moyens d'obtenir du dihydrogène de synthèse sont classés en trois grandes catégories [72].

#### Hydrogène gris

Avec 96% de part de marché, l'hydrogène gris obtenu à base d'hydrocarbures représente l'essentiel de la production. Il s'obtient majoritairement à base de méthane (49%), de pétrole (29%) et de charbon (18%) [71]. Il est qualifié de gris car sa production rejette du dioxyde de carbone  $CO_2$ . Le traitement de ces hydrocarbures est réalisé par des procédés thermochimiques.

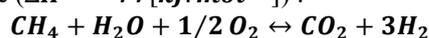
Le vaporeformage du gaz naturel associé à la conversion du monoxyde de carbone est le procédé le plus courant et le moins émetteur de  $CO_2$  : Il nécessite un catalyseur à base de nickel, il émet  $9 [t_{CO_2}]$  pour une tonne de dihydrogène produite, sans compter la part due à l'électricité consommée [73]. En effet, la réaction bilan de ces deux réactions est une réaction globalement endothermique ( $\Delta H = +165 [kJ.mol^{-1}]$ ) :



qui conduit à un rapport massique réactionnel  $m_{CO_2}/m_{H_2}$  de **5,5**. Le facteur **9** vient du système complet qui intègre une étape de purification du gaz de synthèse ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ). Le dihydrogène fourni aux PàC de type PEM doit effectivement être extrêmement pur et n'avoir que des traces d'un grand nombre de

molécules qui empoisonnent les couches catalytiques : parmi celles-ci, la limite acceptable de dioxyde de carbone  $CO_2$  est de **2ppm** tandis que le taux de monoxyde de carbone  $CO$  ne doit pas dépasser **0,2ppm** [72].

Ce reformage à la vapeur est le procédé le plus efficace pour les hydrocarbures légers mais nécessite un apport de chaleur, en général fourni par la combustion d'une partie du méthane. Pour éviter cette dépense énergétique, on procède souvent au reformage auto-thermique [74]. Celui-ci consiste à introduire du dioxygène dans le réacteur afin de favoriser une seconde réaction exothermique : le reformage par oxydation partielle ( $\Delta H = -77[kJ.mol^{-1}]$ ) :



Le gaz de synthèse obtenu en sortie de ce premier réacteur est ensuite purifié dans un second réacteur. Un des procédés possibles réside dans la perméation à travers une membrane conçue pour laisser traverser sélectivement les molécules de petite taille.

Concernant le bilan complet des reformeurs de grande taille, il faut retenir que le rendement énergétique de production d'un dihydrogène purifié à 99,9% en volume (ce qui n'est pas encore suffisant pour une PàC de type PEM) est de  $E_{H_2}/E_{CH_4} \cong 73\%$  (en considérant les PCI des deux gaz) [75, 76]. Le coût du  $H_2$  ainsi produit est fortement lié à celui du méthane. Sur la base du prix de 2017 ( $\cong 17 \text{ €/MWh}$ ), le coût de ce procédé est d'environ **2 €/kg** sans prise en compte du coût financier de la séquestration du  $CO_2$  [77, 78]. En effet, même si les scénarii bas carbone, dont ceux de l'AIE, se fondent tous sur un recours massif à cette séquestration, sa pertinence, comme sa faisabilité, restent encore un sujet ouvert à discussion [79].

L'oxydation du pétrole ou du charbon conduisent à des procédés encore plus émetteurs de  $CO_2$ . Il est donc vain de recourir à ces différents procédés pour généraliser la mobilité hydrogène ; l'ajout d'étapes supplémentaires avant utilisation finale ne peut que concourir à une plus grande émission de  $CO_2$  directe et indirecte (pour la mise en place et l'entretien des procédés technologiques supplémentaires).

### Hydrogène bleu

L'hydrogène bleu est obtenu à partir de moyens de production d'hydrogène gris auxquels on adjoint des technologies supplémentaires de séquestration de carbone (CCUS pour Carbon Capture, Utilisation and Storage, en anglais). Si cette solution est encore envisagée à grande échelle dans les différents scénarii prospectifs de l'AIE (IEA pour "International Energy Agency", en anglais), il est légitime de soulever des doutes quant (i) au modèle économique de cette solution qui ajoute de nombreux processus et donc un surcoût notable, (ii) au modèle énergétique puisque la dissociation du carbone exige beaucoup d'énergie au travers de son transport et de sa compression pour enfouissement, et encore plus fondamentalement, (iii) à la viabilité environnementale puisque la durée effective du stockage dans des couches géologiques profondes n'est pas du tout garantie à ce jour [79, 80].

### Hydrogène vert

En revanche, la baisse très rapide du coût des énergies renouvelables (solaire, éolien terrestre et éolien maritime) laisse entrevoir des productions intermittentes à très grande échelle dans les décennies à venir. La solution la plus rationnelle à tout point de vue est d'électrifier les nombreux usages industriels [78], et pour cela de renforcer la structure des grands réseaux électriques continentaux. Néanmoins, à plus long terme, et pour renforcer la pénétration des énergies renouvelables dans les usages finaux, le vecteur d'énergie dihydrogène peut devenir un maillon essentiel car (i) sa grande densité massique et volumique lui permet de stocker l'énergie intermittente sur de grandes échelles de temps (des mois) et ainsi assurer la désynchronisation des besoins de la production, et (ii) il est très polyvalent puisqu'il peut être produit par l'électrolyse de l'eau grâce à l'électricité éolienne ou solaire (électrolyse) ou la biomasse (dissociation chimique des chaînes carbonées). Cet hydrogène vert est donc clairement l'horizon d'une production de masse de l'hydrogène énergie mais n'a de sens que lorsque les débouchés naturels des ressources renouvelables seront épuisés. Les situations locales sont différentes : le Danemark, avec, en 2019, 60% de pénétration des énergies renouvelables dans son réseau électrique et malgré ses interconnexions électriques avec les autres pays scandinaves pourrait entrer prochainement dans un besoin de flexibilité dihydrogène. D'autres pays comme la Suisse ou l'Autriche avec leur important potentiel de ressources hydrauliques réversibles sont encore loin de devoir recourir à cette nécessité technologique coûteuse d'un point de vue financier et environnemental.

De multiples procédés permettent de produire de l'hydrogène vert (c'est-à-dire sans émissions de gaz à effet de serre) : l'électrolyse de l'eau, l'électrophotolyse de l'eau, la thermolyse de l'eau, des réactions chimiques sur des métaux, etc. [74]. L'électrolyse est une des filières les plus matures pour produire ce dihydrogène vert à partir de ressources renouvelables [74]. Aussi, est-il intéressant de s'arrêter sur cette brique technologique pour en éclairer les enjeux techniques et économiques.

D'un point de vue thermodynamique (cf §2.2. « Principe de fonctionnement et implications » de la partie 1), la dissociation de la molécule d'eau en dihydrogène et dioxygène implique à la fois une énergie électrique minimale  $\Delta G$  qui diminue avec la température de la réaction  $T$  et également une énergie thermique minimale  $T\Delta S$  qui elle augmente avec la température de la réaction. Cette énergie thermique peut être apportée par la valorisation d'une source fatale de chaleur ou plus simplement par les pertes (irréversibilités de la réaction) induites par le processus lui-même. Par conséquent, et du strict point de vue de la cellule élémentaire d'un électrolyseur, il existe un point dit thermo-neutre [81] pour lequel toute l'énergie électrique  $W_{elec}$  fournie est convertie en énergie chimique  $\Delta H$  à l'issue de la réaction. Par ailleurs, la tension nécessaire à la réaction (et donc son énergie) est d'autant plus faible que la température de fonctionnement de l'électrolyseur est

élevée. Comme, par ailleurs, une température élevée signifie le recours à des catalyseurs communs (comme le nickel), on comprend ainsi les efforts actuels pour développer une filière d'électrolyseurs à haute température (de l'ordre de  $900[^\circ\text{C}]$ ), dits EHT en français ou SOE en anglais pour "Solid Oxid Electrolyzer". En particulier pour des raisons de contraintes thermomécaniques entraînant des fatigues rapides, ces électrolyseurs sont encore en cours de développement avec des niveaux de TRL de 3 à 5 [72]. (Le niveau de maturité technologique, dit TRL en anglais pour « Technology readiness level » est communément utilisé par les organismes internationaux. Sur une échelle de 1 à 9, un TRL de 1 signifie que des études papier ont présenté les principes de base d'une technologie alors qu'un TRL de 9 signifie que le système est parfaitement validé en conditions opérationnelles réelles.)

Dans la catégorie des électrolyseurs basse température, les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEME) sont arrivés des niveaux de TRL de 7 à 9 [72]. Leur déploiement commercial est en cours car ils permettent de grandes densités de courant (de  $0,6$  à  $2,0[\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}]$ ), des rendements système corrects (de  $55\%$  à  $70\%$ ), un dihydrogène très pur ( $99,999\%$ ), des fonctionnements dans toute la plage de puissance ( $P_{PEME}^{min} \cong 0\%$  à  $10\%P_{PEME}^{nom}$ ) et une mise en fonctionnement rapide. Ces électrolyseurs supportent à des degrés moindres les défauts des PàC PEM embarquées. Leur dégradation est assez rapide : leur durée de vie est de l'ordre de  $20000[h]$  et leur coût est élevé à cause de couches électrolytiques utilisant des métaux précieux [82]. Ce dernier point est un véritable verrou pour la mise à l'échelle de la production de dihydrogène vert. Historiquement ces électrolyseurs utilisent des alliages platine-palladium (Pt/Pd) à la cathode pour catalyser la réaction de réduction (production de  $\text{H}_2$ ) et des oxydes de Ruthénium et d'Iridium ( $\text{RuO}_2/\text{IrO}_2$ ) à l'anode pour catalyser la réaction d'oxydation (production de  $\text{O}_2$ ). Les efforts de recherche et développement portent donc sur le recours à des métaux plus ordinaires. Côté cathode l'utilisation de sulfure de molybdène ( $\text{MoS}_x$ ) et de Palladium (Pd) conduisent à de bons résultats ; côté anode, pour diminuer la charge en iridium, on recourt à l'association de plusieurs oxydes métalliques (oxydes d'étain et oxydes de tantale) [83].

Pour l'heure, l'électrolyseur alcalin, à électrolyte liquide permettant l'échange de l'ion hydroxyde  $\text{OH}^-$ , est très utilisé et profite ainsi du plus grand retour d'expérience. Son milieu basique permet de s'affranchir de métaux nobles pour catalyser les réactions électrochimiques aux deux électrodes. En plus d'un coût modeste et d'une grande facilité à passer à grande échelle, on constate des durées de vie confortables ( $\cong 90000[h]$ ). Ses inconvénients, qui motivent des recherches dans d'autres technologies, résident dans des densités de courant modérées ( $< 0,45[\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}]$ ), mais surtout dans des rendements systèmes médiocres (de  $50\%$  à  $60\%$ ), une charge réduite plus élevée ( $P_{AE}^{min} \cong 10\%$  à  $40\%P_{PEME}^{nom}$ ) et une mise en fonctionnement plus

longue ( $\cong 15[\text{min}]$ ) [82]. Il est considéré que le TRL de cette filière est de 9. Il y reste néanmoins des voies d'amélioration, par exemple, avec le développement de membranes échangeuses d'anions. Une fois les problèmes de durées de vie résolus, l'utilisation de ces membranes permettrait de simplifier le système, de réduire les pertes ohmiques, de produire un dihydrogène très pur, sans recourir à des catalyseurs nobles fondés sur des platinoïdes [82].

Ce tableau des technologies commercialisées, en développement et en recherche-développement permet d'indiquer qu'il n'y a pas de frein matériel à la généralisation de la brique « électrolyseur ». Toutefois, en 2019, force est de constater que cette production est marginale (ce qui n'était pas le cas avant les années 1950 [84]). D'un point de vue économique, son développement est fortement conditionné par le prix de l'électricité, lié au déploiement à très grande échelle des énergies renouvelables intermittentes, ainsi qu'au prix du méthane et des éventuelles taxes carbone. Plusieurs organismes internationaux (IEA, IRENA par exemple) se lancent fréquemment dans une analyse technico-économique des coûts comparés de production de dihydrogène. Dans une étude récente de l'AIE [78], Cédric Philibert cherche le point de bascule de l'hydrogène bleu vers l'hydrogène vert fondé sur des électrolyseurs. Il montre que le coût de production de ce dihydrogène vert est fixé au premier ordre par le prix de l'électricité dès que le facteur de charge de l'électrolyseur est significatif ( $> 35\%$ ). Compte tenu du foisonnement des multiples énergies renouvelables disponibles, un tel facteur de charge est facilement réalisable. En revanche, cette contrainte exclut le recours aux électrolyseurs dans l'unique but d'écarter les surplus de puissance. Avec les hypothèses adoptées par [78], L'hydrogène vert a un coût plus faible que de l'hydrogène bleu issu du méthane dès que l'électrolyseur fonctionne plus de  $2000[h]$ , c'est-à-dire à un facteur de charge de plus de  $23\%$  (figure 29). Ceci montre qu'avec une volonté politique de basculer vers de l'hydrogène vert, cette option est parfaitement réaliste. En effet, les acteurs économiques n'engagent des investissements qu'avec des certitudes à moyen et long termes ; or ces dernières années, le prix du méthane est incertain mais maintenu relativement bas par l'exploitation à grande échelle des gaz et pétroles non conventionnels. Le signal prix doit donc venir d'une évolution régulière et certaine de la taxe carbone.

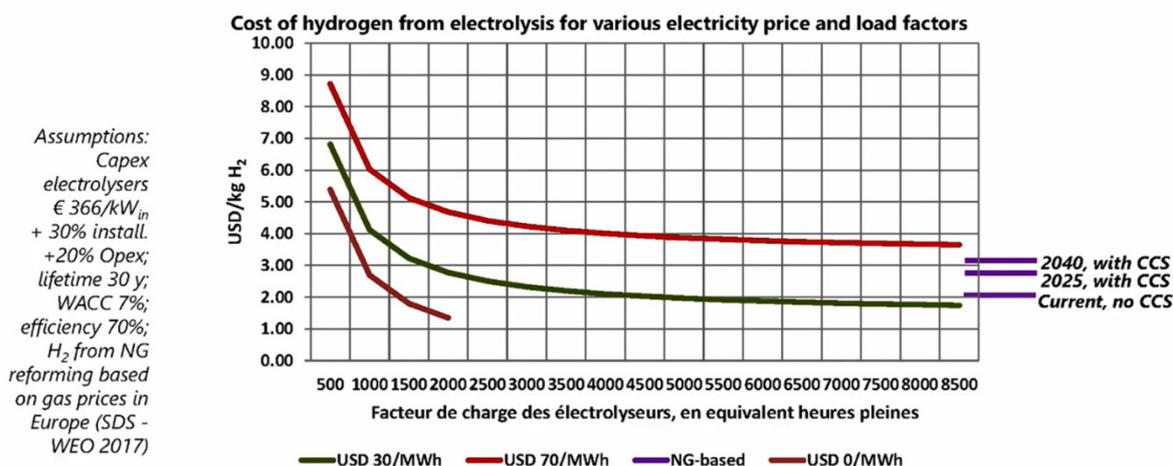


Figure 29: Coût de la production de dihydrogène bas carbone. Comparaison des hydrogènes gris (« no CCS »), bleu (« with CCS ») et vert (« electrolysis »), [78]

Deux points fondamentaux sont à ajouter pour affiner la compréhension du dihydrogène vert : le premier sur l'origine actuelle de l'hydrogène électrolytique (4% de la production mondiale H<sub>2</sub> en 2019) et le second sur le dihydrogène naturel.

En 2020, le dihydrogène électrolytique est très largement un sous-produit de la production intentionnelle de dichlore (Cl<sub>2</sub>) et de soude caustique (hydroxyde de sodium NaOH) [85]. Si cet hydrogène moléculaire fatal est intéressant à récupérer (1\$/kg selon [85]) en sortie de l'électrolyse chlore-soude, car gratuit et relativement pur (99,9%), force est de constater que son exploitation sera très insuffisante pour répondre aux futurs besoins d'une mobilité fondée, même partiellement, sur le dihydrogène [82].

Par ailleurs, si le dihydrogène a longtemps été considéré comme une source naturelle inexistante, plusieurs sites d'émission de dihydrogène ont été repérés. Les premières découvertes ont eu lieu dans des fonds sous-marins, donc économiquement pas viables. Depuis peu, on en constate sur les continents (Islande, Sicile, Californie, Russie, etc.). L'origine de ces émanations n'a pas encore été percée. Toutefois, ces sources émettant un gaz plus ou moins riche en dihydrogène sont désormais activement recherchées par images satellites. Dans ce but, l'Agence spatiale européenne (ESA) a lancé en 2019 le projet sen4H2, pour « Sentinel Data for the Detection of Naturally Occurring Hydrogen Emanations » [74]. L'exploitation à grande échelle de ces gisements pourrait modifier considérablement le paradigme de l'hydrogène-énergie ; celui-ci passerait du statut de vecteur d'énergie à celui de source primaire. Pour l'heure, cette perspective est incertaine et, en cas de potentiel d'exploitation avéré, lointaine.

## 2.2. Stockage de dihydrogène

L'intérêt du vecteur dihydrogène est de permettre de découpler partiellement une conversion des énergies renouvelables intrinsèquement intermittente de la demande d'énergie finale. La question de son stockage statique à grande échelle est donc un point essentiel de ce vecteur énergétique intermédiaire. Le stockage est caractérisé par son coût, l'abondance des matériaux utilisés, ses densités volumique et massique ainsi que la pureté du dihydrogène finalement distribué et la capacité à recevoir ou délivrer des débits importants (c'est-à-dire sa puissance de stockage et de déstockage par débit de matière).

Il existe une très grande variété de moyens de stocker l'hydrogène (sous forme moléculaire ou atomique). Si on considère les niveaux de maturité atteints ainsi que le coût complet de ces stockages, peu d'entre eux sont à même de fournir des solutions à grande échelle. Les seuls moyens de stockage utilisés à l'heure actuelle sont le stockage physique de la molécule de dihydrogène à l'état pur, soit sous forme gazeuse, soit sous forme liquide. D'autres moyens existent qui peuvent être classés en deux catégories. D'une part l'adsorption de la molécule de dihydrogène sur ou dans des matériaux fondée sur des forces de Van der Waals. D'autre part, l'utilisation de liaisons chimiques pour absorber des atomes d'hydrogène dans des matériaux : les hydrures métalliques (à base de Manganèse par exemple) et les hydrures chimiques [83].

### Stockage gazeux

À la pression atmosphérique, le dihydrogène a une faible densité volumique : dans les conditions standards, sa densité volumique est de  $0,091 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , c'est-à-dire que  $1 \text{ kg}$  de H<sub>2</sub> nécessite un volume de  $11 \text{ m}^3$ . Il est donc nécessaire de le comprimer. Toutefois, la loi de Boyle et Mariotte étant hyperbolique, le gain incrémental en densité volumique tend vers zéro au fur et à mesure que la pression croît. En revanche, le coût et la masse des matériaux à utiliser pour assurer cette tenue en pression augmente régulièrement avec la montée en

pression. La pression de stockage de gaz comprimé s'établit à un optimum selon les contraintes du cahier des charges. Si la filière des véhicules a opté pour un stockage embarqué à la pression nominale de 700[bar], force est de constater que celui-ci est coûteux et ne se justifie que pour assurer l'intégration véhicule. Ajoutons que l'on considère à 15% du PCI<sub>H<sub>2</sub></sub>, l'énergie nécessaire pour comprimer le H<sub>2</sub> à cette pression. Pour les applications statiques, les pressions adoptées sont de 100[bar] pour les citernes de surface et de 200[bar] pour les stockages souterrains. Pour les premiers, différentes formes existent ; les pipelines de 1,4[m] de diamètre et quelques kilomètres de longueur sont la solution privilégiée. Le stockage souterrain a l'avantage de limiter l'emprise au sol et de diminuer la déperdition de dihydrogène par perméation du réservoir, mais l'inconvénient de rendre la surveillance plus délicate. Il est intéressant de noter que des stockages géologiques sont envisagés et réalisés. Ils permettent de stocker de grandes quantités de dihydrogène à faible coût. Pour cet usage, les cavités salines paraissent les solutions les plus adaptées vis-à-vis du coût, du niveau de fuite, de la rapidité de remplissage et de restitution du gaz, des risques de contamination de H<sub>2</sub>. Les autres solutions géologiques sont par exemple d'anciennes nappes d'hydrocarbures (pétrole ou méthane). Des stockages emblématiques en cavités salines existent au Royaume-Uni (Teesside) et aux USA (Texas). Si elles sont d'un grand intérêt, ces solutions fondées sur des réservoirs naturels ne peuvent être généralisées et correspondent à des solutions centralisées de grande envergure.

### Stockage liquide

Une solution apparemment séduisante pour améliorer la densité volumique du stockage H<sub>2</sub> est de liquéfier le gaz : à la pression atmosphérique, sa densité volumique augmente à 70kg.m<sup>-3</sup>, mais sa température doit rester inférieure à son point d'ébullition : -253[°C]. Cette opération impose deux déperditions majeures d'énergie et des coûts de stockage importants. Le système de liquéfaction réalise la première consommation énergétique et ceci quelle que soit la durée du stockage. Dans l'état actuel de la technologie, la liquéfaction d'1[kg] de H<sub>2</sub> nécessite l'utilisation de 10[kWh<sub>elec</sub>] = 36[MJ] d'énergie électrique. En considérant le PCI du H<sub>2</sub>, 30% de l'énergie du [kg] de H<sub>2</sub> a été consommée. La seconde déperdition énergétique est liée à la nécessité de maintenir le réservoir à sa température cryogénique. En plus des doubles parois et du calorifugeage, il est important de privilégier les grands volumes de stockage afin de minimiser le rapport surface/volume. Malgré tous ces choix technologiques, on considère que 0,1% d'énergie est perdue par jour. En conclusion, ce stockage ne peut être dédié qu'à des besoins de courtes durées ou de faible constante de temps et pour des applications spécifiques. Les réservoirs de H<sub>2</sub> liquide des fusées en sont l'exemple emblématique [74].

### 2.3. Transport du dihydrogène

Aujourd'hui, deux types de solutions cohabitent pour transporter le dihydrogène et une troisième est en cours de développement.

La première réside dans un réseau de gazoduc pour relier les centres de production de ce gaz aux grands centres industriels chimiques l'utilisant. Ces réseaux sont la propriété des groupes qui les exploitent, comme ceux de Air liquide et d'Air Products dans la région (Pays-Bas – Belgique – Nord de la France – Allemagne rhénane). La figure 30 donne une illustration des réseaux d'environ 1600[km] détenus et exploités par Air Liquide dans cette région. Le système de pipelines travaille à une pression de 3[bar] à 100[bar], est réalisé en acier standard avec des diamètres de 1 à 300[mm], et cette technique peut être considérée comme maîtrisée dans la mesure où le réseau rhénan de 240[km] a été développé en 1938 et est toujours exploité sans accidents [74, 87]. Pour relier de grands centres de production et de consommation avec des débits importants, ce moyen de transport est le moins coûteux. Il est néanmoins adapté pour des distances modestes puisque les auxiliaires assurant le transport consomment 1,4% du PCI de H<sub>2</sub> tous les 150[km]. À titre comparatif, RTE revendique 2,3% de pertes dans l'ensemble du réseau électrique français de transport et de répartition avec une fiabilité exceptionnelle, attestée par un Temps de Coupure Équivalent (TCE) de quelques minutes (1min27s en 2017) [88]. Dans le contexte de la généralisation de l'hydrogène vert, le vecteur électricité et le vecteur hydrogène doivent fonctionner en synergie. Le transport de l'électricité assure la couverture globale et le transport grande distance tandis que l'infrastructure hydrogène est locale et optimisée en fonction des principaux centres de consommation et des zones favorables au stockage massif auprès desquelles les électrolyseurs doivent être installés. Si le stockage saisonnier n'est pas indispensable, l'électrolyse sur site associée à un stockage de faible échelle devient la solution à privilégier !



Figure 30: Pipelines dihydrogène possédés et exploités par Air liquide autour des Pays Bas [87]

Le second moyen de transporter le H<sub>2</sub> réside dans les transports terrestres, soit routier (camions), soit ferroviaire (trains) au travers de casiers de bouteilles en acier de dihydrogène gazeux (200[bar]) et parfois de citernes de dihydrogène liquide. Des expérimentations sont en cours pour augmenter la pression des bouteilles : 700 à 900[bar] ; les bouteilles sont plus chères (CAPEX augmenté) mais l'exploitation plus efficace

(OPEX réduit). Fondamentalement, cette méthode d'acheminement est très coûteuse : elle a un effet considérable sur le prix du  $H_2$  distribué et un impact environnemental majeur. Selon l'ADEME, le transport par camion du dihydrogène émet, tous les 100[km], environ 1[kg] équivalent de  $CO_2$  pour 1[kg] de  $H_2$  transporté [89]. Dans ce contexte, l'ADEME recommande de rester bien en deçà d'une distance de 100[km]. Aussi, le transport routier doit être réservé aux derniers kilomètres pour alimenter les stations-services (qui n'adopteraient pas la solution de l'électrolyseur local).

Le troisième moyen de transport qui en est encore à l'état de projet et de démonstrateur consiste en un transport par bateau longue distance. Ce transport maritime vise à transporter du dihydrogène liquide sur de grandes distances afin de connecter des zones peu denses mais propices à la production d'électricité bas carbone (PV et éolien) avec des zones de fortes consommations de mobilité. L'idée consiste à utiliser les pertes de dihydrogène liées aux réservoirs cryogéniques pour assurer la propulsion du navire.

#### 2.4. Distribution au plus près du besoin

Au début de l'année 2020, le territoire métropolitain dispose d'une trentaine de station de dihydrogène permettant de recharger le réservoir soit à 350[bar], soit à 700[bar], soit aux deux pressions. Certaines stations sont réservées aux flottes captives de véhicules. Le remplissage est rapide : de 3 à 5[*min*] pour 5[kg]. C'est un avantage majeur tant du point de vue de l'immobilisation d'un véhicule à usage intensif que de l'emprise au sol. En effet, les bornes de recharge rapide actuelles ont une puissance de 50[kW] qui ne peut pas toujours être exploitée afin de respecter le seuil de température critique de la batterie. Par conséquent, pour recharger une batterie de 83,3[kWh] correspondant à l'énergie stockée dans 2,5[kg $H_2$ ], le véhicule devrait à minima occuper la borne de recharge pendant 1h20min. Les exploitants de bornes de recharge rapide ne s'y trompent pas en développant un modèle économique fondé essentiellement sur la durée d'occupation de l'espace de recharge. Du strict point de vue de la recharge (rapide), dans le temps de recharge d'un véhicule électrique à batterie (de capacité comparable), la station hydrogène peut recharger 20 véhicules à dihydrogène. Pour ces utilisations intenses, l'occupation au sol de la station à dihydrogène est nettement favorable.

#### 2.5. Sécurité

La sécurité de l'utilisation du dihydrogène à la fois dans le véhicule comme dans l'ensemble de l'infrastructure est un enjeu majeur d'acceptabilité sociale de cette technologie. L'établissement de normes et de réglementations internationales pour les différents

composants et systèmes (stationnaires et portables) existent ou sont en cours d'élaboration pour cadrer la conception, l'utilisation et la maintenance de cette nouvelle application du dihydrogène.

Le dihydrogène est utilisé depuis plus d'un siècle dans les applications industrielles avec un excellent niveau de sécurité. Son utilisation dans un cadre professionnel rigoureux n'est donc pas plus dangereuse que celle du méthane ou d'hydrocarbures liquides.

Les risques sont d'une nature spécifique et la bonne connaissance des dangers permet une utilisation sûre de l'infrastructure et des systèmes finaux. Le dihydrogène est un gaz particulièrement volatil qui, par perméation, pénètre et traverse certains matériaux. D'autre part, le dihydrogène est un gaz qui peut facilement entrer en combustion avec l'oxygène de l'air. L'énergie d'activation de l'inflammation est extrêmement faible : 20[ $\mu$ J], soit dix fois moins que le méthane ! Enfin, la flamme de combustion est incolore, sa température est très élevée ( $\cong 2000[^\circ C]$ ) et sa vitesse très importante ( $\cong 260[cm.s^{-1}]$ ). Néanmoins, l'inflammation ne peut s'obtenir que dans une plage de concentration volumique de [4%; 75%]. La détonation a, quant à elle, lieu dans une plage encore plus réduite [13%; 65%]. La stratégie consiste donc à éviter d'atteindre une concentration de 4% même en cas de défaillance. Du fait de la très grande diffusivité de ce gaz dans l'air (son coefficient de diffusion dans l'air est de 0,61 [ $cm^2.s^{-1}$ ]), il est aisé d'y parvenir en milieu ouvert même avec des réservoirs denses (700[bar] ou liquide). En revanche, les milieux confinés doivent être traités avec la plus grande vigilance pour éviter la formation d'un nuage ; la circulation d'air active ou passive permet d'éviter ce danger du fait de la grande diffusivité évoquée [74, 90]. Un autre danger réside dans l'utilisation fréquente de pressions élevées pour assurer une densité gravimétrique et volumétrique élevée

Le défi de la sécurité réside dans la maîtrise du risque dans le nouvel usage de la mobilité hydrogène. Celui-ci implique une utilisation décentralisée, souvent déconcentrée dans de petites unités et dans les mains du grand public, donc avec des conditions opératoires très variées. À cela s'ajoute des durées de stockage et d'utilisation des véhicules éventuellement très longues et une maintenance mal maîtrisée. Le cadre réglementaire du vecteur hydrogène-énergie est encore en cours de définition entre les acteurs, les centres techniques et l'administration. Au niveau européen, le règlement CE n°79/2009 et sa directive d'application 406/2010 régissent les véhicules PàC et la norme 2014/94/UE détaille les préconisations relatives aux infrastructures pour carburants alternatifs.

Lundi 10 juin 2019, une station à hydrogène a explosé dans la banlieue d'Oslo sans faire de morts, mais créant un accident de la route par déclenchement intempestif des airbags d'un véhicule circulant à proximité. Il semblerait que l'explosion soit due à une fuite de gaz ; les pompiers ont arrêté l'incendie en moins de trois heures [91]. Un mois avant, en Corée du Sud, le

réservoir de dihydrogène d'un projet de recherche gouvernemental a explosé, tuant deux personnes et en blessant six autres [92]. Ces exemples montrent que la sécurité reste un sujet ouvert malgré les précautions que prennent les constructeurs automobiles et les producteurs-distributeurs de dihydrogène pour obtenir des démonstrateurs séduisants pour le grand public.

### 3. Conclusion et perspectives : Réflexion globale sur la place du dihydrogène dans la mobilité électrique

À l'échelle d'un produit de très petite série, plusieurs constructeurs ont su réaliser une intégration réussie des systèmes pile à combustible dans des véhicules légers comme lourds. Depuis plus d'un siècle l'industrie chimique exploite le dihydrogène comme agent de procédé et a, pour ce faire, développé une infrastructure (production – transport – stockage – distribution) fiable et sûre à l'échelle de ces applications fortement centralisées et gérées par des personnels formés.

À l'heure où les sociétés cherchent des solutions de mobilité à faible empreinte carbone, il est légitime de se demander dans quelle mesure les véhicules routiers à hydrogène apportent une solution dans ce plan de décarbonation des transports à l'horizon 2050.

Dans ce contexte de réduction de l'émission de gaz à effet de serre et de polluants dans l'atmosphère, le véhicule électrique à batterie ou celui à PàC doivent se fonder sur une électricité décarbonée issue de sources renouvelables de flux donc intermittentes. Sous le seul angle du rendement de la chaîne de conversion du flux énergétique primaire à la roue, le véhicule à batterie a grossièrement un facteur de performance deux fois meilleur. En effet, le rendement charge-décharge des systèmes batteries Lithium-Ion avoisine les 85%, alors que la succession des conversions dans un système électrolyseur et un système PàC peut être estimée à 35% (70% pour l'électrolyseur et 50% pour la PàC).

Néanmoins, la mobilité hydrogène trouve sa pertinence dans la densité et le coût du stockage  $H_2$  et le fait que le transfert d'énergie par matière est très rapide. Du point de vue du strict usage, cela permet d'atteindre des applications à usage intense : longs parcours journaliers et/ou charge utile importante. D'autre part, cette capacité de stockage peut être utile pour réaliser des stockages saisonniers en recourant par exemple à des réservoirs géologiques comme des cavités salines. Nous avons montré que cette mobilité hydrogène doit, comme la mobilité à batterie, s'appuyer sur un vecteur électrique et donc un réseau électrique renforcé, le réseau hydrogène se déployant à des échelles régionales. En outre, ce déploiement d'une mobilité électrique ne fait sens que lorsqu'on aura décarboné par électrification les usages industriels polluants. Ces premières actions sont en effet nettement plus faciles à mener. Le développement de la mobilité électrique et

particulièrement celle fondée sur le dihydrogène n'a de sens que lorsque les énergies renouvelables électriques seront généralisées et abondantes.

Si la plupart des briques technologiques de la mobilité hydrogène ont déjà atteint, en 2020, des niveaux de maturité intéressants, des verrous technologiques doivent encore être dépassés afin de passer d'usages de niche à des applications de grande série aussi contraignantes que le véhicule. La réduction drastique de l'emploi du platine voire le recours exclusif à des catalyseurs plus communs constitue un des défis à régler, au même titre que la sécurité des systèmes grand public employant le dihydrogène énergie.

Pour que la mobilité hydrogène des applications intensives voit réellement le jour, il paraît nécessaire de développer dès à présent des flottes captives (flottes de camions de transport et de distribution, flottes de bus et flottes de véhicules utilitaires d'entreprises). Ces expérimentations dans un périmètre restreint permettent de se focaliser sur des cas d'usage pouvant déboucher rapidement sur une rentabilité économique. De plus leur déploiement concret, par son articulation inédite de l'ensemble de la filière impliquée par cette mobilité, permettra de capitaliser sur un véritable retour d'expérience et ainsi d'apprendre et de construire les meilleurs compromis en vue d'une généralisation. Ces démonstrateurs préindustriels, en améliorant la connaissance technologique, en travaillant la question de l'acceptation sociétale et en révélant des modèles économiques viables, doivent donner les outils pour trancher la question du déploiement de cette filière et celle de son intensité.

L'Europe industrielle possède des acteurs majeurs dans tous les aspects de la chaîne de valeurs de l'hydrogène-énergie. De plus, le seul élément critique est le platine et plus largement les platinoïdes. Or, si ces métaux précieux et rares sont situés de manière écrasante en dehors de notre continent, il est important de noter que cette filière est encore aujourd'hui bien contrôlée par les entreprises européennes qui en sont de grands utilisateurs. Ce n'est pas le cas des matériaux critiques de la filière des batteries Lithium-ion dont les ressources sont massivement contrôlées par quelques pays asiatiques. Aussi, peut-on voir dans la mobilité hydrogène un levier de souveraineté économique et un outil de diversification d'un grand intérêt stratégique. Cela est d'autant plus vrai que ce vecteur énergétique, en plus des véhicules routiers évoqués, peut s'étendre au transport ferroviaire ainsi qu'au transport maritime et fluvial, et, à plus long terme, au transport aérien.

Cette vision prospective ne saurait être exhaustive sans changer d'échelle d'analyse. Le transport est une donnée anthropologique majeure dont l'essor est mécaniquement poussé par l'augmentation régulière de la population qui suit un rythme élevé : un nouveau milliard d'habitants tous les 14 ans environ [93]. Néanmoins, l'absence de prise en compte de ses

externalités négatives conduit à des optimisations économiques amenant un étirement déraisonnable des chaînes d'approvisionnement et une intensification des déplacements tant pendulaires (domicile-travail) qu'intercontinentaux. Par ailleurs, ce développement se concentre sur le trafic routier et aérien alors que le transport ferroviaire par exemple permet d'assurer un service extrêmement fiable et sûr en recourant à des ressources bien inférieures [94]. La réflexion sur les technologies de la mobilité ne devrait être qu'un des éléments d'une réflexion sociétale globale dans laquelle les vertus cardinales valorisées, l'aménagement du territoire souhaité, l'intégration raisonnée des externalités et la résilience de l'organisation devraient prendre une part centrale [95]. Aussi, malgré les futurs progrès de la filière hydrogène, cette solution apparaît comme un des leviers technologiques incrémentaux qui, à ce titre, ne donne pas les moyens d'attaquer frontalement la problématique de la baisse continue du retour sur investissement énergétique qui met en péril notre civilisation [4, 5, 6, 96]. Il paraît donc exigeant mais raisonnable de mener un travail critique pour redéfinir dans le détail nos vertus cardinales et nos modes de vie [97].

#### 4. Bibliographie

- [4] J. Lambert and Charles Hall, "EROI of Global Energy Resources Preliminary, Status and Trends", State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, 2012
- [5] M.C. Guilford, C.A. Hall, P. O'Connor, C.J. Cleveland, "A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production", *Sustainability* 2011, 3, 1866-1887.
- [6] Nabil Wakim, « Le modèle du pétrole de schiste américain suscite des interrogations - la fracturation hydraulique nécessite des dépenses importantes et la rentabilité tarde à venir », *Le monde*, mardi 13 août 2019.
- [26] Jean-Philippe Poirot-Crouvezier, « Transport électrique routier – Véhicules à pile à combustible », *Techniques de l'ingénieur*, D5570, nov. 2015.
- [31] Bruno G. Pollet, Shyam S. Kocha, Iain Staffell, "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport", *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 16, 2019, pp 90-95, ISSN 2451-9103, doi: 10.1016/j.coelec.2019.04.021.
- [42] U.S. DRIVE, "Fuel Cell Technical Team Roadmap", November 2017
- [51] N. Marx, D. Hissel, F. Gustin, L. Boulon and K. Agbossou, "On Maximizing the Steady-State Efficiency of a Multi-Stack Fuel Cell System", 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, IL, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2018.8605036
- [52] Neigel Marx, Daniel Hissel, Frédéric Gustin, Loïc Boulon, Kodjo Agbossou, "On the sizing and energy management of a hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, N° 2, 2017, pp. 1518-1526, ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.111.
- [53] N. Marx, D. C. Toquica Cárdenas, L. Boulon, F. Gustin and D. Hissel, "Degraded mode operation of multi-stack fuel cell systems", *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 6, no. 1, pp. 3-11, 3 2016, doi: 10.1049/iet-est.2015.0012
- [54] A. De Bernardinis, E. Frappé, O. Béthoux, C. Marchand and G. Coquery, "Multi-port Power Converter for Segmented PEM Fuel Cell in Transport Application. Simulation with fault tolerant strategy", *The European Physical Journal Applied Physics*, Vol. 58, N° 2, May 2012, pp 1-15, doi: 10.1051/epjap/2012120056.
- [55] Vera Eckert, John Revill, "Powered by hydrogen, Hyundai's trucks aim to conquer the Swiss Alps", *Agence Reuters*, 28 février 2020
- [56] DOE, "Hydrogen and Fuel Cells Program, 2019 Annual Merit Review and Peer Evaluation Report", < [https://www.hydrogen.energy.gov/annual\\_review19\\_report.html](https://www.hydrogen.energy.gov/annual_review19_report.html) >.
- [57] "Hydrogen Roadmap Europe, report", *Fuel Cells and Hydrogen - Joint Undertaking (FCH-JU)*, janvier 2019, ISBN 978-92-9246-331-1, doi:10.2843/341510 EG-06-18-327-EN-N, fch.europa.eu
- [58] « Hydrogène et piles à combustible : Position technique de filière », PFA (Filière Automobile & Mobilités), Février 2020, <https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/CRA1-PTF-HYDROGENE-ET-PILES-A-COMBUSTIBLE-VF2.pdf>
- [59] Rodney L. Borup, Ahmet Kusoglu, Kenneth C. Neyerlin, Rangachary Mukundan, Rajesh K. Ahluwalia, David A. Cullen, Karren L. More, Adam Z. Weber, Deborah J. Myers, "Recent developments in catalyst-related PEM fuel cell durability", *Current Opinion in Electrochemistry*, Vol. 21, 2020, pp.192-200, ISSN 2451-9103, doi: 10.1016/j.coelec.2020.02.007.
- [60] S.T. Thompson, B.D. James, J.M. Huya-Kouadio, et al., "Direct hydrogen fuel cell electric vehicle cost analysis: system and high-volume manufacturing description, validation, and outlook", *J. Power Sources* 399 (2018) 304–313.
- [61] J. Wang, H. Wang, Y. Fan, "Techno-economic challenges of fuel cell commercialization", *Engineering* 4 (3) (2018) 352–360.
- [62] Jacques Chêne, "L'hydrogène dans les matériaux métalliques en relation avec les interactions plasticité-environnement", *EDP Sciences*, 2009, *PlastOx 2007* (2009) 131–145 DOI: 10.1051/ptox/2009010
- [63] K. Jonghee, K. Jo, Y. Kim, et al., "Stainless Steel for Polymer Fuel Cell Separator and Method for Preparing Same [P]", U.S. Patent 9290845. 2016-3-22.
- [64] S. Ide, A. Honda, S. Ishikawa, et al., "Stainless steel having good conductivity for use in fuel cell and method for producing the same [P]", U.S. Patent 8,440,029. 2013-5-14.
- [65] Y. Nonobe, Development of the fuel cell vehicle mirai, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.* 12 (1) (2017) 5–9.
- [66] BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), « Panorama 2012 du marché des platinoïdes », rapport public BRGM/RP-63169-FR, janvier 2014, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63169-FR.pdf>
- [67] Bruno G. Pollet, Shyam S. Kocha, Iain Staffell, "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport", *Current Opinion in Electrochemistry*, Volume 16, 2019, Pages 90-95, ISSN 2451-9103, doi.org/10.1016/j.coelec.2019.04.021.
- [68] Yuyan Shao, Jean-Pol Dodelet, Gang Wu, Piotr Zelenay, "PGM-free cathode catalysts for PEM fuel cells: a mini-review on stability challenges", *Advanced Materials* 2019, Volume 31, Issue 31, Special Issue: Materials Electrochemistry for Chemical Transformation, August 2, 2019, 1807615, doi: 10.1002/adma.201807615
- [69] Yuyan Shao, Jean-Pol Dodelet, Gang Wu, Piotr Zelenay, "PGM-Free Cathode Catalysts for PEM Fuel Cells: A Mini-Review on Stability Challenges", *Advanced*

- Materials, Special Issue: Materials Electrochemistry for Chemical Transformation, Vol. 31, N° 31, 2 August 2019, 1807615, doi: 10.1002/adma.201807615
- [70] 68 IEA, “The Future of Hydrogen - Seizing today’s opportunities”, Technology report, juin 2019
- [71] 69 Zainul Abidin, Ali Zafaranloo, Ahmad Rafiee, Walter Mérida, Wojciech Lipiński, Kaveh R. Khalilpour, “Hydrogen as an energy vector”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 120, 2020, 109620, ISSN 1364-0321, doi: 10.1016/j.rser.2019.109620.
- [72] 70 Furat Dawood, Martin Anda, G.M. Shafiullah, “Hydrogen production for energy: An overview”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, N° 7, 2020, pp. 3847-3869, ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.
- [73] 71 AFHYPAC (Association Française pour l'Hydrogène et les piles à combustibles), « Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles », Mémento de l'Hydrogène, fiche 3.1.1, novembre 2019
- [74] 72 Karine SURLA, « Hydrogène », *Techniques de l'Ingénieur*, J6368, 10 mai 2019
- [75] John W. Andrews, Hydrogen production and carbon sequestration by steam methane reforming and fracking with carbon dioxide, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, N° 16, 2020, pp. 9279-9284, ISSN 0360-3199, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.01.231.
- [76] X.D. Peng, “Analysis of the thermal efficiency limit of the steam methane reforming process”, *Ind Eng Chem Res*, 51 (50) (2012), pp. 16385-16392
- [77] AFH2, « Étude technico économique prospective sur le coût de l'hydrogène », 2006
- [78] Cédric Philibert, L'électrification et l'hydrogène dans la transition énergétique, Conférence sur « les défis de la soutenabilité énergétique », ENS Rennes, le 25 octobre 2018.
- [79] IFRI (2019), “Carbon Capture, Storage and utilization to the rescue of Coal? - Global Perspectives and Focus on China and the United States”, Sylvie Cornot-Gandolphe, IFRI, juin 2019
- [80] IRENA (2019), “Hydrogen: A renewable energy perspective”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, ISBN: 978-92-9260-151-5
- [81] Pierre Millet, « Électrolyseurs de l'eau à membrane acide », *Techniques de l'Ingénieur*, J6368, 10 septembre 2007
- [82] Martín David, Carlos Ocampo-Martínez, Ricardo Sánchez-Peña, “Advances in alkaline water electrolyzers: A review”, *Journal of Energy Storage*, Vol. 23, 2019, pp. 392-403, ISSN 2352-152X, doi: 10.1016/j.est.2019.03.001.
- [83] S. Shiva Kumar, V. Himabindu, “Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review”, *Materials Science for Energy Technologies*, Vol. 2, N° 3, 2019, pp 442-454, ISSN 2589-2991, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [84] Cédric Philibert, “Renewable energy for industry”, IEA, OECD, Paris, 2017.
- [85] Dong-Yeon Lee, Amgad Elgowainy, Qiang Dai, “Life cycle greenhouse gas emissions of hydrogen fuel production from chlor-alkali processes in the United States”, *Applied Energy*, Vol. 217, 2018, pp. 467-479, ISSN 0306-2619, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.132.
- [86] Joakim Andersson, Stefan Grönkvist, Large-scale storage of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 23, 2019, Pages 11901-11919, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.063>.
- [87] AFHYPAC (Association Française pour l'Hydrogène et les piles à combustibles), « Le transport d'hydrogène », Mémento de l'Hydrogène, fiche 4.1, novembre 2017
- [88] RTE (Réseau de transport d'électricité), « Bilan électrique 2017 », <https://www.rte-france.com/fr/article/bilans-electriques-nationaux>.
- [89] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), « Fiche technique : l'hydrogène dans la transition énergétique », avril 2018.
- [90] Farida Darkrim-Lamari, Pierre Malbrunot, « Combustible Hydrogène – Utilisation », *Techniques de l'Ingénieur*, BE8566, 10 octobre 2013
- [91] Echo Huang, “A hydrogen fueling station fire in Norway has left fuel-cell cars nowhere to charge”, Agence Reuters, 12 juin 2019
- [92] Hyunjoo Jin, Jane Chung, “Hydrogen hurdles: a deadly blast hampers South Korea's big fuel cell car bet”, Agence Reuters, 25 septembre 2019
- [93] United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics, “World Population Prospects 2019”
- [94] Aurélien Bigo, 2018, « Le train, grand oublié de la transition énergétique ? », *The Conversation*, 20 juin 2018, <https://theconversation.com/le-train-grand-oublie-de-la-transition-energetique-98213>
- [95] Jean-Louis Maupu, « La ville creuse pour un urbanisme durable - Nouvel agencement des circulations et des lieux », *L'Harmattan*, Collection : Villes et entreprises, septembre 2006, ISBN : 2-296-00959-X
- [96] Philippe Bihouix, « L'Âge des low tech - Vers une civilisation techniquement soutenable », *Seuil*, collection : Anthropocène, 03 avril 2014, EAN 9782021160727
- [97] Camille Riquier, « Nous ne savons plus croire », éditions Desclée de Brouwer, 02 mars 2020, EAN : 9782220096605.

## La SEE et la Maison d'Ampère engagées dans le grand projet « Ampère 2020 »



Illustration : Pascal Garnier

En 2018, l'idée de mettre à l'honneur Ampère en 2020 pour le 200-ème anniversaire de la découverte des lois de l'Électrodynamique a donné naissance à un véritable projet qui présente aujourd'hui un programme de manifestations sur l'ensemble de l'année 2020.

Cette commémoration qui vise à faire connaître l'œuvre d'Ampère, à reconnaître ses mérites, son influence et le rayonnement de ses travaux, mais aussi à promouvoir le domaine des sciences de l'Électricité a été présentée à de nombreuses personnalités et a été accueillie favorablement. Les communautés scientifiques et industrielles et aussi les représentants du monde de l'éducation, que nous avons rencontrés dans le courant de l'année 2019, nous ont assurés de leur soutien pour les différentes manifestations que nous organisons.

Pour plus de lisibilité tout au long de l'année, un site dédié a été créé et mis en ligne :

[www.ampere2020.fr](http://www.ampere2020.fr)

---

INFORMATION 3EI

# La Journée 3EI 2020

JOURNÉE 3EI — 26 JUIN 2020

ENS PARIS-SACLAY

4, AVENUE DES SCIENCES  
91190 GIF SUR YVETTE

Le comité de rédaction de la Revue 3EI propose une journée d'échanges sur le thème de la

**PÉDAGOGIE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
ET EN PHYSIQUE APPLIQUÉE**

Abonnez-vous à la



**BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER :**

SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France  
01 56 90 37 17 - abo@see.asso.fr

**BULLETIN D'ABONNEMENT 2020**



**VERSION PAPIER**

5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.  
Distribution postale

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 132,43 € HT



**VERSION NUMÉRIQUE**

Accès aux publications numériques ouvert pendant un an à compter de la date de souscription

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 90 € TTC	<input type="checkbox"/> 88,15 € HT



**VERSION DUO**

Version imprimée + version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 155 € TTC	<input type="checkbox"/> 161,81 € HT

**VERSION PREMIUM**

- > Adhésion SEE avec accès eREE
- + Tarif préférentiel à la revue REE format papier
- + Accès numérique aux revues 3E.I et REE
- + Tarifs préférentiels aux conférences et journées d'études

Adhésion SEE		
Standard	Retraités, enseignants, jeunes actifs (< 35 ans)	Etudiants, en recherche d'emploi
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 65 € TTC	<input type="checkbox"/> 15 € TTC
+ Abonnement REE (Version papier)		
<input type="checkbox"/> France & UE : 63 € TTC		<input type="checkbox"/> Hors UE : 71,70 € HT

TVA de la revue REE : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : sg@see.asso.fr

**MES COORDONNÉES**

Prénom :  Nom :

**ADRESSE DE LIVRAISON**

Adresse :

Code postal :  Pays :

Ville :

Tél. :

e-mail\* :

\* Obligatoire

**MON RÉGLEMENT**

Je règle la somme de  €

- par  Chèque à l'ordre de la SEE  
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

Date de validité  N° cryptogramme  (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieur aux diffusions liés à mon abonnement.

Conformément aux dispositions légales et réglementaires en matière de données personnelles, les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication) pour la mise en place et le suivi de l'abonnement souscrit ainsi que pour l'envoi de courriers, e-mails de réabonnements. Elles sont conservées et sont destinées à être utilisées par la SEE et les prestataires techniques de la SEE afin de permettre la bonne réception du magazine et d'assurer le service client. Vous pouvez exercer votre droit d'accès aux données vous concernant par courrier : SEE - Service abonnements 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 Paris Cedex 16 ou par le formulaire de contact du site web : www.see.asso.fr Offre valable du 01/01/2020 au 31/12/2020.

**ADRESSE DE FACTURE (Si différente)**

Je joins le bon de commande administratif N°  et je désire recevoir une facture au nom de mon employeur pour paiement à réception

Raison sociale de l'employeur :

Service :  Activité (facultatif) :

Adresse :

Code postal :  Ville :

Pays :  N° TVA :

N° TVA intracommunautaire : obligatoire pour règlement HT en UE hors de France

e-mail\* :

\* Obligatoire

Date  Signature (mentions obligatoires) et cachet si il y a lieu :



**+ RAPIDE :**

<https://www.see.asso.fr/ree>



La Revue REE est une publication de la SEE

