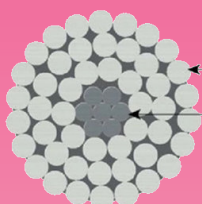


# La Revue



# SEE

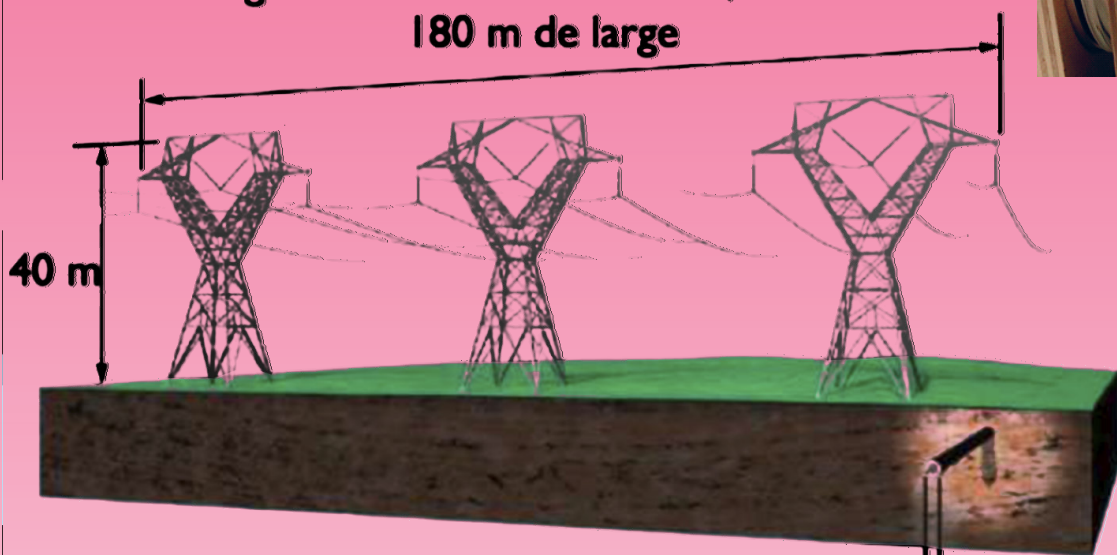
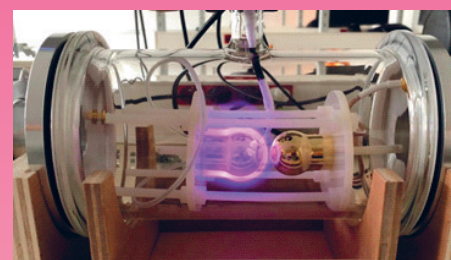
Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



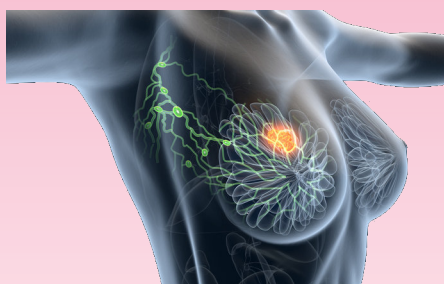
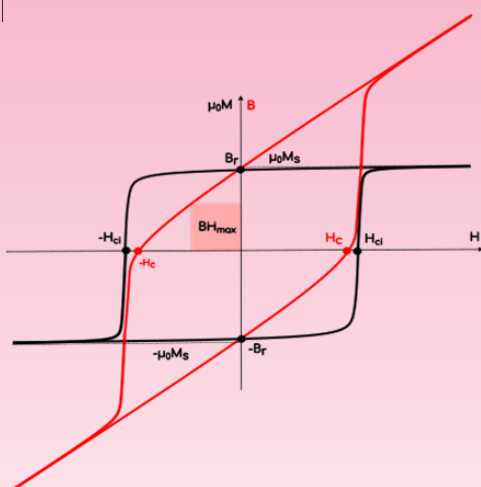
Brin aluminium  
Brin acier



**Lignes haute tension : 5 GW, 750 kV  
180 m de large**



**Câble supraconducteur : 5 GW, 200 kV  
1 m de diamètre**



*Innovation dans  
les matériaux en  
Génie  
Électrique*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

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

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

## Choisissez votre formule d'abonnement pour 2022:



### Version papier

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

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 40 € TTC	<input type="checkbox"/> 59,18 € HT*



### Version numérique

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

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 30 € TTC	<input type="checkbox"/> 29,38 € HT



### Version duo

Version imprimée  
+ version numérique

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 50 € TTC	<input type="checkbox"/> 68,97 € HT*

## Votre adhésion à la SEE

<input type="checkbox"/> Standard	<input type="checkbox"/> Retraité	<input type="checkbox"/> Enseignant	<input type="checkbox"/> Jeune actif (< 35 ans)	<input type="checkbox"/> Etudiant	<input type="checkbox"/> En recherche d'emploi
125 € TTC			65 € TTC		15 € TTC

### + Votre abonnement 3E.I (Tarif réservé aux adhérents, version papier)

France & UE : 32 € TTC       Hors UE : 51,34 € 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)  
\* Prix final incluant des frais de transports de 20 €

## Adresse de livraison

Nom\* :

Prénom\* :

Adresse\* :

Code postal\* :  Pays\* :

Ville\* :

Tél.\* :

e-mail\* :

\* Obligatoire

## Adresse de facturation (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

## Votre règlement

Je règle la somme de  €

par  Chèque à l'ordre de la SEE

Virement après réception de la facture

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

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

\* Obligatoire

e-mail\* :

Date\*  Signature\* et cachet si il y a lieu :

BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER À : SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris - France  
Tél. +33(0)1 56 90 37 17 - [abo@see.asso.fr](mailto:abo@see.asso.fr)

**ABONNEMENT PLUS RAPIDE : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)**

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieures aux diffusions liées 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 75116 Paris ou par le formulaire de contact du site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr). Offre valable du 01/10/2021 au 30/09/2022 dans la limite des quantités disponibles.





# 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)

## La Revue 3EI

publication trimestrielle  
de la SEE

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><b>Adresser les propositions d'article à :</b> <a href="mailto:revue3ei@gmail.com">revue3ei@gmail.com</a></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. Tél : 01 56 90 37 17 <a href="mailto:abo@see.asso.fr">abo@see.asso.fr</a></p> <p><b>Tarifs 2022 :</b></p> <p>Version PAPIER :</p> <p>France et UE (TTC) ..... 40,00 € Pays hors UE (HT) ..... 49,18 €</p> <p>Version NUMERIQUE :</p> <p>France et UE (TTC) ..... 30,00 € Pays hors UE (HT) ..... 29,38 €</p> <p>Version DUO (Papier+Num.) :</p> <p>France et UE (TTC) ..... 50,00 € Pays hors UE (HT) ..... 58,97 €</p> <p><b>Impression :</b> Dupliprint 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne Tel : 02 43 11 09 00 Couv. : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p>Dépôt Légal : Novembre 2022</p> <p>Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 110</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p><b>Thème : Innovations dans les matériaux en GE</b></p> <p>p. 3 <i>Hommage à Gilles Feld</i> Comité de rédaction</p> <p>p. 4 <i>Matériaux pour câbles haute tension de nouvelle génération</i> Thierry Auger</p> <p>p. 9 <i>Les supraconducteurs, ces matériaux fascinants</i> Gilles Lenoir, Thierry Auger</p> <p>p. 20 <i>Matériaux magnétiques pour les voitures électriques, état de l'art et perspectives</i> Anthony Juton, Frederic Mazaleyrat</p> <p><b>Hors Thème</b></p> <p>p. 24 <i>Initiation à l'étude des plasmas froids dans le domaine aérospatial</i> Giacomo Galli, Valentin Mazieres, Cyril Cailhol, Naomi De Mejanes</p> <p>p. 31 <i>Conversion d'énergie électrique triphasée</i> Giacomo Galli, Gilles Perusot, Matthieu Berranger, Noemi Lanciotti</p> <p>p. 42 <i>Etat de l'art : Électronique de puissance des systèmes de traction et des stations de charge des véhicules électriques : Situation actuelle et défis</i> Youssef Amry, Elhoussin Elbouchikhi, Franck Le Gall, Mounir Ghogho, Soumia El Hani</p> <p>p. 60 <i>Imagerie du sein par réseaux de neurones convolutionnels en cascade à partir de données conjointes micro-ondes et ultrasons</i> Valentin Noël</p> <p>p. 66 <i>Word embedding – Les mots et le machine learning</i> Sasā Radosavljevic, Solal Nathan</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 110 de la revue 3EI

Ce dernier numéro de l'année 2022 est consacré aux innovations portant sur les matériaux utilisés en Génie Electrique. En effet, en cette période de transition énergétique marquée par un besoin grandissant en électricité, des efforts conséquents sont attendus pour améliorer l'efficacité des systèmes électriques.

Ce numéro 110 marque aussi une transition, car après 28 ans à explorer les vastes contrés du Génie Electrique et de la Physique Appliquée, le comité de rédaction a décidé de faire une pause en 2023. Il s'agit bien d'une pause et non d'une disparition. Il nous apparaît important de prendre le temps de réfléchir à l'avenir de la revue tant du point de vue des thèmes traités, que du public concerné et du mode de diffusion. Nous allons donc engager une consultation auprès des lecteurs mais aussi des acteurs du monde de l'enseignement, de la recherche et de l'industrie pour proposer une revue plus en phase avec vos besoins.

**Thème : « Innovations dans les matériaux en GE »**

Le thème des matériaux s'ouvre avec un article de Thierry Auger qui explore le sujet de l'innovation dans les câbles haute tension. Il nous détaille les enjeux de leur optimisation, résultat d'un compromis entre une plus grande résistance mécanique et une résistivité la plus basse possible. L'auteur nous accompagne dans le domaine des matériaux avec suffisamment de pédagogie pour que les non spécialistes puissent mesurer l'ampleur des progrès dans ce domaine.

Avec son co-auteur Gilles Lenoir, Thiery Auger nous présente également l'état de l'art sur les câbles supraconducteurs basés sur le composé intermétallique Nb<sub>3</sub>Sn. Ces nouveaux matériaux supraconducteurs bénéficient d'avancées théoriques récentes et seront sans doute à l'origine d'innovations majeures dans le domaine du transport de l'électricité dans un proche avenir.

Dans leur article est issu d'un cours sur les matériaux magnétiques dans les applications pour les véhicules électriques, Anthony Juton et de Frédéric Mazaleyra, précisent des notions que l'on pense souvent maîtriser mais qui recèlent quelques subtilités bien mises en évidences ici. Leur texte permet aussi de faire le point sur les dernières innovations dans le domaine.

**« Hors Thème »**

Les deux premiers articles hors thèmes nous sont proposés par l'équipe de MM. Galli et Perusot de l'ISAE-SUPAERO. Le premier de ceux-ci décrit une initiation à l'étude des plasmas froids, souvent vus comme le « quatrième état de la matière », et qui possèdent de nombreuses applications dans le domaine aérospatial. Ce cours permet aux élèves ingénieurs d'acquérir une connaissance approfondie des méthodes requises pour contrôler et étudier un plasma DC, à travers des travaux expérimentaux et de simulation.

Le second article décrit lui aussi un cours qui s'adresse aux élèves ingénieurs de l'ISAE-SUPAERO. Cet enseignement vise l'acquisition de connaissances et de compétences sur l'association convertisseurs-machines par le biais de l'expérience, tout en passant par des simulations et en apportant au fur à mesure quelques rappels théoriques.

Youssef Amry de l'ISEN Yncréa Ouest et ses co-auteurs proposent un article de synthèse sur l'état de l'art des principales avancées en matière d'architectures d'électroniques de puissance pour les systèmes de traction et les stations de recharge des VE. Plus précisément, l'accent est mis sur les spécifications de l'électronique de puissance de la chaîne cinématique des véhicules électriques légers et des stations de charge. Les avantages et les inconvénients de toutes ces technologies, ainsi que les perspectives de travaux de recherche sont présentés.

Les deux derniers articles de ce numéro viennent compléter les dossiers sur l'IA présentés dans les deux dernières parutions de la revue 3EI.

Valentin Noël, doctorant de l'ENS Paris-Saclay, présente ses travaux sur la caractérisation précoce des tumeurs du sein. Il s'agit d'une nouvelle structure de réseaux neuronaux convolutifs qui combinent les modalités électromagnétiques et ultrasonores, méthodes toutes deux non ionisantes et peu coûteuses, qui offrent des caractéristiques de résolutions complémentaires.

Enfin, Sasa Radosavljevic et Solal Nathan, élèves du département Nikola Tesla de l'ENS Paris-Saclay, nous initient aux méthodes de représentation des mots dans l'informatique, à l'aide de réseaux de neurones pour l'apprentissage de vectorisation des mots afin d'opérer sur ceux-ci.

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

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

## GILLES FELD

Nous sommes nombreux, en Génie Électrique et en Physique Appliquée, à avoir eu la chance de connaître Gilles Feld que ce soit en STS à Saint-Denis, à l'IUFM puis à l'ENS de Cachan (aujourd'hui Paris-Saclay) ou encore à l'ISEN de Brest. C'était un exemple d'humanité et un pédagogue hors pair. Humble et accessible, patient et curieux, il était ouvert à la discussion et les échanges avec lui étaient toujours enrichissants.



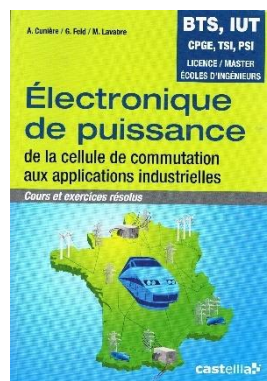
Gilles a été l'un des fondateurs de *La revue 3EI* et l'a soutenue pendant toutes ces années. Sa volonté de transmettre au plus grand nombre, de comprendre et chercher, s'est aussi traduite par la rédaction de nombreux articles et ouvrages largement utilisés par la communauté des enseignant·e·s de nos disciplines mais aussi par l'élaboration d'actions de formations à destination des collègues en exercice

Gilles a terminé sa carrière à l'ISEN de Brest, près de la mer qu'il aimait tant, et a pris sa retraite définitive en septembre 2021.

Il était gravement malade et est décédé à Brest en août dernier.

Il ne fait pas de doute que son sourire restera longtemps dans nos mémoires.

Le comité de rédaction de *La revue 3EI*



# MATERIAUX POUR CABLES HAUTE TENSION DE NOUVELLE GENERATION

THIERRY AUGER

PIMM, Arts et Métiers, CNRS, CNAM, HESAM Université, 151 Blvd. de L'Hôpital 75013 Paris, [thierry.auger@ensam.eu](mailto:thierry.auger@ensam.eu)

**Résumé :** Les câbles haute tension actuels font toujours l'objet d'une recherche active pour optimiser leur comportement. Résultat d'un compromis entre une plus grande résistance mécanique tout en gardant une résistivité la plus basse possible, les matériaux des câbles sont en constante évolution. On décrit ici la recherche sur quelques nuances d'aluminium (alliages à précipitation ou composites métal-métal).

**Mots clés :** câbles haute tension, alliages d'aluminium, précipitation, limite d'élasticité, résistivité

## I/ Introduction

Les pertes par effet Joule jouent un rôle majeur dans la capacité d'un matériau à conduire un courant électrique. La résistivité augmente linéairement avec la température et il y a donc lieu de limiter drastiquement la résistivité du matériau conducteur pour limiter l'échauffement induit par le passage du courant. Seuls quelques matériaux métalliques ont alors une résistivité suffisamment basse pour permettre une conduction efficace sous l'action d'un champ électrique (Voir Table 1). On peut voir que les conducteurs les plus efficaces sont dans l'ordre l'argent, puis le cuivre, l'or et l'aluminium.

	Argent (Ag)	Cuivre (Cu)	Or (Au)	Aluminium (Al)	Calcium (Ca)
$\rho$ ( $10^{-9}$ $\Omega \cdot m$ ) à 300 K	16,29	17,25	22,71	28,33	34,5

Table 1 : Résistivité des métaux purs pour des températures entre 273 et 300 K ( $10^{-9}$   $\Omega \cdot m$ )

Pour des raisons liées à la disponibilité de la matière, au poids et au coût (26000 tonnes de production mondiale pour l'argent en 2020), l'utilisation des trois premiers comme milieu conducteur est maintenant exclue. Le cuivre, toujours utilisé pour les câbles électriques basse tension, ne peut être aujourd'hui envisagé pour les câbles des lignes haute tension à cause de son coût prohibitif. L'aluminium est donc utilisé quasi-exclusivement comme base pour ces câbles. La résistivité augmente de façon importante avec le taux d'impureté et il serait favorable pour le transport d'énergie de l'utiliser dans un état de pureté élevée. On peut alors écrouir l'aluminium (l'érouissage, déformation plastique irréversible, provoque un durcissement mécanique) permettant d'atteindre une contrainte à rupture jusqu'à 160 MPa. Ce traitement ne suffit malheureusement pas à assurer des propriétés mécaniques satisfaisantes pour couvrir toutes les conditions de sollicitations qu'un câble peut rencontrer (surcharge de poids due au givre, vent important). Certaines implantations (notamment les câbles situés en montage) subissent des conditions

telles que le chargement mécanique peut approcher la contrainte à rupture en condition extrême. La solution de référence consiste à créer un câble bi-métallique avec une âme en acier galvanisé à très haute résistance mécanique recouvert d'un câblage torsadé en aluminium obtenu par co-extrusion via le procédé Conklad (Voir Figure 1).



Figure 1 : section et vue globale d'un câble ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) [1].

Pour les zones géographiques les plus difficiles, l'aluminium pur est remplacé par un alliage d'aluminium plus résistant (Almélec) contenant de 0,6 à 0,8 % de magnésium et de 0,6 à 0,8 % de silicium. La présence de ces éléments se traduit lors des traitements thermiques initiaux par une précipitation de différents composés basée sur la séquence de précipitation du composé  $\beta$ - $Mg_2Si$  (voir détails en section II). Les propriétés résultantes des matériaux de ces câbles sont données dans la table 2 ci-dessous :

Matériau	Module de Young (GPa)	Contrainte à rupture $R_m$ (MPa)	Déformation max (%)	$\rho$ ( $10^{-9}$ $\Omega \cdot m$ ) à 300 K
Aluminium	60	160	1%	28,33
Almélec	60	320 à 380	3%	36,6
Acier au carbone	185	1400	3%	150

Table 2 : Comparaison des propriétés des matériaux constituant les câbles conducteurs.

La comparaison entre l'aluminium pur et l'alliage Almélec indique que la résistivité et la résistance mécanique ( $R_m$ ) sont antinomiques : un câble rendu plus résistant à la traction mécanique par précipitation sera moins conducteur. Cela résulte de la diffusion des électrons de conduction par les précipités nanométriques qui renforcent la microstructure. Le choix d'un matériau

résulte alors d'un compromis entre la résistance mécanique et la conductivité électrique. Cette technologie est arrivée à maturité avec des produits bien établis comme l'alliage Almélec, un alliage d'aluminium de la série 6201.

L'augmentation attendue de la consommation électrique au niveau mondial met cependant ces solutions technologiques sous pression. Le développement des infrastructures de transport de courant requiert un accroissement de la part des transmissions à longue distance pour laquelle l'utilisation des câbles bimétalliques n'est pas optimale. Des progrès sont souhaitables pour remplacer l'âme des câbles en acier par un câble tout aluminium qui soit renforcé sur le plan de la résistance mécanique tout en minimisant la résistivité pour limiter les pertes par effet Joule. C'est l'objet des développements récents sur le plan des matériaux que nous allons aborder dans les deux parties suivantes.

## II/ Renforcement des propriétés mécaniques par précipitation

En métallurgie, on distingue deux grandes classes d'alliages : les solutions solides et les alliages de stœchiométrie définie dont les intermétalliques sont la déclinaison pour les matériaux conducteurs. Dans le cas intermédiaire d'une solution solide concentrée, plusieurs phénomènes intéressants sont à noter comme la mise en ordre à courte distance ou la séparation de phase avec précipitation. Un des intérêts d'allier les métaux consiste à obtenir des améliorations importantes des propriétés d'usage (durcissement, amélioration de la corrosion ou de la résistance au frottement, etc.). On peut distinguer deux modes de renforcement mécanique d'un matériau :

- Le durcissement par solution solide : Les dislocations sont accrochées par les solutés et un durcissement important apparaît à des concentrations en soluté élevées (au-delà de quelques %). L'effet du soluté sur la résistivité devient cependant non négligeable et cette voie n'est pas utilisée (par exemple pour un alliage Al-Mg, Figure 2).

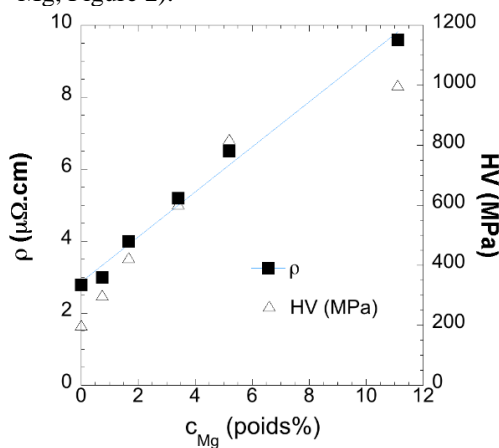


Figure 2 : évolution de la résistivité et de la dureté avec la teneur en élément Mg dans un alliage Al-Mg (adapté de [2]).

Par ailleurs, la solubilité dans l'aluminium d'autres métalloïdes fait qu'il ne s'allie que jusqu'à quelques % avec la plupart des éléments intéressants et donc dans la plupart des cas le durcissement obtenu sera limité.

- Le durcissement par précipitation :

Des précipités définis se forment lorsque la solubilité maximum pour un élément est dépassée (Figure 3) ; ces précipités constituent des obstacles pour le glissement des dislocations de la matrice.

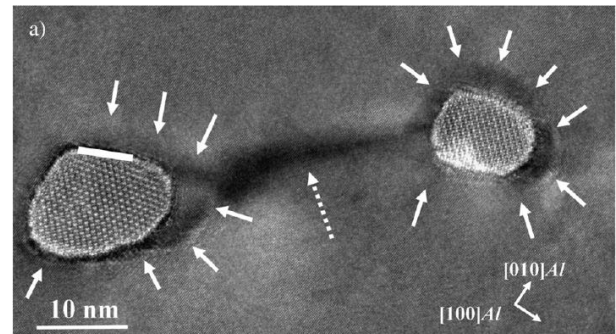


Figure 3 : Vue en microscopie électronique à transmission à haute résolution des précipités  $\beta'$  durcissant d'un alliage Al-Mg-Si [3].

Les précipités peuvent être soit cisailés soit contournés par les dislocations (voir Figure 4b) [5]. Quel que soit le mécanisme de contournement, un effet de durcissement important est alors obtenu au prix de la présence de sites diffusifs pour les électrons de conduction. L'effet sur la résistivité est alors proportionnel à leur fraction volumique.

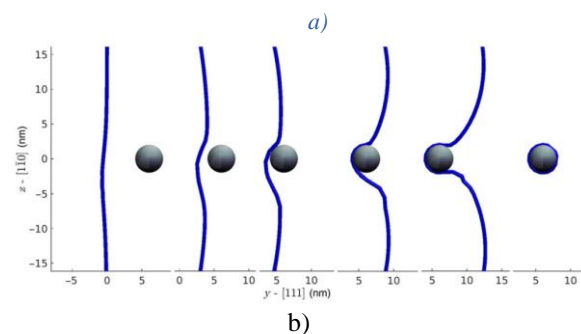
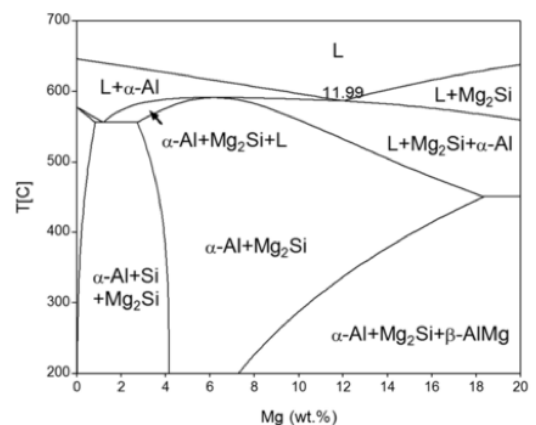


Figure 4 : a) Diagramme de phase Al-Mg-Si [4]. b) Mécanisme de durcissement par un précipité en dynamique des dislocations [5].

Les alliages Al-Mg-Si appartiennent au groupe des alliages qui se renforcent par la formation de précipités métastables au cours d'un traitement de recuit. Selon le diagramme de phase ternaire Al-Mg-Si (Figure 4a), l'état fondamental du système est une co-existence de la matrice d'aluminium avec le précipité  $Mg_2Si$  et ses précurseurs. La précipitation du magnésium et du silicium déplete (diminue de façon limitée) la concentration en soluté de la matrice et la résistivité retrouve des valeurs proches de l'aluminium. Selon certains facteurs comme la composition de l'alliage, la température de recuit, le temps de recuit, les précipités formés ont des structures atomiques différentes. La séquence de précipitation de l'alliage Al-Mg-Si peut être décrite par :

Amas atomiques  $\rightarrow$  zones de Guinier-Preston<sup>1</sup>  $\rightarrow \beta''$   
 $\rightarrow \beta'$   $\rightarrow \beta$  ( $Mg_2Si$ )

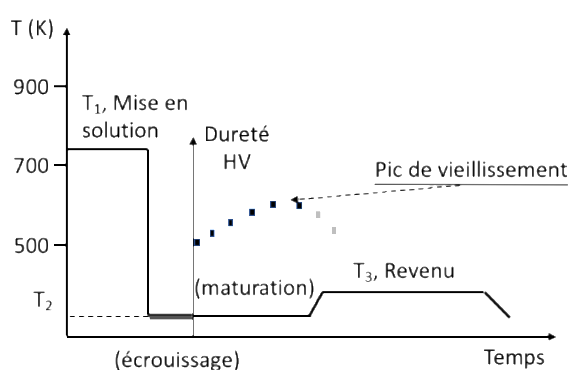


Figure 5 : Séquences des traitements thermiques d'un alliage d'aluminium.

Une première séquence de précipitation se produit à la température ambiante et donne lieu à des conditions optimales de précipitation au bout de 4 h environ (pic de vieillissement, Figure 5). La microstructure contient alors généralement un grand nombre de précipités GP zones et de  $\beta''$  fins et dispersés. C'est dans cet état intermédiaire de précipitation que l'effet durcissant est maximum.

Tous les précipités métastables se trouvent sous forme d'épingles, de lames ou de tiges et leurs plus grandes dimensions sont orientées le long d'une des trois directions cristallographiques de base de l'aluminium (Voir figure 6). La phase  $\beta'$  apparaît lorsqu'on applique à l'alliage un revenu complémentaire ( $T_3$ , Figure 5).

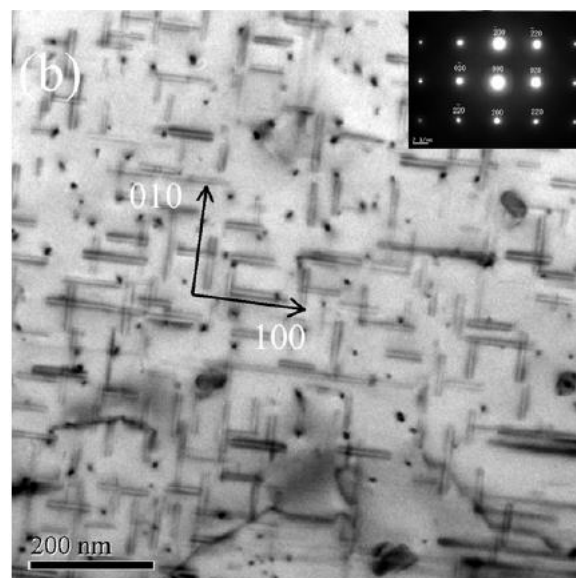


Figure 6 : Image en microscopie électronique en transmission de la précipitation d'un alliage renforcé par l'ajout de Zr, 190°C x 3h + 180°C x 50h [6].

Le matériau commercialement disponible sous le nom Almélec représente l'optimum pour cette stratégie d'alliage basée sur le système Al-Mg-Si. On peut voir dans la table 2 que la contrainte maximum à rupture atteint un niveau de l'ordre de 320 à 380 MPa (en fonction du traitement thermique). L'augmentation de résistivité induite par le schéma de précipitation est modérée puisque l'essentiel du magnésium et du silicium dissout se retrouve dans les précipités. Elle reste alors compatible avec une utilisation pour le transport de courant. Il est malgré tout intéressant de tester d'autres compositions et d'autres microstructures.

L'ajout de Zr est une des voies étudiées pour améliorer les performances de ces matériaux tout en limitant l'effet sur la résistivité. Une optimisation intéressante des propriétés est ainsi obtenue par un meilleur contrôle de la microstructure et de la nature des précipités [6]. Des extensions de la durée de vie des câbles à 130°C par un facteur 4 ont pu ainsi être obtenues. Le rôle du Zr dans ces alliages se limite à permettre un affinage de la taille de grains sous la forme de précipités qui ancrent mieux les joints de grains et limitent la recristallisation du matériau.

Alliage	Dureté (Brinell)	Contrainte ultime (MPa)	Déformation max (%)	$\rho$ ( $10^{-9}$ $\Omega.m$ ) à 300 K
Al-Mg-Si	72	220	14,7	31
Al-Mg-Si+Zr	83	265	20	31,9
Al-Fe-Si-Zr		226	4	29,5

Table 3: Effect of Zr content of Al-Mg-Si alloys on mechanical and electrical properties [6][7].

<sup>1</sup> Une zone de Guinier-Preston est un précipité planaire du soluté qui crée une zone dure de franchissement par une dislocation



Des études sur le système Al-Fe-Si-Zr utilisent la formation de précipités nanométriques de type  $Al_3Zr$  avec un ordre chimique de type  $L1_2$  [7]. L'amélioration en termes de propriété mécanique est faible mais le gain sur la résistivité du câble notable par une amélioration de la pureté de la matrice d'aluminium (il n'y a dans ce cas plus de magnésium résiduel en solution solide). Cette voie d'amélioration par une précipitation mieux maîtrisée et des traitements thermiques affectant la microstructure de façon encore plus fine continue de façon constante à faire progresser les propriétés des alliages d'aluminium.

On peut cependant remarquer que ces améliorations, bien que bienvenues, sont intrinsèquement incrémentales et ne permettent pas forcément d'envisager remplacer l'âme en acier d'un câble haute tension.

### III/ La voie des composites : Al-Ca

Une seconde voie prometteuse consiste en l'élaboration de composites métalliques d'un nouveau type. On peut d'abord remarquer que le calcium est le cinquième conducteur après l'aluminium. Une idée intéressante est de profiter de ce que dans le diagramme de phase Al-Ca (Figure 7), on observe en fait deux phases élémentaires immiscibles, l'aluminium et le calcium (à l'exception de précipités intermétalliques nanométriques qui se forment aux interfaces). La résistivité globale dépend alors de la fraction volumique de chacune des phases immiscibles. A cela s'ajoute des effets de textures très importants qui rendent la microstructure très anisotrope.

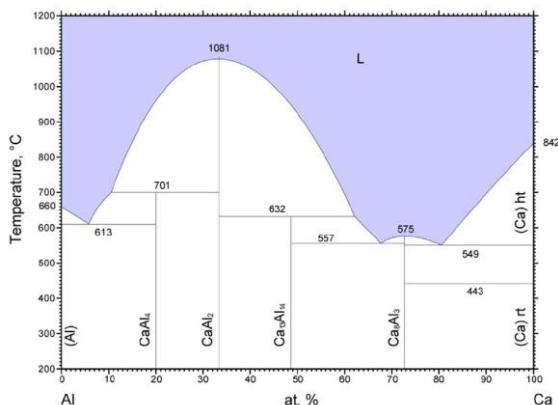


Figure 7 : diagramme de phase pour le système Al-Ca. ASM Diagram no. 1600365, Okamoto (2003) [8].

Cette nouvelle gamme de matériaux, nommée composites métal-métal, permet d'envisager à terme le remplacement du cœur en acier des câbles par un alliage beaucoup plus conducteur de l'électricité. L'obtention de ces matériaux se fait par des procédés d'extrusion ou de laminage sévères (déformation au-delà de 10 ou hyper-déformation) ce qui permet d'obtenir une microstructure de grains de calcium finement allongée orientée dans le sens de la conduction du courant (à l'image de ce que l'on peut obtenir pour le système Cu-Nb, Figure 8a). La résistivité est faiblement affectée par la présence d'une

phase barrière de moindre conductivité puisque le câble acquiert alors une anisotropie dans la direction longitudinale (Figure 8b). En parallèle à l'obtention d'une résistivité relativement faible, les propriétés mécaniques sont notablement améliorées.

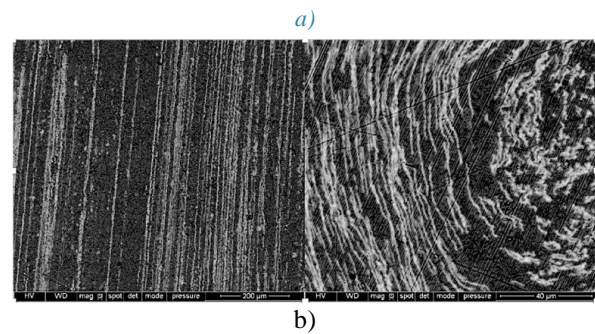
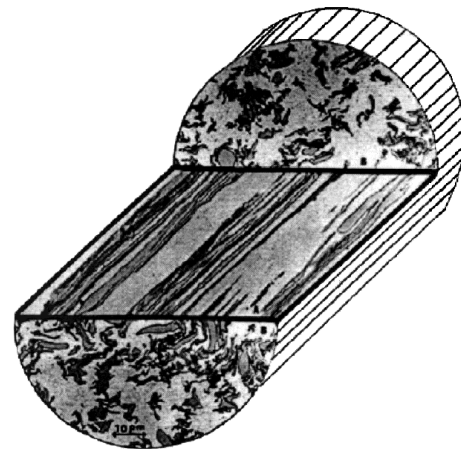


Figure 8 : a) vue par coupe partielle de l'architecture obtenue par hyperdéformation sur un alliage Cu-Nb [9] b) Image en électron rétrodiffusé (BSE) de la microstructure (sens longitudinal et sens transverse) d'un alliage Al-20%Ca [10].

L'hyperdéformation que subit le câble permet d'affiner l'épaisseur des couches de calcium à des niveaux sub-microniques de l'ordre de 50 nm [11]. Les propriétés mécaniques obtenues sont très intéressantes puisqu'on observe presque un triplement de la contrainte ultime de traction pour une composition de type Al-20%Ca, soit bien plus que l'alliage Amélec, avec une résistivité significativement inférieure [10]. Les résultats sur trois compositions sont reportés dans la table 4 qui regroupe les performances des alliages Al-Ca pour une hyperdéformation d'environ 12. La contrainte ultime est très fortement augmentée par rapport à l'aluminium pur avec un accroissement très faible de la résistivité (encore une fois significativement en dessous à celle de l'Almélec). Il semble donc qu'il soit possible d'obtenir avec ce type de composites métal-métal des performances mécaniques supérieures aux alliages standards tout en gardant la résistivité proche du plancher de l'aluminium.

Alliage	Contrainte ultime (MPa)	Déformation max (%)	$\rho$ ( $10^{-9}$ $\Omega \cdot m$ ) à 300 K
Al-9%Ca	197	16	30
Al-11,5%Ca	330	N.A.	31
Al-20%Ca	476	3	32

Table 4: Al-XCa% Maximum hardening and resulting electrical properties [10][11][12].

#### IV/ Conclusion

Les câbles conducteurs, bien que très matures technologiquement, disposent encore d'une marge de progression importante qui vise à augmenter les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium tout en limitant au minimum l'augmentation de la résistivité. Des améliorations sont possibles via des stratégies fines d'alliages avec le Zr notamment. En rupture avec ces améliorations incrémentales, une nouvelle génération de câbles basée sur la formation de structures composites métalliques ouvre des perspectives intéressantes pour le remplacement de l'âme du câble en acier par un matériau base aluminium avec des gains significatifs sur les pertes par effet Joule. Les recherches dans ce domaine sont donc toujours d'actualité.

#### V/ Références bibliographiques

- [1] <http://www.hdcoverheadconductor.com/477-acsr-conductor/> (téléchargé en octobre 2022)
- [2] A. Gabera, N. Afify, S.M. El-Halawany, A. Mossad, Eur. Phys. J. AP 7 (1999) 103–109
- [3] K. Teichmann, C. D. Marioara, S. J. Andersen, K. Marthinsen, Materials Characterization 75 (2013) 1–7
- [4] X. Zhu, H. Yang, X. Dong, S. Ji, Journal of Materials Science 54 (2019) 5773–5787
- [5] I. Ringdalen, S. Wenner, J. Friis, J. Marian, MRS Communications 78 (2017) 1-8
- [6] W.H. Yuan, Z.Y. Liang, Materials and Design 32 (2011) 4195–4200
- [7] N. A. Belov et al., Metal Science and Heat Treatment, 54 (2012) 165-170
- [8] ASM-International, ASM Alloy Phase Diagram Database, Materials Park, OH, USA.
- [9] A. M. Russell, L. S. Chumbley, Y. Tian, Advanced Engineering Materials 2 (2000) 11-22
- [10] L. Tian et al., Materials Science & Engineering A 690 (2017) 348–354
- [11] L. Tian, H. Kim, I. Anderson, A. Russell, Materials Science & Engineering A 570 (2013) 106–113
- [12] C. F. Czahor, I. E. Anderson, T. M. Riedemann, A. M. Russell, Materials Science and Engineering 219 (2017) 012014

# LES SUPRACONDUCTEURS, CES MATÉRIAUX FASCINANTS – PROBLÉMATIQUES MÉCANIQUES ET MATÉRIAUX LIÉS À L'UTILISATION DE L'INTERMÉTALLIQUE $Nb_3Sn$

\*GILLES LENOIR<sup>1</sup>, THIERRY AUGER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA-Saclay ([gilles.lenoir@cea.fr](mailto:gilles.lenoir@cea.fr))

<sup>2</sup> PIMM, Arts et Métiers, CNRS, CNAM, HESAM Université, 151 Blvd. de L'Hôpital 75013 Paris ([thierry.auger@ensam.eu](mailto:thierry.auger@ensam.eu))

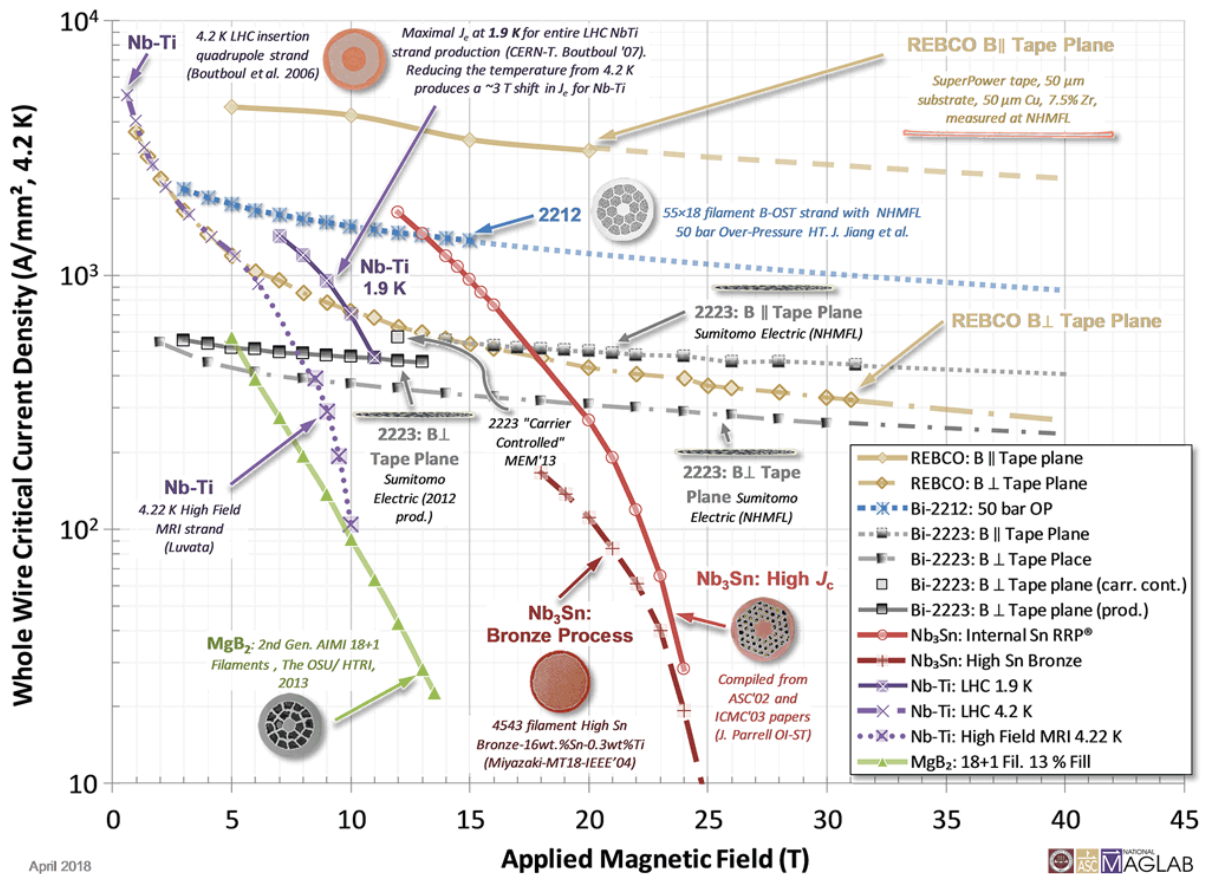
**Résumé :** Cet article présente l'état de l'art sur les câbles supraconducteurs basés sur le composé intermétallique  $Nb_3Sn$ . Les bases sur la supraconductivité sont rappelées puis les aspects technologiques sont abordés notamment du point de vue des procédés de fabrication de ces câbles supra pour la génération des champs magnétiques intenses. Les contraintes qui apparaissent lors de leur utilisation en condition cyclique sont présentées illustrant les défis scientifiques qui ont dû être ou sont encore à surmonter.

**Mots clés :** supraconductivité, Câble supraconducteur  $Nb_3Sn$ , procédés

## I/ Introduction

Transporter l'énergie électrique sans pertes est un rêve rendu possible par la découverte des matériaux supraconducteurs. Ces derniers connaissent actuellement un fort développement, non seulement pour des applications dans le transport de courant mais également pour leurs propriétés électromagnétiques. La course aux champs magnétiques intenses, particulièrement active dans le domaine de la physique des hautes énergies, implique des champs toujours plus élevés dans les conducteurs. Par exemple, le Grand Collisionneur de hadrons (« Large Hadron Collider » - LHC) de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) situé sous la frontière entre la France et la Suisse, utilise actuellement des aimants supraconducteurs basés sur l'alliage niobium-titane (NbTi) pour guider et focaliser le faisceau de particules. Le LHC à haute luminosité (HL-LHC) vise à multiplier par dix la luminosité du LHC (nombre de collisions dans un temps donné). Parmi les solutions technologiques permettant la réalisation de ce défi, le HL-LHC utilisera de nouveaux aimants quadripôles basés sur le système « niobium-étain » ( $Nb_3Sn$ ,  $T_c = 18,7$  K) générant un champ magnétique de 12 Tesla alors que les aimants utilisés actuellement en produisent 8 Tesla. Dans le domaine de la fusion nucléaire, le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) situé dans les Bouches-du-Rhône, utilisera des bobines supraconductrices basées également sur la technologie  $Nb_3Sn$  pour permettre le confinement magnétique du plasma chaud (150 millions de degrés Celsius). Dans le domaine médical,

l'imagerie par résonance magnétique (IRM) utilise depuis de nombreuses années les supraconducteurs. Pour aller plus loin dans l'étude et la compréhension de l'être humain, et plus particulièrement comprendre les maladies neurodégénératives, des images plus précises sont nécessaires. Dans ce sens, l'IRM ISEULT situé à NeuroSpin à Paris-Saclay utilise 182 km de brins supraconducteurs de l'alliage NbTi. L'aimant ainsi formé est capable de générer un champ de 11,7 Tesla à 1,8 K, quasiment 230 000 fois le champ magnétique terrestre. Cette technologie déjà unique dans le domaine des IRM pousse l'utilisation du NbTi proche de la limite pratique d'environ 12 Tesla. Dans le cadre de projets tel qu'ITER ou HL-LHC, il est nécessaire de dépasser ces niveaux de champs. La figure 1 présente une comparaison de la densité de courant des principaux supraconducteurs utilisés actuellement en fonction de leur limite en champ magnétique et des températures d'utilisations. L'utilisation de chaque famille de supraconducteur répond à un ensemble de paramètres précis (performances électromagnétiques, refroidissement, coût au mètre, etc) mais les différents matériaux présentent des limites intrinsèques qui ne peuvent être franchies. La course aux champs magnétiques intenses pousse donc vers l'utilisation de technologies basées sur le composé  $Nb_3Sn$  du système niobium-étain voire de certains supraconducteurs à haute température critique (HTC). Nous allons voir dans la suite de cet article avec l'exemple du  $Nb_3Sn$  qu'en plus des limites physiques propres à chaque famille de matériaux, leur mise en œuvre et la géométrie des conducteurs, donc la conception et la fabrication, sont aussi des facteurs prépondérants dans les performances.



April 2018

Applied Magnetic Field (T)

ASC MAGLAB

Figure 1 : Courant critique en fonction du champ magnétique appliqué pour NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn et un HTC BiSrCaCuO<sub>2212</sub> [1]

Dans le domaine du transport de courant, l'utilisation des supraconducteurs est particulièrement intéressante car permettrait par exemple de transporter une densité de courant plus élevée avec un encombrement plus faible. Une ligne à haute tension

transportant 5 GW de puissance instantanée avec un encombrement très important pourrait être remplacé par un câble enterré d'une emprise d'un mètre au sol (Figure 2).

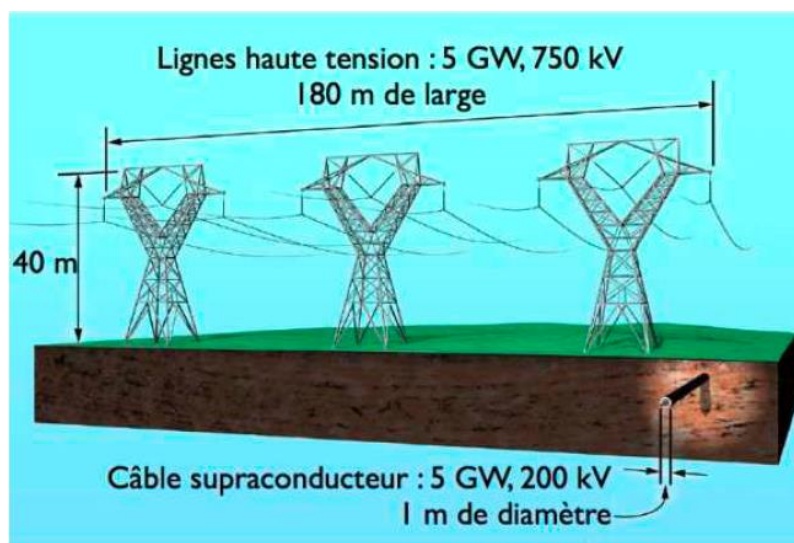


Figure 2 : Ligne à haute tension comparée à un câble supraconducteur transportant la même puissance [2]

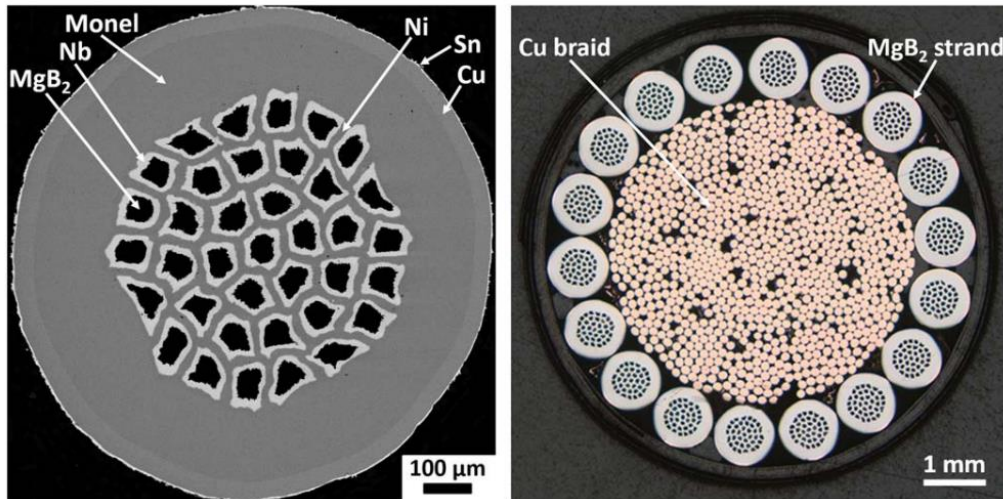


Figure 3 : Coupe transverse d'un brin MgB<sub>2</sub> de 1 mm de diamètre (à gauche) et d'un câble 18 brins de 7 mm à droite pouvant transporter 3 kA à 4.3 K (à droite) [3].

Le défi actuel consiste à utiliser des matériaux supraconducteurs avec une température critique plus haute que les supraconducteurs conventionnels pour ne pas avoir recours à un refroidissement par l'hélium liquide au coût très élevé. L'utilisation de matériaux tel que le diborure de magnésium (MgB<sub>2</sub>), découvert en 2000 et supraconducteur en dessous de 39 K, est intéressant mais son prix et sa mise en œuvre en font une technologie limitée à certaines applications spécifiques. Dans le cadre du HL-LHC au CERN, des câbles de puissance utilisent des conducteurs basés sur le MgB<sub>2</sub> pour amener l'énergie nécessaire à alimenter les aimants de la surface vers le tunnel dans lequel se situe le LHC (Figure 3).

Par leurs propriétés et leurs températures d'utilisation, ces conducteurs présentent un potentiel important dans le développement de câbles très compacts pour le transport de très fortes intensités de courant à basse tension pour des applications industrielles (usines d'électrolyse), les équipements scientifiques des hautes énergies (collisionneur LHC, tokamak, etc.), la distribution dans des environnements confinés (comme un navire) et la mise en commun de stations de conversion pour des villes, des campus universitaires, des parcs éoliens et solaires ou dans le réseau ferroviaire.

## II/ La supraconductivité

### II.1/ Bref historique sur la découverte de la supraconductivité

La supraconductivité a été découverte en 1911 par le danois Heike Kammerlingh-Onnes alors que les premières techniques de cryogénie venaient d'être mise au point permettant d'atteindre des températures proches du zéro absolu. Le mercure est le premier matériau supraconducteur à avoir été découvert avec une température critique de 4,15 K. La supraconduction se manifeste par la disparition de la résistivité du conducteur et la suppression de l'effet d'échauffement lors du passage d'un courant (effet Joule). Après les

éléments simples comme le plomb et le niobium, les matériaux supraconducteurs qui ont été découverts sont des alliages métalliques de stoechiométrie fixe comme l'intermétallique NbTi ou le Nb<sub>3</sub>Sn (voir figure 4). En 1986, la découverte de nouveaux matériaux supraconducteurs dans les céramiques a révolutionné le domaine avec la découverte des composés cuprates « YBaCuO » puis Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> (Bi-2212) ou Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> (Bi-2232).

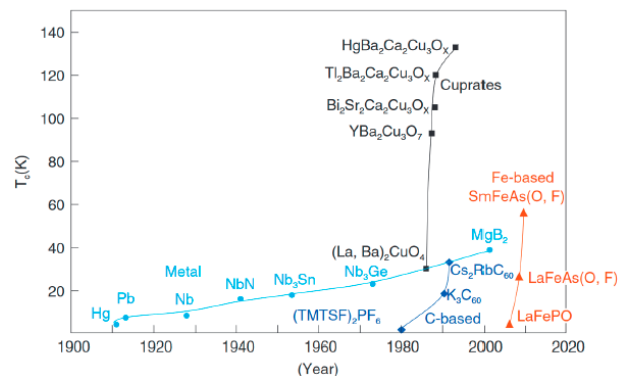


Figure 4 : Température critique  $T_c$  des principaux supraconducteurs en fonction de l'année de découverte [4]

Ces nouveaux composés ont des températures de transition bien plus élevées que les supraconducteurs conventionnels. Les supraconducteurs comme le MgB<sub>2</sub> ont été découverts plus récemment mais ils rentrent dans la classe des supraconducteurs « classiques » que la théorie standard BCS explique bien.

### II.2/ L'origine de la supraconductivité : la théorie «BCS»

La théorie BCS est la théorie standard de la supraconductivité proposée en 1957 par John Bardeen, Leon Neil Cooper et John Robert Schrieffer (BCS). Elle explique la supraconductivité par la formation de paires d'électrons (paires de Cooper) sous l'effet d'une interaction attractive entre électrons résultant de l'échange de phonons (prix Nobel de physique en 1972).

Les électrons sont des fermions de spin demi-entier qui obéissent à la statistique de Fermi-Dirac et au principe d'exclusion de Pauli. Deux fermions ne peuvent occuper simultanément le même état quantique. Cependant, les paires de Cooper se comportent comme des bosons (particules de spin entier) car elles sont constituées de deux électrons de spin opposé et ont donc un spin résultant nul. Or, les bosons obéissent à la statistique de Bose-Einstein et un état quantique donné peut être occupé par un nombre quelconque de paires. C'est la condensation en paires de Cooper (ou la possibilité que la fonction d'onde du système possède dans l'état fondamental un état corrélé couplant deux électrons de spin et d'impulsion opposés) qui est responsable de la supraconduction. La grande force de la théorie BCS est d'avoir compris que la fonction d'onde de l'état fondamental d'un solide doit s'écrire comme la somme d'un état d'onde plane et d'un état lié  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|\vec{k} \uparrow + | - \vec{k} \downarrow \rangle)$  :

$$|\psi_0 \rangle = \prod_k (u_k + v_k c_{k\uparrow}^+ c_{-k\downarrow}^+) |0 \rangle$$

ici  $c_{k\uparrow}^+$  est l'opérateur de création d'un électron de moment  $k$  et de spin haut,  $|0 \rangle$  est l'état du vide sur lequel agit  $c_{k\uparrow}^+$  et les amplitudes  $u_k$  et  $v_k$  sont à déterminer. L'intérêt de cette présentation est de bien montrer qu'il faut deux électrons de spin opposés, de même norme d'impulsion mais également de sens opposé qui forment une paire corrélée dite de Cooper. Les électrons qui peuvent peupler cet état sont des électrons d'une énergie proche de l'énergie de Fermi (des électrons d'impulsion  $\vec{k}$  s'apparient ainsi avec des électrons d'impulsion  $-\vec{k}$ ). Les paires de Cooper ont ainsi une énergie cinétique légèrement plus grande mais l'appariement des électrons par paire conduit à une baisse de leur énergie potentielle plus importante. Globalement, les paires de Cooper sont alors plus favorables énergétiquement qu'un état isolé de cet électron.

La raison pour la disparition de la résistivité vient de ce que la diffusion d'une paire de Cooper par une irrégularité du réseau cristallin n'est pas permise. Il n'y a pas d'état quantique de même énergie dans lequel une paire puisse être diffusée. Ne pouvant être diffusée, les paires ne subissent aucune perturbation et autorisent le transport de courant électrique sans aucune perte. L'état quantique fondamental avec une paire intriquée protège ainsi des perturbations extérieures.

On peut par ailleurs voir tout de suite qu'un champ magnétique par couplage paramagnétique va entraîner une asymétrie entre la densité d'électrons de spin haut et celle de spin bas au niveau de Fermi. Ainsi quand un champ magnétique est appliqué, la polarisation des électrons d'impulsion  $\vec{k}$  aligné favorablement avec le champ magnétique crée une différence de population entre les électrons dont le spin est aligné sur le champ et les électrons dont le spin est opposé au champ (le couplage déplace l'énergie des électrons selon  $-\mu \cdot \vec{S} \cdot \vec{B}$ ). La probabilité de peupler l'état d'appariement diminue jusqu'à disparaître car il y a de moins en moins

d'électrons d'impulsion  $\vec{k}$  par rapport à ceux qui ont une impulsion  $-\vec{k}$ . Le nombre de paires de Cooper disponibles diminue alors jusqu'à ne plus pouvoir transporter de courant (c'est le cas de la classe de type I des supraconducteurs comme les éléments simples). Dans le cas des supraconducteurs de type II (comme NbTi ou Nb<sub>3</sub>Sn), des hétérogénéités spatiales via les vortex de la phase supraconductrice souvent liées aux impuretés permettent de canaliser les lignes de champ magnétique au travers du matériau lorsque le champ devient supérieur à une valeur seuil ( $H_{c1}$ ) et autorisent de conserver la supraconductivité jusqu'à des champs magnétiques plus élevés ( $H_{c2}$ ). Pour le composé Nb<sub>3</sub>Sn, le couplage électron-phonon est effectif sur l'atome de Nb.

Il faut noter que le cuivre n'est pas supraconducteur et qu'il garde ainsi à basse température les caractéristiques d'un conducteur électrique conventionnel.

### II.3/ La supraconductivité à haute température : vers une compréhension ?

La question de savoir quel est le phénomène responsable de l'appariement des électrons dans la classe des composés supraconducteurs à haute température s'est posée depuis leur mise en évidence en 1986. Rapidement, le caractère planaire de la conduction dans le plan CuO<sub>2</sub> est apparu comme essentiel sans que les caractérisations ne puissent trancher en faveur d'un degré de liberté (rôle des phonons par exemple) ou d'un autre (onde de spin). Il semble que la situation soit en train d'évoluer très rapidement avec la mise en évidence sans équivoque du rôle des interactions de super-échange postulées par Anderson dès 1987 [5]. Dans le réseau planaire CuO<sub>2</sub> (voir figure 5b), les spins des ions Cu<sup>2+</sup> sont dans une configuration antiferromagnétique [6]. Lorsque la stœchiométrie en oxygène diminue, les lacunes en oxygène détruisent la mise en ordre antiferromagnétique. Des paires de Cooper apparaissent entre deux sites adjacents de cuivre au prix d'un transfert de charge via le site oxygène (Figure 5).

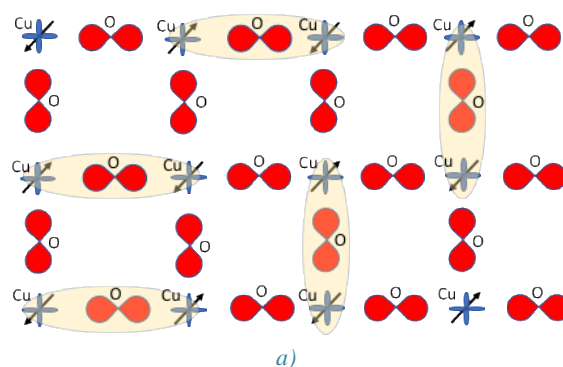
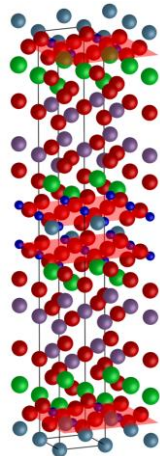


Figure 5 : a) Super échange entre les électrons des orbitales 3d<sub>9</sub> de deux ions cuivre (en bleu) et celui de l'orbitale 2p<sub>6</sub> d'un ion oxygène (en rouge). Les paires de Cooper sont représentées par la région jaune. Le spin sur les ions cuivre est ordonné selon une configuration anti-ferromagnétique



b)

Figure 5 : b) Structure cristallographique tétragonale de Bi-2212 (les plans de cuivre sont soulignés en rouge).

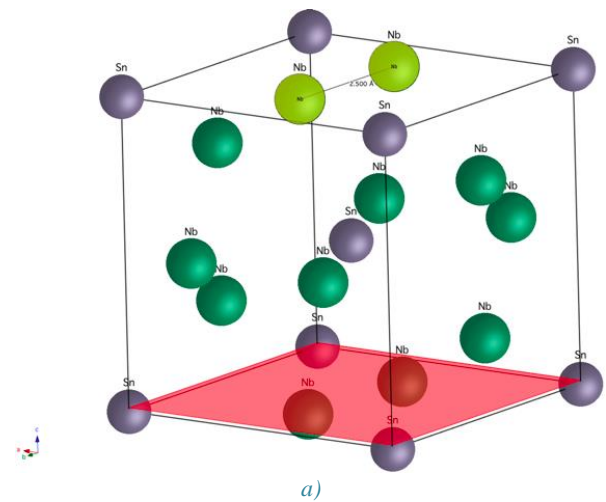
Les lacunes en oxygène faisant basculer l'état du réseau de l'état isolant à l'état conducteur avec une disparition de l'antiferromagnétisme, c'est dans cet état sous-stœchiométrique que les paires de Cooper peuvent apparaître dans l'état fondamental du matériau. La mise en évidence récente de la relation directe entre la densité de paires de Cooper et l'intensité du transfert de charge permet d'avoir une identification sans équivoque de l'existence de ce degré de liberté associé à la HTC [6]. La compréhension du mécanisme fondement de la supraconductivité à haute température pourrait-elle déboucher sur une nouvelle ère pour les supraconducteurs ? Une période très intéressante s'ouvre après presque 40 années d'incertitude.

### III/ Le complexe Nb<sub>3</sub>Sn, de la microstructure à la structure.

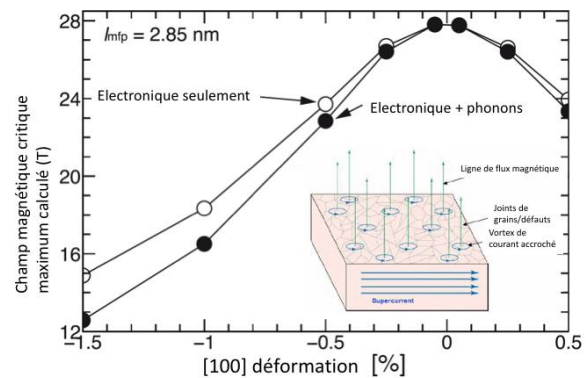
Pour bien comprendre la complexité de l'utilisation de tels matériaux, prenons l'exemple du Nb<sub>3</sub>Sn. Ces dernières années, la technologie basée sur le composé Nb<sub>3</sub>Sn a subi un fort développement par son utilisation dans des machines telles que les aimants d'ITER pour la fusion nucléaire ou les aimants du HL-LHC. En plus des limites d'utilisations intrinsèques au matériau, le Nb<sub>3</sub>Sn est fragile et présente une sensibilité des propriétés supraconductrices au comportement mécanique. En effet, la microstructure du composé influence le comportement sous champ magnétique. L'utilisation de conducteurs basés sur le Nb<sub>3</sub>Sn est donc particulièrement délicate à mettre en œuvre, de la mise en forme des conducteurs, en passant par la fabrication de structures tel que des aimants à hauts champs jusqu'aux forces considérables mises en jeu lors des phases opérationnelles, les performances sont poussées au plus près de leurs limites mécaniques.

Alors que l'intermétallique NbTi est un matériau en solution solide ductile (qui peut se déformer sous contrainte par le mouvement des dislocations à basse température, i.e. la limite élastique), l'intermétallique Nb<sub>3</sub>Sn est lui un matériau fragile. La ductilité d'un matériau métallique est normalement obtenue par l'intermédiaire du glissement des dislocations (défaut

linéaire d'empilement dans le réseau cristallin). Or à l'échelle microscopique, Nb<sub>3</sub>Sn est ordonné avec un ordre périodique chimique à longue distance (Figure 6). Le frottement de réseau pour le déplacement d'une dislocation dans ces conditions est très important à basse température ce qui fige les dislocations en place et empêche alors d'accommoder la contrainte imposée. Le matériau peut alors subir une rupture fragile avec une déformation essentiellement dans le domaine élastique jusqu'à 0,5%. Le plan en rouge de la figure 6a est le plan de rupture fragile (100) du composé. La rupture fragile est une rupture de basse énergie qui ne fait intervenir que le clivage dans un plan cristallographique. On remarquera la distance de 0,25 nm entre 2 atomes de niobium dans ce plan qui est censé être à l'origine de la température critique élevée de ce composé par l'intermédiaire d'un couplage électron-phonon plus fort entre ces atomes.



a)



b)

Figure 6 : a) Cristallographie du composé intermétallique Nb<sub>3</sub>Sn (maille cubique composée de 2 atomes d'étain et de 6 atomes de niobium dénotée cP8 ou A15). b) Champ magnétique critique maximum en fonction de l'état de déformation dans Nb<sub>3</sub>Sn (adapté de [7]).

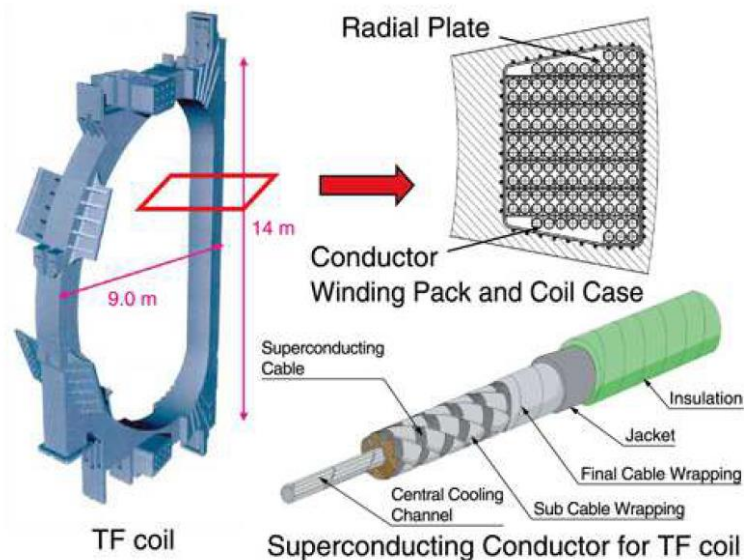
L'influence d'une déformation élastique est majeure sur la capacité du supraconducteur à canaliser le champ magnétique autour des vortex de courant qui se forme spontanément dans ce type de supraconducteur en présence d'un champ (supraconductivité de type II). On observe une forte chute du champ critique maximum (H<sub>c2</sub>) au-delà de 0,5% de déformation élastique en traction ou compression (Figure 6b). En dessous de

0,5% de déformation, le champ  $H_{c2}$  revient de façon réversible à sa valeur initiale si la déformation redevient nulle.

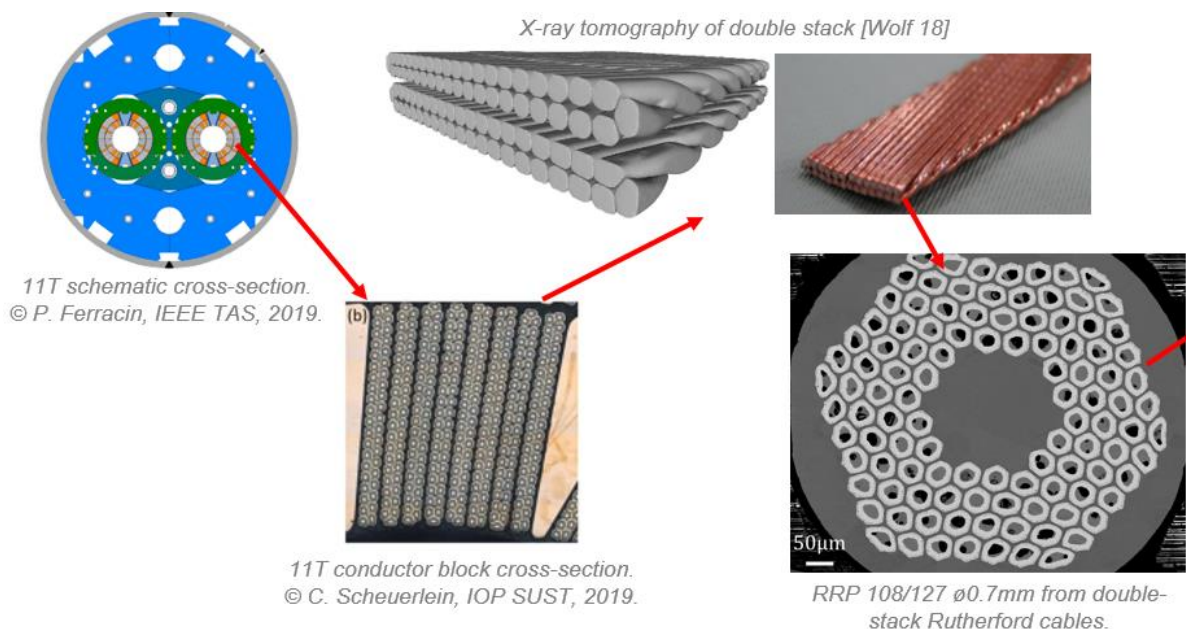
Cette dépendance réversible peut donc impacter les performances des machines dans lesquelles est utilisé le  $Nb_3Sn$ . Etant connue et étudiée, elle peut être anticipée. Toutefois, ce phénomène survient à l'échelle cristallographique et le composé  $Nb_3Sn$  est utilisé dans des structures complexes après avoir subi des

transformations et des sollicitations thermo mécaniques très importantes pour sa mise en forme et son utilisation.

La figure 7 montre la complexité et la taille des structures dans lesquelles sont utilisés les conducteurs basés sur le  $Nb_3Sn$  dans une des bobines d'ITER et dans le dipôle 11 T développé initialement par le CERN. L'état mécanique local dans le composé  $Nb_3Sn$  repose donc sur une étude multi-échelle complexe de la structure globale.



Structure de la bobine de champs toroïdale et du câble-en-conduit pour ITER [8]



a) Représentation de la structure multi-échelle du dipôle 11 T du CERN [9].

Figure 7 : Représentation de la complexité et de la structure multi-échelle de l'utilisation des conducteurs supraconducteurs dans le cadre du projet ITER et des aimants d'accélérateurs



La mise en œuvre d'un câble supraconducteur requiert un agencement architectural à plusieurs échelles des composants pour faire cohabiter les fonctions essentielles à une utilisation pour le transport de courant et la génération de champ magnétique. Les câbles supraconducteurs utilisés dans ces applications sont composés d'un assemblage de fils, ou brins, composites torsadés selon une géométrie spécifique (Figure 8). Deux architectures sont couramment utilisées : l'architecture câble-en-conduit (pour les aimants d'ITER) et l'architecture Rutherford (pour les aimants des accélérateurs). Dans la première, les brins sont câblés ensemble par "pétales" (ou sous-câbles) torsadés eux-mêmes autour d'une spirale centrale et insérés dans une gaine métallique. Pour le câble Rutherford, les brins sont torsadés entre eux et passent entre un ensemble de galets afin de les déformer plastiquement et former le conducteur plat à deux couches. On peut alors assembler les bobines de champ magnétique nécessaire pour courber les trajectoires des particules chargées dans les accélérateurs. Dans les deux cas, les brins sont câblés dans un état dit non-réagis (décrit ci-après) pour lequel le composé supraconducteur  $Nb_3Sn$  n'est pas encore présent dans le brin. A noter, les brins dans les câbles CICC sont « libres » entre eux alors que dans le cas des câbles Rutherford, après bobinage, la bobine est imprégnée (remplie) de résine afin de maintenir la structure des câbles.

Les brins supraconducteurs sont eux constitués de sous-éléments, appelés également filaments, supraconducteurs de petite dimension (d'un diamètre allant de quelques  $\mu m$  à plusieurs dizaines de  $\mu m$ ) torsadés et noyés dans une matrice métallique en général de cuivre. Il en résulte une structure composite multi-échelle complexe dont les caractéristiques répondent aux problématiques de stabilités électromagnétiques, thermiques et mécaniques.

Les raisons d'une telle architecture pour le brin sont les suivantes :

- La séparation de la partie supraconductrice en de multiples filaments permet une élimination des instabilités de « sauts de flux » [12],
- La géométrie torsadée des filaments pour un brin permet une réduction des couplages magnétiques interfilamentaires [13],
- Enfin l'insertion dans une matrice en cuivre permet l'évacuation de la puissance dissipée dans les filaments en cas de perte de supraconduction lors d'un épisode instable trop important. La puissance électrique stockée peut alors s'écouler sans endommager le câble dans ce milieu conducteur alternatif (il faut noter que le cuivre n'est pas supraconducteur même à très basse température) [14].

Câble-en-conduit (ou Cable-In-Conduit Conductor CICC)



a)

Câble Rutherford



b)

Figure 8 : a) Torsade en pétale [10] b) Torsade à plat [11]

Le composant central est le sous-élément de faible diamètre contenant le composé supraconducteur  $Nb_3Sn$ , torsadés et noyés dans une matrice en cuivre. La figure 9 présente un modèle numérique 3D d'un brin supraconducteur composé de sous-éléments torsadés. La technologie  $Nb_3Sn$  repose sur différents types d'architectures composés de différents matériaux avec différentes tailles de sous-éléments. Les propriétés, performances et limites des brins basés sur le  $Nb_3Sn$  dépendent fortement des différents paramètres définis par l'architecture. Toutefois, leur obtention repose sur le même principe : partir d'une structure de filaments de niobium assemblés autour d'une source d'étain et noyés dans une matrice de cuivre. Ces architectures prennent donc leurs noms de la manière dont est défini la source d'étain pour la création du composé  $Nb_3Sn$ . Au cours d'un traitement thermique spécifique pouvant aller jusqu'à une semaine, l'étain va diffuser dans le niobium pour permettre la création du composé  $Nb_3Sn$ . Les aimants à hauts champs pour la physique des hautes énergies citées précédemment utilisent principalement le brin « internal tin » (IT), le brin Restacked Rod Process (RRP©) et Powder-in-Tube (PIT) dont des observations de coupes transverses de brin traité thermiquement (réagi - le composé  $Nb_3Sn$  est présent) sont visibles en Figure 10. Les brins IT reposent sur des sous-éléments composés de filaments  $Nb_3Sn$  noyés dans une matrice de bronze. Les brins RRP quant à eux sont similaires aux brins IT mais subissent une étape supplémentaire de tréfilage-empilage avant traitement thermique qui permet d'obtenir des sous-éléments cohésifs après traitement thermique. Le brin Powder-in-tube lui repose sur un empilement de tube de niobium rempli d'une poudre de cuivre et d'étain.

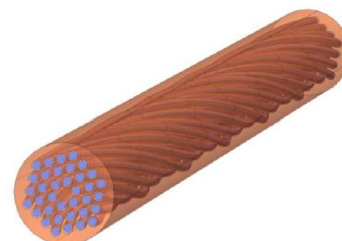


Figure 9 : Modèle numérique 3D montrant la structure multifilamentaire (section bleue) torsadée d'un brin supraconducteur [15].

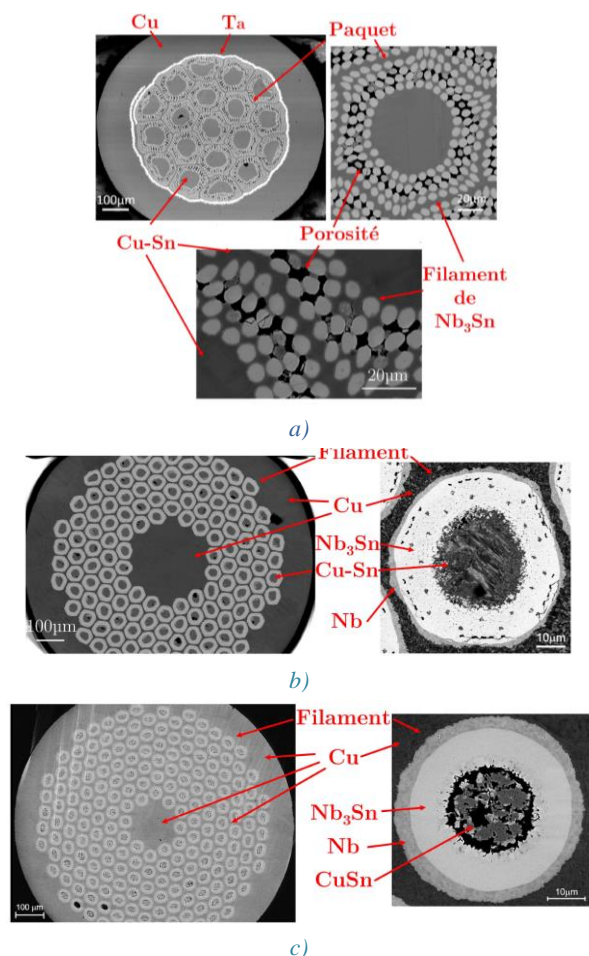


Figure 10 : Observation au Microscope Électronique à Balayage (MEB) d'une coupe transverse de différentes architectures Nb<sub>3</sub>Sn avec : a) d'un brin Nb<sub>3</sub>Sn-IT utilisé dans les aimants d'ITER avec une vue du brin complet, d'un zoom sur un paquet de filaments et d'un zoom sur des filaments] b) d'un brin Nb<sub>3</sub>Sn-RRP et c) d'un brin Nb<sub>3</sub>Sn-PIT utilisés dans l'aimant FRESCA2 du CERN avec pour chacun une observation du brin complet et un zoom sur le sous-élément [16].

Nous avons donc vu que la géométrie et l'architecture des conducteurs est relativement complexe. Leur obtention l'est tout autant ! De manière générale, il existe deux procédés de fabrication des aimants et plus généralement des structures utilisant des supraconducteurs : le procédé "react and wind" et le procédé "wind and react". Dans le premier, le brin est fabriqué avec le composé supraconducteur formé dans les étapes initiales. Viennent ensuite directement les étapes de mise en forme : cablage, bobinage et assemblage. Cela ne peut fonctionner qu'avec les composés supraconducteurs ductiles ou peu fragile comme le NbTi et le MgB<sub>2</sub>.

Le procédé « wind and react » quant à lui repose sur la création du composé supraconducteur in-situ à la fin de la mise en forme à l'aide d'une série de traitement thermique (TT) dits de réaction. C'est ce procédé qui est utilisé pour fabriquer les aimants utilisant des brins Nb<sub>3</sub>Sn du fait de la fragilité du composé. Un conducteur basé sur le Nb<sub>3</sub>Sn est donc fabriqué, mis en forme et manipulé sous une forme « non-réagie », c'est-à-dire non traité thermiquement. L'obtention du composé Nb<sub>3</sub>Sn repose sur une exploitation fine de la thermodynamique du système ternaire Cu-Nb-Sn. Comme décrit plus haut, le principe est la diffusion d'étain dans des filaments de niobium. On place un cœur d'étain mélangé à du cuivre au centre des sous-éléments dans un premier temps. Un premier traitement thermique à basse température conduit à la transformation dans ce cœur de la phase  $\eta$  Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> (ligne T1 sur la Figure 11). Ce composé stable d'une enthalpie de formation de l'ordre de -1 kJ/mole consomme alors tout l'étain initial. Un deuxième traitement thermique à 450°C (ligne T2 sur la Figure 11) permet de produire le composé  $\epsilon$  qui est un composé stabilisé par l'entropie (enthalpie de formation positive de 1 kJ/mole).

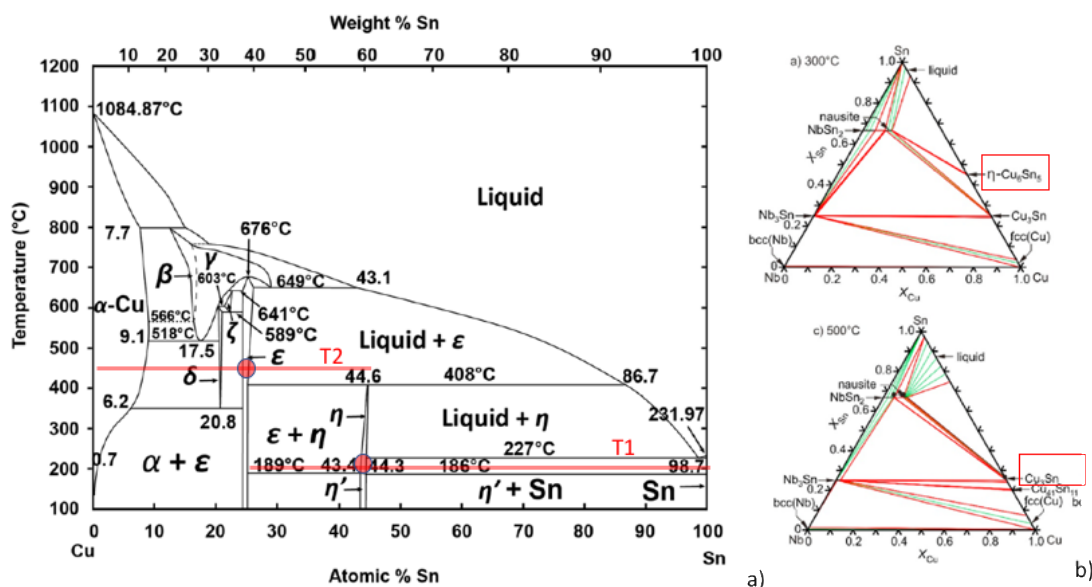


Figure 11 : a) Diagramme de phase binaire Cu-Sn b) Coupes isothermes du diagramme Nb-Cu-Sn à 300°C et 500°C. Les phases visées sont pointées ou entourées en rouge (adapté de [17])

L'ensemble du brin se compose alors d'une matrice de phase  $\epsilon$  et de filaments de niobium. Un dernier traitement thermique à 650°C permet de décomposer cette phase  $\epsilon$  et de former ensuite le composé  $Nb_3Sn$  par diffusion de l'étain dans le Nb. La réaction finale est très favorable énergétiquement (enthalpie de formation de  $Nb_3Sn$  de l'ordre de -16 kJ/mole). Les différentes étapes de cette fabrication sont synthétisées sur la figure 12 à l'échelle d'un sous-élément d'un brin type IT et pour une réaction idéale. Cette réaction de diffusion idéale est dans les faits difficile à obtenir et requiert un ajustement très précis du processus en fonction de la composition exacte et de l'architecture des brins utilisés dans les applications.

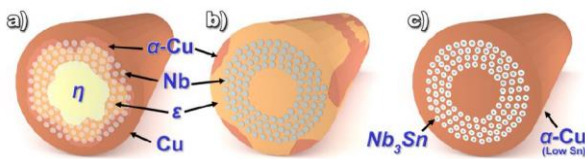


Figure 12 : Les différentes étapes idéale de la création du composé  $Nb_3Sn$  à l'échelle d'un sous-élément d'un brin supraconducteur [11]

Pour obtenir le type d'architecture finale présentée Figure 10, l'étape initiale est la création d'une structure appelée billette, composé d'un empilement de tiges mono-filamentaires. A ce stade, le brin se compose principalement d'étain, de niobium et de cuivre pour les brins  $Nb_3Sn$  ou de cuivre et de tige de NbTi pour les brins NbTi. Pour obtenir cette structure multifilamentaire, des barreaux de niobium avec leurs sources d'étain sont empilés dans des tubes de cuivre, comme présenté Figure 13 pour une billette NbTi. Cette

billette subit ensuite une succession d'étapes de tréfilage (et d'empilage suivant l'architecture) afin d'arriver aux dimensions souhaitées du brin non-réagi.

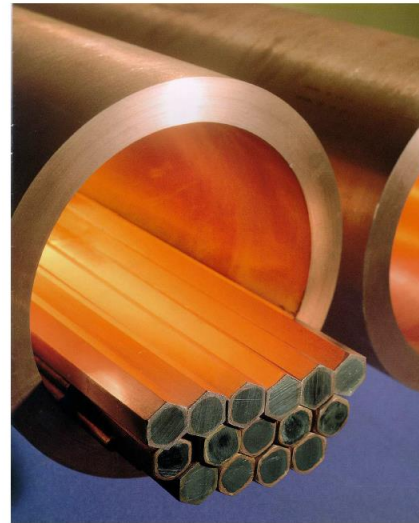


Figure 13 : Empilement de tiges monofilamentaires de NbTi. Photo de Fukurama Electric Company tiré de [18].

Une fois le brin obtenu, non-réagi pour le  $Nb_3Sn$ , il est câblé (suivant l'architecture souhaité – CICC ou Rutherford) puis assemblé dans sa structure finale (bobine par exemple).

Les bobines sont ensuite traitées thermiquement dans des fours adaptés (dimensions, homogénéité, atmosphère contrôlée), souvent de très grandes dimensions comme présenté Figure 14. Comme abordé précédemment, une étape d'imprégnation peut ensuite être menée dans certains cas (aimants d'accélérateurs).

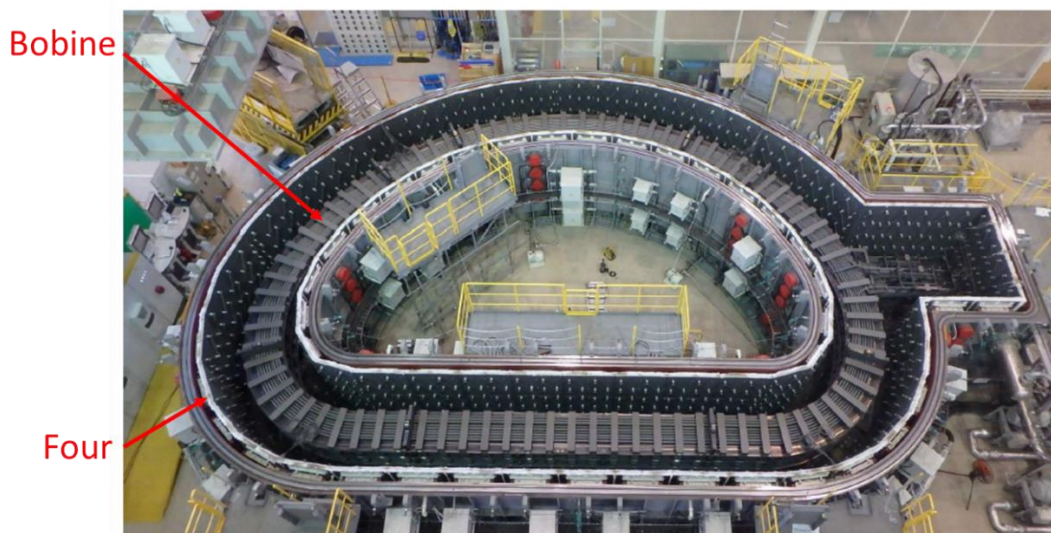


Figure 14 : Four pour le traitement thermique des bobines de champ toroïdale du tokamak d'ITER [19]

Les performances des aimants et plus généralement de la structure supraconductrice dépendent directement du traitement thermique avec l'objectif d'obtenir des performances maximales de courant critique, de champ magnétique mais également de pureté de la matrice

métallique voir de l'ancrage des vortex supraconducteurs par la taille de grains. Plusieurs défis sont donc actuellement en étude avec par exemple :

- le défi de la réduction de la formation de la phase ternaire  $(Nb_{0.75}Cu_{0.25})Sn_2$  dite « Nausite » dans les

étapes intermédiaires du traitement thermique. La formation de cette phase intermédiaire (voir diagramme de phase Figure 11b) conduit à une microstructure hétérogène avec des gros grains de  $Nb_3Sn$  dans l'état final. Les joints de grains étant des défauts qui permettent de fixer les vortex de flux lorsqu'un champ magnétique pénètre le matériau, une petite taille de grains est bénéfique pour augmenter le champ critique maximum.

- prévenir la diffusion de l'étain dans la matrice entre sous-éléments. Dans le cas où de l'étain diffuserait dans le cuivre, il y aurait création d'une solution solide concentrée de type bronze réduisant ainsi la stabilité thermique et mécanique ainsi que la protection électrique du conducteur.

Ces exemples non exhaustifs des problématiques liés au traitement thermique de réaction montrent que les procédés font encore l'objet de travaux à l'heure actuelle et il est probable que cela amènera à des modifications ultérieures des procédés pour améliorer les performances globales des conducteurs.

#### IV/ Performances des câbles supraconducteurs $Nb_3Sn$ en utilisation

En plus de la dépendance réversible à la déformation mécanique, des dégradations irréversibles des performances peuvent être observées à l'échelle du conducteur par endommagement sous forme de fissuration du composé supraconducteur qui prévient le passage du courant. Comme abordé précédemment, l'histoire thermo-mécanique des supraconducteurs est complexe. Même après le traitement thermique de réaction permettant la fabrication du composé supraconducteur  $Nb_3Sn$ , des étapes d'assemblages pour la fabrication des aimants restent à effectuer. Puis la structure est refroidie, est mise en puissance et peut endurer dans son cycle de vie de nombreuses sollicitations thermo-mécaniques suivant les applications. Par exemple, dans les aimants d'accélérateurs, les conducteurs ont tendances à subir majoritairement des efforts de compression transverse au cours de la fabrication puis des sollicitations multiaxiales lors de l'utilisation. Dans les aimants d'ITER, le conducteur CICC présenté figure 7a) et 8 a) permet un mouvement relatif entre les différents brins. Ce mouvement peut mener à de la flexion cyclique locale et à un « pincement » entre brins. La flexion des brins peut entraîner un endommagement et une fissuration des sous-éléments fragile  $Nb_3Sn$  avec la présence de fissure transverse « coupant » totalement un filament et empêchant le courant de passer (Figure 15) [20]. De nombreuses études sur l'influence des sollicitations mécaniques ont été menées voire sont toujours en cours pour comprendre les phénomènes de mécanique de la rupture mis en jeu dans les structures supraconductrices et les prévenir.

Les principales problématiques associées aux performances des conducteurs basés sur le  $Nb_3Sn$  ont été identifiées comme étant liés à deux phénomènes :

- L'état de déformation du  $Nb_3Sn$  liés directement à l'état de pré-contrainte de la phase supraconductrice. Elle est impactée par l'histoire thermo-mécanique lors de la fabrication qui amène des contraintes résiduelles mais également par des sollicitations ultérieures passant par la déformation élasto-plastique de la matrice de cuivre.
- L'endommagement dans la phase  $Nb_3Sn$ . Cet endommagement peut spécialement survenir lors de la fabrication et l'assemblage des structures, moments critiques durant lequel le brin supraconducteur fragile est manipulé, mais peut aussi survenir lors des cycles de vie.

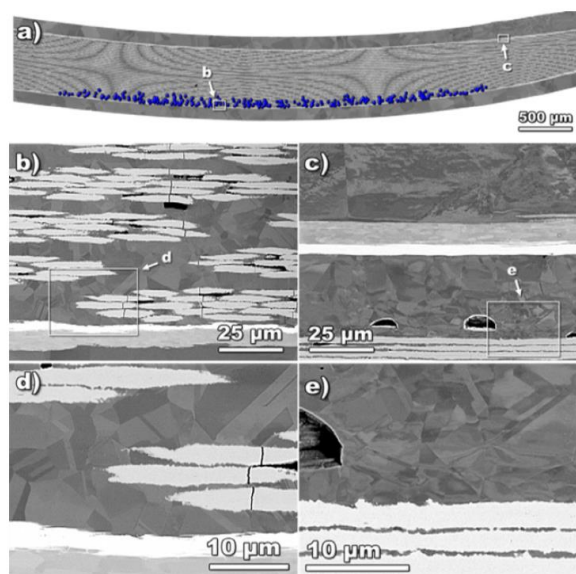


Figure 15 : Coupe longitudinale d'un brin  $Nb_3Sn$  - IT extrait d'un test de chargement cyclique électromagnétique de conducteur CICC pour ITER dans le cadre d'une campagne de test des dégradations cycliques [20]

#### V/ Conclusion

Le câble supraconducteur est un objet hautement technologique à la fois complexe et particulièrement novateur. Les mécanismes de la supraconductivité semblent globalement compris mais de nombreux progrès dans la mise en œuvre sont encore possibles. L'exemple pris dans cet article a permis d'effleurer les problématiques matériaux des câbles supraconducteurs  $Nb_3Sn$  pour les quelques applications citées. Cet exemple montre les nombreuses et différentes disciplines scientifiques mises en jeu ainsi que certaines limites de l'utilisation de ce conducteur spécifique. Les domaines d'applications des supraconducteurs ne se limite pas aux exemples de cet article et s'étendent à mesure de l'augmentation de la fiabilité des dispositifs. Le caractère multidisciplinaire liés à la fabrication et l'utilisation des conducteurs sous différentes formes en font des objets fascinants qui ne manqueront pas de marquer l'avenir.

**VI/ Références bibliographiques**

- [1] Engineering Critical Current Density vs. Applied Field for Superconductors Available in Long Lengths, National High Magnetic Field Laboratory website, :  
<https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>
- [2] Les supraconducteurs : leur rôle aujourd'hui et pourquoi les étudier.  
<http://www.toulouse.lncmi.cnrs.fr/spip.php?article400&lang=fr> , Image adaptée d'American Superconductor, présentation IREQ 2009. 24
- [3] K. Konstantopoulou, J. Hurte, P.W. Retz et A. Ballarino, « Design optimization and evaluation of the 3kA MgB2 cable at 4.3 K for the superconducting link project at CERN », Superconducting Science and Technology, 32 (2019) 085003 (10pp).
- [4] H. Shibata, "Superconducting single-photon detectors" NTT Technical Review, 9 (2011) 13
- [5] P.W. Anderson, P.A. Lee, M. Randeria, T.M. Rice, N. Trivedi, F.C. Zhang, "The physics behind high-temperature superconducting cuprates: the 'plain vanilla' version of RVB", J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004) R755–R769
- [6] S. M. O'Mahony, W. Ren, W. Chen, Y.X. Chong, X. Liu, H. Eisaki, S. Uchida, M.H. Hamidian, J.C.S. Davis, "On the electron pairing mechanism of copper-oxide high temperaturesuperconductivity", Proceedings of the National Academy of Sciences, 119 (2022) e2207449119
- [7] A. Godeke, F. Hellman, H. H. J. ten Kate, M.G. T. Mentink, "Fundamental origin of the large impact of strain on superconducting Nb<sub>3</sub>Sn" Supercond. Sci. Technol. 31 (2018) 105011
- [8] JAEA (2012). JAEA R&D Review 2012. Japan Atomic Energy Agency (JAEA).
- [9] G. Lenoir, « Effect of transverse compressive stress on Nb<sub>3</sub>Sn Rutherford cables for accelerator magnets », presentation during MSC seminar at CERN, 23/06/2022.
- [10] ITER (consulté en 2016). Album photos publié par l'organisation ITER.  
<https://www.iter.org/album.26,30>
- [11] C. Sanabria (2017). "A new understanding of the heat treatment of Nb-Sn superconducting wires". Thèse de doctorat, Florida State University.
- [12] F. P. Levi, "Permanent Magnets Obtained by Drawing Compacts of Parallel Iron Wires," J. Appl. Phys., 31 (1960) 1469–1471
- [13] P. F. Dahl, G. H. Morgan, and W. B. Sampson, "Loss Measurements on Twisted Multifilamentary Superconducting Wires," J. Appl. Phys., 40 (1965) 2083–2085
- [14] A. R. Kantrowitz and Z. J. J. Stekly, "A New Principle for the Construction of Stabilized Superconducting Coils," Appl. Phys. Lett., 6 (1965) 56–57
- [15] X. Wang, Y. Li, Y. Gao, « Mechanical behaviors of multi-filament twist superconducting strand under tensile and cyclic loading. » Cryogenics, 73 (2016) 14–24
- [16] G. Lenoir, "Caractérisation et modélisation du comportement mécanique de matériaux supraconducteurs », thèse de doctorat, CentraleSupélec – Université Paris-Saclay, 2017.
- [17] J. Lachmann, M. J. Kriegel, A. Leineweber, S.L. Shang, Z.K. Liu, CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry 77 (2022) 102409
- [18] A. Devred (2002). « Supraconducteurs à basse température critique pour électroaimants ». Rapport technique, Commissariat à l'Énergie Atomique de Saclay (DSM/DAPNIA/SACM) et CERN (LHC/MMS).
- [19] O. ITER, ITER le magazine 4 (2014) 21
- [20] C. Sanabria, P. J. Lee, W. Starch, A. Devred, et D. C. Larbalestier, « Metallographic autopsies of full-scale ITER prototype cable-in-conduit conductors after full cyclic testing in SULTAN: II. Significant reduction of strand movement and strand damage in short twist pitch CICC », Superconductor Science and Technology, vol. 28, n° 12, p. 125003, déc. 2015, doi: [10.1088/0953-2048/28/12/125003](https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/12/125003).

# MATERIAUX MAGNETIQUES POUR LES VOITURES ELECTRIQUES, ETAT DE L'ART ET PERSPECTIVES.

ANTHONY JUTON<sup>1</sup>, FREDERIC MAZALEYRAT<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> : ENS Paris-Saclay, [anthony.juton@ens-paris-saclay.fr](mailto:anthony.juton@ens-paris-saclay.fr)

**Résumé** : Cet article présente les matériaux magnétiques utilisés pour les motorisations de voitures électriques et les pistes suivies actuellement pour les améliorer, dans le but de diminuer les pertes, les coûts et la dépendance aux fournisseurs chinois, tout en gardant les mêmes puissances massiques.

**Mots clés** : matériaux magnétiques, tôle, aimant, voiture électrique

## I/ Introduction

Dans une machine électrique, la conversion électromécanique repose sur des champs magnétiques au stator et au rotor, qui doivent être canalisés afin de limiter les fuites magnétiques.

Exceptées les voitures électriques de Renault (Zoé, Mégane) qui utilisent des moteurs synchrones à rotor bobiné et quelques exceptions utilisant des moteurs asynchrones, la plupart des voitures électriques intègrent un moteur synchrone à aimants permanents. Les aimants permanents constituent la source de champ magnétique d'excitation au rotor. Les aimants sont qualifiés de matériaux ferromagnétiques durs.

Des matériaux sont aussi nécessaires pour canaliser et multiplier le champ magnétique, ce sont principalement des tôles métalliques ferromagnétiques. Ces matériaux à forte perméabilité sont appelés matériaux ferromagnétiques doux.

Le matériau ferromagnétique contribue à l'induction  $B$  et apportant son aimantation  $M$  de sorte que finalement  $B = \mu_0(H + M)$  où  $M$  est beaucoup plus grande que  $H$  en général. Pour les matériaux durs,  $M$  est dans une large plage indépendante de  $H$ . Au contraire, dans les doux  $M$  dépend de  $H$ ; cette relation peut être linéarisée dans certaines hypothèses en écrivant  $M = \chi H$ , soit  $B = \mu_0 \mu_r H$  avec  $\mu_r = 1 + \chi$ . Au-delà d'un certain champ (souvent plus de 100 kA/m), l'aimantation tend vers la saturation notée  $M_s$ .

Ces deux types de matériaux vont être détaillés ci-après.

## II/ Les matériaux ferromagnétiques doux

Un matériau ferromagnétique doux est généralement caractérisé par son cycle  $B(H)$ , représenté à la figure 1. Pour des champs de quelques milliers d'A/m,  $B \approx \mu_0 M$  car  $M \gg H$ . Ce cycle fermé est appelé cycle d'hystérésis, car les chemins associés à l'augmentation et à la diminution de l'induction  $B$  sont différents. Ce cycle est caractérisé par un faible champ coercitif (moins 100 A/m) et une grande perméabilité (de 10 à 10<sup>6</sup> selon les matériaux). Lorsque  $H$  est très grand,  $B = \mu_0(H + M_s)$ . L'induction ne tend donc jamais vers une valeur de saturation.

Pour beaucoup de matériaux la saturation n'est approchée que pour des champs très élevés, plus de 50 kA/m, alors que les courbes des fournisseurs s'arrêtent à 10 kA/m.

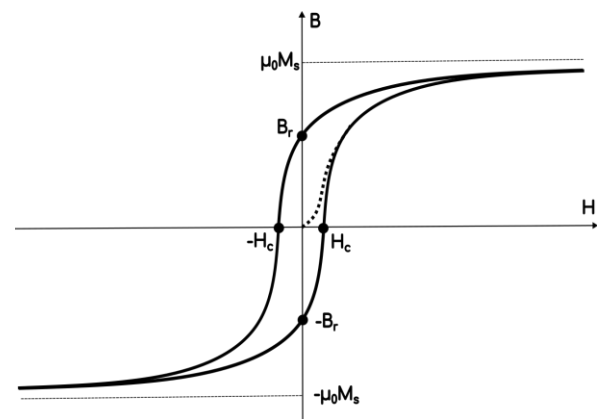


Figure 1 : Cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique doux

La surface de ce cycle représente l'énergie dissipée dans le matériau. On décompose classiquement ces pertes en trois composantes : les pertes par hystérésis, les pertes par courants de Foucault et les pertes supplémentaires.

Les pertes par hystérésis correspondent à l'énergie dissipée lorsque que le cycle est parcouru très lentement (régime quasi-statique). Dans un régime périodique, cette énergie est dissipée à chaque période et les pertes ne peuvent être inférieures à cette valeur. Elles ne dépendent que de l'induction crête.

Les pertes par courants de Foucault sont dues à des courants induits prenant naissance dans le matériau en présence d'un flux magnétique variable (figure 1). Le matériau ayant une certaine conductivité, ces courants induits engendrent au sein du matériau des pertes par effet Joule, appelées pertes par courants de Foucault. Elles dépendent d'induction crête, de la fréquence et de la forme d'onde.

Les pertes supplémentaires sont liées à l'inhomogénéité de l'aimantation dans la matière ferromagnétique (domaines de Weiss [1]), dans les métaux, elles sont dues à des courants de Foucault microscopiques, elles

dépendent donc aussi de l'induction crête, de la fréquence et de la forme d'onde. Un exemple de l'effet de la fréquence sur le cycle d'hystérésis est donné figure 3.

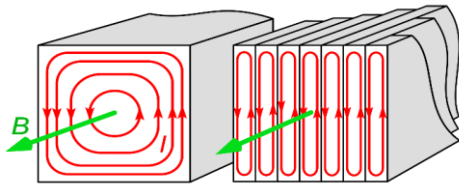


Figure 2 : Origine des courants de Foucault et effet du feuilletage [2].

Les caractéristiques d'un matériau ferromagnétique doux de bonne qualité sont donc :

- une perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  élevée pour multiplier le flux et limiter les fuites (1000 ou plus) ;
- une induction  $B$  la plus élevée possible limitée par la saturation du matériau  $\mu_0 M_s$  (typiquement 2 T) ;
- une résistivité importante, pour limiter les pertes par courants de Foucault (typiquement  $r=500 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ) ;
- un très faible champ coercitif  $H_c$  pour limiter les pertes par hystérésis (typiquement  $<40 \text{ A/m}$ ) ;
- une bonne résistance mécanique pour que la machine ne subisse pas de déformations ;
- un faible coût de production.

Le fer allie un bon comportement ferromagnétique ( $\mu_r > 5000$  selon son degré de pureté et une induction magnétique à saturation de 2,2 Tesla), un coût faible, mais il est mécaniquement trop ductile et assez bon conducteur du courant ( $r=100 \text{ n}\Omega\cdot\text{m}$ ) ce qui favorise les courants de Foucault.

Pour limiter les courants de Foucault, on utilise des tôles de matériaux magnétiques de faible épaisseur, assemblées dans le sens du champ magnétique et isolées entre elles perpendiculairement au sens des courants de Foucault (figure 3).

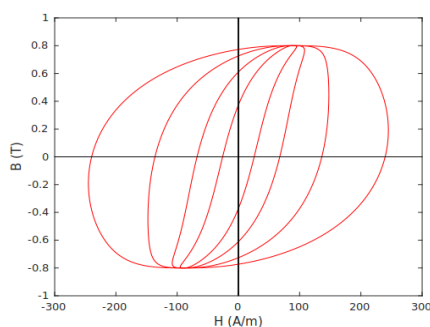


Figure 3 : Cycles d'hystérésis typiques pour une tôle de Fe-Si de 0,35 mm à induction crête fixée et différentes fréquences (50, 200, 500, 1000 Hz).

De plus, on ajoute du silicium au fer pour augmenter sa résistivité et limiter là encore les courants de Foucault.

Actuellement, les machines électriques utilisent donc des tôles fer-silicium (Fe-Si) à grains non orientés

d'épaisseur 0,35 mm (35/100 de mm). Un alliage de 3 % de silicium permet de multiplier la résistivité par quatre et d'augmenter la limite élastique d'un facteur 3 environ. L'aimantation à saturation baisse un peu (2 T), mais perméabilité reste élevée (entre 2000 et 10 000 selon les nuances et le champ magnétique). Plusieurs voies d'amélioration sont envisagées :

**Diminuer l'épaisseur des tôles** permet de diminuer les pertes par courant de Foucault. Des essais sont menés avec des tôles de 24/100 et de 12/100. Cependant, si les tôles sont plus fines, les pertes par hystérésis augmentent parce qu'il y a plus de défauts (les parois des domaines magnétiques s'accrochent sur les parois et le laminage plus fort crée plus de défaut). De plus, diminuer l'épaisseur des tôles augmente le nombre de tôles – donc les coûts d'emboutissage et d'assemblage – et fragilise l'intégrité mécanique (résistance à la compression, délamination...)

**Augmenter la résistivité du matériau** permet également de diminuer les pertes par courant de Foucault, mais ajouter plus de silicium dans la tôle la rend cassante. C'est donc en ajoutant de l'aluminium, métal pourtant très bon conducteur, que l'on augmente finalement la résistivité des tôles. Les atomes d'aluminium, tout comme de silicium, se positionnent à la place des atomes de fer dans la maille, ce qui ne perturbe pas trop les propriétés magnétiques, mais ce désordre augmente la résistivité du matériau. Avec un bon compromis aluminium/silicium (jusqu'à 6 %), on arrive à augmenter la résistivité en conservant des propriétés mécaniques et magnétiques correctes (ductilité pour le laminage).

**Orienter le grain des tôles** donne des résultats intéressants pour les machines électriques de grande taille (transformateurs de transport et distribution). Le métal n'étant pas monocristallin, on sait, par laminage et traitement thermique, orienter les grains des tôles dans une direction privilégiée. On assemble alors la machine avec des tôles aux grains orientées dans le sens du champ. Au niveau des encoches, où le champ n'est pas unidirectionnel, il faut alors utiliser des tôles à grains non orientés. C'est pourquoi actuellement les tôles à grains orientés restent cantonnées aux transformateurs et machines tournantes de grande taille, et restent une voie de recherche pour les machines destinées à l'automobile.

**Les poudres de fer** (ou SMC pour Soft Magnetic Composite) sont des poudres liées pressées à haute température. Les grains ferromagnétiques sont petits (typiquement  $100 \mu\text{m}$ ) et isolés (plus ou moins après le pressage). On dépasse 95 % de charge magnétique. Le matériau obtenu est isotrope et se moule et se recycle facilement, ce qui en fait une voie d'amélioration intéressante pour des machines avec des champs tridimensionnels (machines à flux axial). La perméabilité magnétique est assez faible ( $\mu_r$  aux alentours de 500), mais cela reste acceptable pour des machines à entrefer. De plus, le moulage permet de faire des dents arrondies, et donc d'améliorer le refroidissement et les formes en trois dimensions. Le procédé est encore limité en taille (typiquement 10 cm de diamètre), mais il est envisageable

aussi de ne faire que les pôles du moteur en SMC et le reste en tôle Fe-Si classiques.

**D'autres matériaux** sont utilisés dans l'aviation où les contraintes de poids sont beaucoup plus strictes. Les tôles fer-cobalt (Fe-Co) ont par exemple une saturation à 2,4 T, mais les recherches pour abandonner le cobalt dans les batteries n'ont pas pour ambition de le réintroduire dans les tôles. Les **rubans amorphes** ont des pertes moins grandes, voire quasi nulles à faible fréquence, car elles n'ont pratiquement pas d'hystérésis et ne font que 17 à 25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. En revanche, c'est un verre assez fragile qui se découpe mal, et le taux de foisonnement est important.

### III/ Les matériaux ferromagnétiques durs : les aimants permanents

Le cycle d'hystérésis des aimants est très différent du fait que le champ coercitif est du même ordre de grandeur que l'aimantation rémanente. Les cycles  $\mu_0 M(H)$  et  $B(H)$  (Fig. 4) n'ont qu'un point en commun, la rémanence. Le champ coercitif du cycle  $B(H)$  est plus petit que le champ coercitif intrinsèque  $H_{ci}$ , celui du cycle  $M(H)$ . Les meilleurs aimants ont un champ coercitif intrinsèque tel que  $\mu_0 H_{ci} > B_r$ . Le facteur de mérite des aimants est la valeur maximale du produit  $BH$  qui correspond à 2 fois l'énergie volumique stockée dans l'aimant.

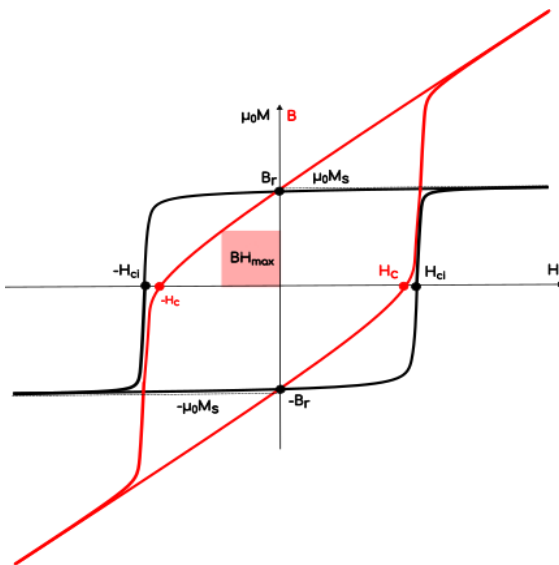


Figure 4 : Cycles d'hystérésis  $M(H)$  et  $B(H)$  d'un matériau magnétique dur anisotrope.

Un aimant permanent est un alliage, ou un oxyde ayant une induction rémanente  $B_r$  et un champ magnétique coercitif  $H_c$  important ( $B_r$  supérieure à 1 T,  $H_c$  supérieur à 100 kA/m à 150 °C).

**Le néodyme-fer-bore** ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  par exemple) est un alliage intermétallique. D'abord, on le broie pour en faire de petits grains. On oriente ensuite les grains avec un champ magnétique, on presse, puis on chauffe à 800 °C pour enlever le liant des grains. Enfin, on procède au frittage (à une température de l'ordre de 1000°C) qui va souder les grains entre eux et résorber la

porosité. Le matériau obtenu est alors aimanté, opération qui nécessite des champs de l'ordre de plus de 2 MA/m. Il peut ensuite être monté la machine et ne peut pratiquement pas être désaimanté.

Le produit d'énergie de ces aimants est d'environ 400 kJ/m<sup>3</sup>. Leurs performances pour les machines synchrones sont tout à fait satisfaisantes.

Sur les machines synchrones classiques, les aimants sont placés au rotor, et donc difficiles à refroidir. Les recherches visent alors à augmenter leur température de Curie (température à laquelle ils perdent leur aimantation) pour permettre d'augmenter la puissance nominale de la machine.

Pour augmenter la température de Curie, on remplace une partie du néodyme par **du dysprosium et du terbium**. Ces deux métaux sont des terres rares lourdes, très chères et extraites quasi-exclusivement par la Chine, créant ainsi une dépendance géopolitique critique à un concurrent notoire dans le domaine des véhicules électriques.

Les recherches ont montré que le champ coercitif dépend beaucoup de la composition des joints de grains. Afin de limiter la quantité de dysprosium/terbium, une nouvelle technique consiste à ne plus mettre ces métaux dans les grains, mais seulement dans les joints de grains. Pour cela, après le frittage du matériau, on place le dysprosium/terbium par-dessus et, en chauffant, celui-ci s'infiltré au niveau des joints des grains. Les quantités de dysprosium/terbium sont alors réduites de manière importante, pour des températures de Curie dépassant les 200 °C.

Par ailleurs, **les ferrites**, qui sont des céramiques d'oxydes de fer, ferromagnétiques, permettant de créer des aimants permanents sans terres rares (par exemple  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ). Ces matériaux progressent également. Bon marché, ils sont bien connus des constructeurs automobiles. Ils sont utilisés comme aimants permanents sur les moteurs électriques de faible puissance (ventilation, essuie-glaces, sièges...). Les performances sont nettement moins bonnes que celles des aimants à terres rares. On atteint  $B_r = 0,4$  T avec  $H_c = 275$  kA/m. Cependant, la température de Curie est bien meilleure et dépasse 450 °C.

L'utilisation du lanthane pour remplacer en partie le strontium, testée récemment, avec un peu de cobalt à la place du fer, permet d'approcher des limites théoriques des 50 kJ/m<sup>3</sup> d'énergie volumique et 0,5 T de champ rémanent.

Ces performances moindres pourraient trouver leur place dans de nouvelles structures de machines synchrones à réluctance variable assistées par des aimants placés au rotor. Le couple de ces machines est principalement dû au couple réluctant provoqué par la saillance du rotor, ce qui permet de mettre des aimants de moindre performance.

Ces aimants pourraient aussi trouver leur place dans les machines synchrones à double excitation de type commutation de flux, où les aimants placés au stator



peuvent prendre plus de place afin d'avoir des performances équivalentes aux aimants en terres rares.

Notons enfin que des recherches plus fondamentales existent pour trouver des aimants entre le Nd-Fe-B et les ferrites, par exemple en substituant le néodyme par le cérium, une terre rare plus courante et meilleur marché.

D'autres recherches visent à utiliser du mischmétal, qui est un alliage où les terres rares ne sont pas séparées. On obtient un aimant moins performant mais nettement moins cher, car on évite le coût de la séparation. Les terres rares étant très proches dans la table de Mendeleïv (seule la quatrième couche d'électrons sur six les différencie), elles se trouvent dans les mêmes minéraux et sont donc difficiles à séparer.

#### IV/ Références bibliographiques

- [1] La revue 3EI n°41 (2006)  
[https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/materiaux-magnetiques-doux-pour-la-conversion-denergie#description](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/materiaux-magnetiques-doux-pour-la-conversion-denergie#description)
- [2] Figure issue de Wikipedia
- [3] Technologies des voitures électriques, Dunod, mai 2021



## INITIATION A L'ETUDE DES PLASMAS FROIDS DANS LE DOMAINE AEROSPATIAL

GIACOMO GALLI, VALENTIN MAZIERES, CYRIL CAILHOL, NAOMI DE MEJANES,

Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, 10 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse, France, [giacomo.galli1235@gmail.com](mailto:giacomo.galli1235@gmail.com)

**Résumé :** Le plasma, qui est souvent vu comme le « quatrième état de la matière », possède de nombreuses applications dans divers domaines, dont le domaine aérospatial. Ces applications, ainsi que les plasmas correspondants, sont de natures très diverses. Ils sont utilisés par exemple pour de la combustion assistée par micro-onde pour des moteurs, ainsi que pour du contrôle d'écoulement, ou encore pour le traitement de surface de nombreuses pièces aéronautiques, mais aussi pour la propulsion de satellite dans l'espace.

Les étudiants de l'ISAE-SUPAERO sont déjà totalement immergés dans le domaine aérospatial. Ce cours constitue une ouverture sur la physique des plasmas froids. Il leur permettra d'acquérir une connaissance approfondie des méthodes requises pour contrôler et étudier un plasma DC, à travers des travaux expérimentaux et de simulation

### I/ Positionnement de l'activité

Le plasma, qui est souvent vu comme le « quatrième état de la matière », constitue, selon certaines estimations, la majorité de la matière connue de notre univers (autour de 99%). Sur Terre, on ne le rencontre pas à l'état naturel, si ce n'est dans les éclairs ou les aurores boréales, mais on le produit artificiellement par exemple en appliquant des champs électriques suffisamment élevés pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz (on dit que l'atome ou la molécule est *ionisée*). Dans notre vie quotidienne, les plasmas ont de nombreuses applications (micro-électronique, écrans plats de nos téléviseurs, ...), dont la plus familière est le tube néon qui éclaire nos salles de bain [1]. Suivant la température, le gaz peut être partiellement ou totalement ionisé (en fonction de la proportion d'atomes ou de molécules qui sont ionisés). Un plasma peut donc être considéré comme un mélange d'ions chargés positivement et d'électrons chargés négativement, coexistant éventuellement avec des atomes et des molécules neutres. Par exemple, dans notre tube luminescent, les ions et les électrons sont peu nombreux par rapport aux atomes et aux molécules [2]. Par contre,

dans les plasmas produits pour les expériences de fusion, le gaz est fortement ionisé, et les atomes et molécules sont en faible proportion, voire totalement absents dans le cœur de la décharge [3]. Dans les deux cas, il est possible de décrire les plasmas en s'inspirant de la mécanique des fluides, en utilisant des grandeurs macroscopiques habituelles, telles que densité, température, pression, vitesse d'écoulement (le modèle que l'on utilise alors pour décrire de plasma s'appelle « modèle fluide »). Les plasmas trouvent aussi de nombreuses applications dans le domaine aérospatial. Ces applications, ainsi que les plasmas correspondants, sont de natures très diverses. Ils sont utilisés par exemple pour de la combustion assistée par micro-onde pour des moteurs, ainsi que pour du contrôle d'écoulement, ou encore pour le traitement de surface de nombreuses pièces aéronautiques, mais aussi pour la propulsion de satellite dans l'espace [4]. Le plasma est un milieu à la fois très intéressant et très complexe, et le but de ce cours est de donner aux étudiants un premier aperçu de la physique de ces objets.

Le cours présenté dans cet article propose une structure basée sur l'expérience (70%), avec une part de simulation (20%) et quelques rappels théoriques (10%).

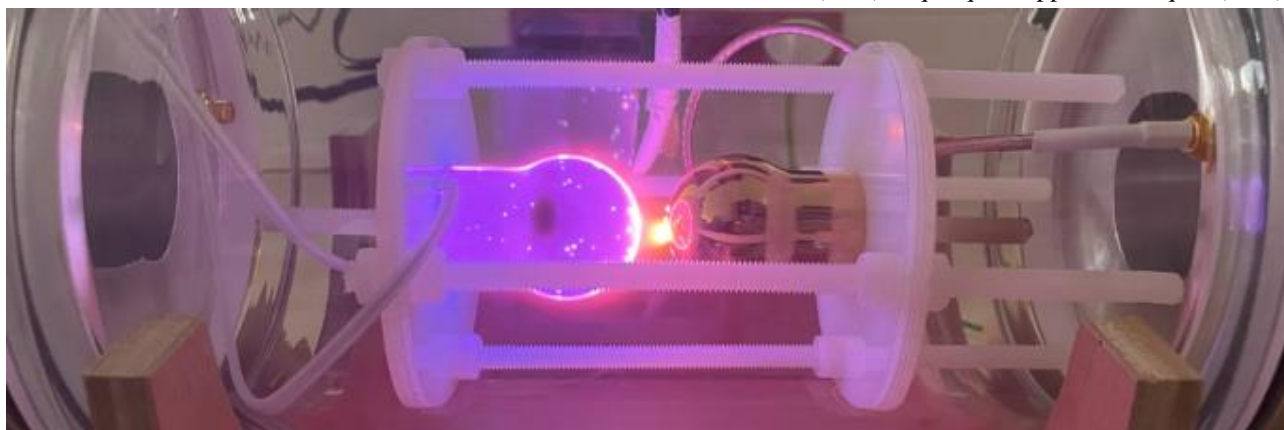


Figure 1 : Plasma DC à basse pression (~1 Torr) allumé dans l'enceinte à vide conçue pour le cours « Initiation à l'étude des plasmas froids dans le domaine aérospatial ».

L'idée derrière le cours est de familiariser les étudiants :

- aux techniques pour contrôler et mesurer la pression dans un espace confiné,
- aux techniques et les problèmes liés au contrôle du champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes, y compris grâce à l'utilisation de simulations de champs électrostatiques,
- à la génération du plasma et à son étude paramétrique en faisant varier les conditions externes (pression ou type de gaz, tension ou puissance, géométrie des électrodes, polarité, matériau, ...).

Chaque compétence est utilisée avec l'objectif final de créer et contrôler un plasma stable dans la chambre d'expérience (figure 1).

## II/ Moyens mis en œuvre avec détail des coûts

Pour toutes les simulations électrostatiques nous avons choisi d'utiliser ANSYS Maxwell, logiciel qui était déjà à disposition de l'ISAE-SUPAERO. En tout état de cause, le même type de simulations (avec les mêmes résultats) aurait été possible par exemple avec COMSOL Multiphysics.

Une pompe « EDWARDS nEXT turbomolecular pumping stations » a été utilisée pour obtenir le vide nécessaire aux expériences de conductance (~0.1 mTorr) ainsi qu'aux expériences plasma (~0.1Torr). Deux sondes « Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364 » de pression ont été utilisées pour mesurer la pression dans la chambre à vide.

Une alimentation électrique DC flottante « MAGNA-POWER XR Series (2kV, 2A) » a été utilisée pour créer la différence de potentiel (champ électrique) entre les deux électrodes. Une sonde de tension « TECPEL DP-25 High Voltage Differential Probe 25MHz » a été utilisée pour mesurer la différence de potentiel entre les deux électrodes.

La chambre d'expérience consiste en un seul bloc de verre cylindrique avec trois raccords pour le pompage et pour l'alimentation électrique (figure 2).

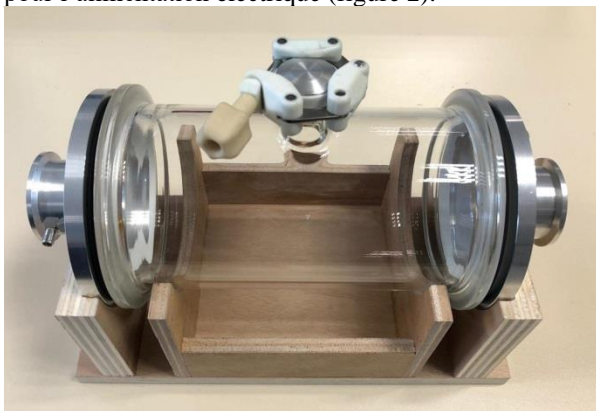


Figure 2. Chambre à vide en verre pour permettre les manipulations plasma et ajuster la pression.

Le Tableau 1 liste les différents appareils expérimentaux spécifiques à l'allumage de plasmas basse pression utilisés dans le cours ainsi que leurs

fonctions. De plus, le prix de chaque instrument est aussi mentionné pour permettre au lecteur d'avoir une idée des coûts derrière la conception d'un tel cours.

Nom	Fonction	Prix
EDWARDS nEXT turbomolecular pumping stations	Diminution de la pression dans la chambre d'expérience	8000 €
Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364	Mesure de la pression dans la chambre d'expérience	3000 €
MAGNA-POWER XR Series	Créer une différence de potentiel entre les électrodes	7000 €
Chambre d'expérience en verre	Confiner le gaz à basse pression	1600 €

Tableau 1. Matériel utilisé, coûts et objectifs.

Pendant le cours, d'autre matériel d'expérimentation moins spécifique à l'allumage de plasma, tel que des sondes, des câbles et des oscilloscopes sont aussi utilisés pour détecter/afficher les tensions et les courants des différents montages électriques, ainsi que des ordinateurs qui sont utilisés pour effectuer des simulations.

## III/ Configuration expérimentale

La figure 3 montre un schéma du dispositif expérimental. Il est constitué d'une enceinte à vide dans laquelle deux électrodes sphériques en cuivre ont été placées à une distance d'environ 5,5 mm. L'air gazeux à l'intérieur de la chambre pouvait être pompé jusqu'à une pression de l'ordre de 50 mTorr. Un champ électrique intense est généré entre les deux électrodes à l'aide d'une alimentation flottante en courant continu haute tension MAGNA-POWER XR Series ( $\pm 2\text{kV}$ , 2A). Une résistance de protection de 2 k $\Omega$  a été placée entre l'alimentation et l'électrode non à la masse, pour limiter le courant pendant la décharge électrique (la limitation des courants rend le système plus sûr pour les utilisateurs et réduit les dommages causés aux électrodes par la décharge elle-même). La tension et le courant ont été surveillés à l'aide d'une sonde haute tension et d'une sonde de courant, toutes deux connectées à un oscilloscope.

La tension de claquage de la décharge plasma a été mesurée de trois manières différentes, en augmentant progressivement la tension appliquée jusqu'à l'observation :

1. d'un courant sur la sonde de courant,
2. d'une chute de tension sur la sonde de tension,
3. de la détection visuelle de la lumière émise par le plasma.

Ces trois méthodes ont été choisies car, en fonction du type de plasma généré (pression, forme des électrodes ou type de gaz), ils ne sont pas tous en mesure

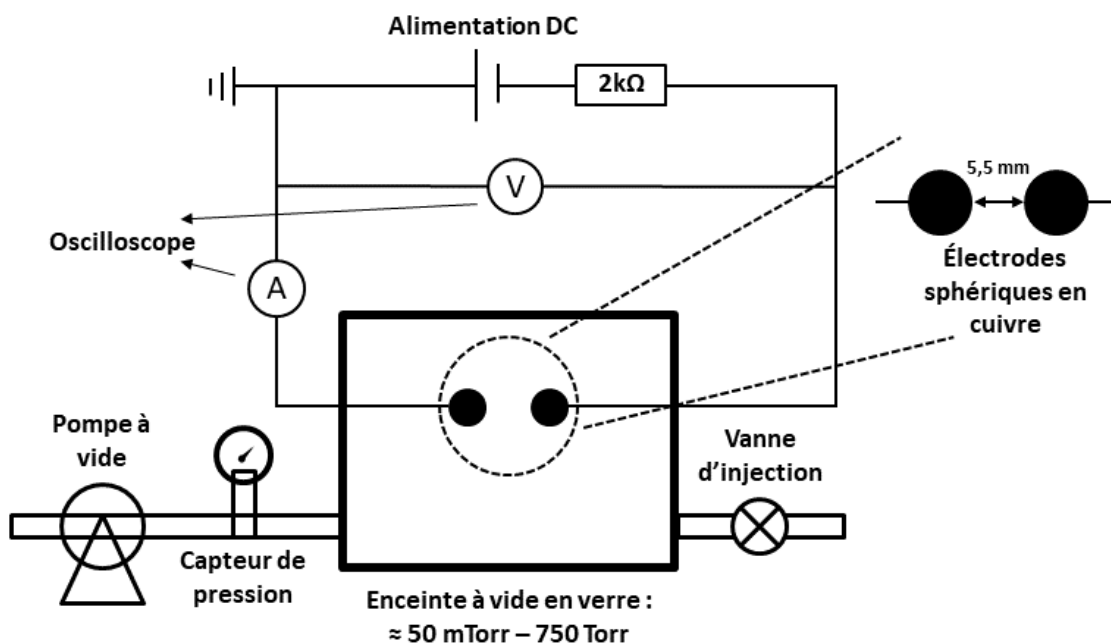


Figure 3. Montage expérimental pour la mesure de la tension d'amorçage et d'extinction de la décharge partielle.

de détecter la tension de claquage. A titre d'exemple, à la distance choisie (5,5 mm) et avec deux électrodes sphériques, en dessous d'une pression de 500 mTorr, seule la détection visuelle est efficace.

Une fois la tension de claquage mesurée, la tension a ensuite été lentement réduite jusqu'à ce que la disparition du courant soit observée, et la tension d'extinction a été enregistrée. Cette même procédure a ensuite été utilisée pour différentes pressions de gaz. Enfin toute cette séquence de mesures a été répétée deux fois afin d'avoir trois mesures pour chaque condition expérimentale.

#### IV/ Consignes

Le cours dure 20 heures, les étudiants (3 pour chaque groupe de TP) sont encadrés la moitié du temps (~10 heures) par deux enseignants. Pendant les 10 heures restantes, les étudiants effectuent des recherches ou simulations en autonomie. Dans le cas des expériences en laboratoire, la tension est appliquée en présence d'au moins un des professeurs, ensuite (si rien ne change dans le circuit électrique) les étudiants sont libres de continuer à manipuler de manière autonome.

##### IV.1/ Compétences visées

- C01 : Créer un système à partir d'un cahier de charge
- C02 : Être capable de contrôler la pression dans un espace confiné
- C03 : Comprendre les problèmes liés au contrôle du champ électrique entre deux ou plusieurs électrodes en termes d'uniformité et d'intensité
- C04 : Simuler le champ électrique entre deux électrodes
- C05 : Comprendre les mécanismes qui régissent la génération des plasmas froids et leurs caractéristiques en fonction de paramètres externes (pression ou type de gaz, tension ou puissance, géométrie des électrodes, polarité, matériau, ...)

matériau, ...)

##### IV.2/ Critères d'évaluation

Volonté et curiosité.

Autonomie des binômes/trinômes dans le travail à effectuer (recherches, simulations et manipulations).

Création et fonctionnement de l'expérience.

Qualité du travail et de la participation pendant le cours.

Qualité du compte rendu en termes :

- présentation et rédaction
- justifications et commentaires des choix effectués et des résultats obtenus
- capacité de synthèse

#### V/ Présentation générale

Le cours présenté dans cet article sera divisé en quatre parties :

1. présentation des plasmas froids (décharge électrique) et loi de Paschen.
2. techniques du vide.
3. techniques du contrôle de l'alimentation électrique.
4. expérience plasma.

Pour une grande partie des sujets présentés, des supports ont été construits pour les étudiantes et seront joints à l'article.

##### V.1/ Présentation des plasmas froids (décharge électrique)

Une décharge électrique peut se produire lorsqu'un électron germe (initialement présent dans le gaz) accéléré par un champ électrique acquiert une énergie supérieure à l'énergie d'ionisation des atomes/molécules du gaz, conduisant à une avalanche électronique. Les sources naturelles d'électrons germes comprennent les rayons cosmiques et la photo-ionisation.

En supposant la présence d'électrons germes, les conditions qui conduiront à une avalanche d'électrons sont décrites par la loi de Paschen [5-7] (1) :

$$V = \frac{B \times P \times d}{\ln(A \times P \times d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (1)$$

où  $P$  et  $d$  sont respectivement la pression du gaz de remplissage de l'enceinte et la distance inter-électrodes,  $\gamma$  est le coefficient d'émission secondaire (le rendement des électrons provenant de l'impact des ions positifs sur la cathode qui est normalement de l'ordre de  $10^{-4}$ - $10^{-2}$ ) et  $A$  et  $B$  sont des coefficients qui dépendent de la nature du gaz et qui sont présentés, pour les principaux gaz, dans le tableau I.

Table 1. Coefficients empiriques de la loi de Paschen [8]

	$A$ (Torr $^{-1}$ cm $^{-1}$ )	$B$ (V Torr $^{-1}$ cm $^{-1}$ )
H <sub>2</sub>	5	130
N <sub>2</sub>	12	342
Air	15	365
He	3	34
Ne	4	100
Ar	14	180
Xe	26	350

La figure 4 montre les courbes de Paschen pour différents gaz. L'abscisse est le produit de la pression par la distance inter-électrode, et l'ordonnée est la tension au-dessus de laquelle une décharge pourrait se produire. La tension de décharge passe par une valeur minimale de l'ordre de quelques centaines de volts, selon le type de gaz.

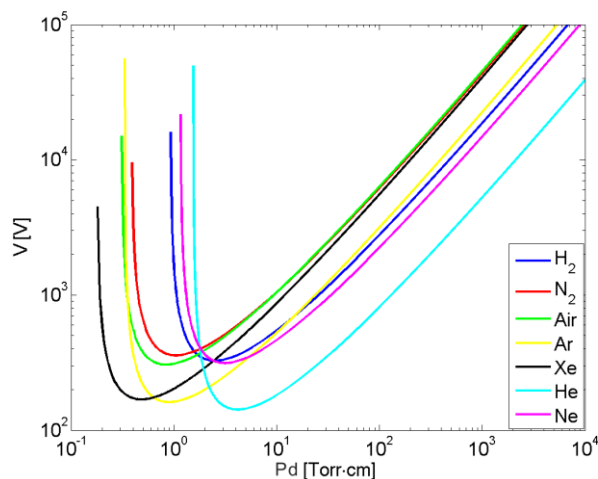


Figure 4. Courbe de Paschen pour différents gaz.

La loi de Paschen est dérivée pour un cas d'électrodes planes infinies, en d'autres termes, pour le cas d'un champ électrique uniforme.

A la fin de cette partie, les étudiants doivent être capables de comprendre et d'interpréter ces courbes de Paschen et ainsi de comprendre l'importance de contrôler la pression et le champ électrique pour amorcer un plasma froid

## V.2/ Techniques du vide

Le vide est ordinairement défini comme l'absence de matière dans une zone de l'espace [9].

Pour le cours présenté dans cet article, nous allons explorer un niveau de vide allant de 10mTorr à la pression atmosphérique (750Torr).

Les étudiants sont donc d'abord initiés au système de pompage (figure 5), aux systèmes de mesure (figure 6) et aux erreurs de mesure de la pression.



Figure 5. Système de pompage utilisé, qui consiste en une pompe primaire, une turbopompe moléculaire et un système de contrôle électronique.



Figure 6. Sondes de pression à membrane utilisées (Pfeiffer VACUUM CMR 361 et 364) [10-11].

Deux sources principales d'erreurs de mesure de la pression peuvent être identifiées. La première vient de la précision de la sonde elle-même, qui est donnée sur la fiche technique de la sonde. La deuxième vient de la différence de pression qui peut être induite entre l'entrée et la sortie d'une connexion (en fonction de sa conductance). Dans ce cas la pression qui est lue au niveau de la sonde (entrée de la connexion) n'est pas une image fidèle de la pression présente dans l'enceinte à vide par exemple (sortie de la connexion).

### V.2.1/ Conductances

La conductance ( $C$ ) entre deux points d'une conduite est définie comme le débit de gaz traversant la conduite divisé par la chute de pression qui le met en mouvement.

En fonction du produit de la pression du gaz ( $P$ ) et du diamètre de la conduite ( $d$ ), le gaz peut se trouver dans différents régimes fluidodynamiques, dans lequel la conductance ne dépend pas des mêmes paramètres. Dans le régime turbulent ou laminaire ( $P \cdot d \geq 0.02$ ) la conductance est donnée par :

$$C = \frac{\pi d^4}{12.8 \cdot \eta L} \left( \frac{P_2 + P_1}{2} \right) \quad (2)$$

alors que dans le régime moléculaire la conductance est donnée par :

$$C = \frac{10}{6} \sqrt{\frac{2\pi K T}{M}} \cdot \frac{d^3}{L} \quad (3)$$

avec  $\eta$ ,  $K$  et  $M$  respectivement la viscosité du gaz (en bars), la constante de Boltzmann et la masse molaire (en kg/mol) et  $P_1$  et  $P_2$  la mesure de pression en deux points de la conduite entre lesquels la conductance va être calculée.

En utilisant deux sondes de pression identiques, trois raccords à vide d'un mètre de long et de différents diamètres (1mm, 16mm et 40mm), une pompe à vide et tous les raccords nécessaires pour connecter les différents éléments, les étudiants font l'expérience de l'erreur de mesure entre l'entrée et la sortie d'une connexion, qui peut se produire lorsque l'on passe sans le savoir d'un régime laminaire ou turbulent (la valeur de la conductance dépend de la différence de pression entre deux points, comme dans la formule 2) à un régime moléculaire (la valeur de la conductance ne dépend plus de la pression moyenne entre deux points mais uniquement du diamètre et de la longueur de la canalisation, comme dans la formule 3).

### V.3/ Techniques du contrôle de l'alimentation électrique

Une alimentation électrique (MAGNA-POWER XR Series) flottante à haute tension en courant continu a été utilisée pour alimenter les électrodes (figure 7).



Figure 7. Alimentation électrique utilisée pour générer la différence de potentiel entre les électrodes.

Les étudiants ont été sensibilisés aux dangers de la tension et du courant dans le cadre d'un cours théorique agrémenté d'exemples pratiques. Ensuite, les étudiants se sont familiarisés avec les commandes de l'alimentation électrique, qui, bien que capable de délivrer 2KV et 2A, a été limitée à 1KV et 500mA (ce qui

a été considéré comme suffisant pour la poursuite du projet) pour des raisons de sécurité des étudiants ainsi que des équipements.

### V.3.1/ Simulations électrostatiques

Historiquement, les paramètres  $A$  et  $B$  de la loi de Paschen présentés table 1 ont été obtenus empiriquement afin de décrire la tension de claquage entre deux électrodes plates infinies à une distance  $d$  (champ électrique parfaitement homogène).

En pratique, il n'existe pas d'électrodes de taille infinie, mais il est possible d'obtenir un champ électrique homogène en utilisant d'autres géométries. Pour choisir les types, la forme et la taille des électrodes, les étudiants se sont appuyés sur des simulations électrostatiques réalisées à l'aide d'ANSYS MAXWELL. Deux électrodes plates et deux électrodes sphériques ont ensuite été comparées.

Bien que l'utilisation de deux électrodes plates donne les meilleurs résultats en simulation en ce qui concerne l'homogénéité du champ électrique, les effets de bord ainsi que la difficulté à gérer le parallélisme (et donc la distance entre les électrodes) induisent une complexité plus élevée pour la conception du dispositif expérimental.

Les étudiants ont donc été invités à réfléchir à la taille des électrodes sphériques nécessaire pour obtenir un champ électrique homogène sur un volume le plus élevé possible avec une distance entre elles de 6 mm.

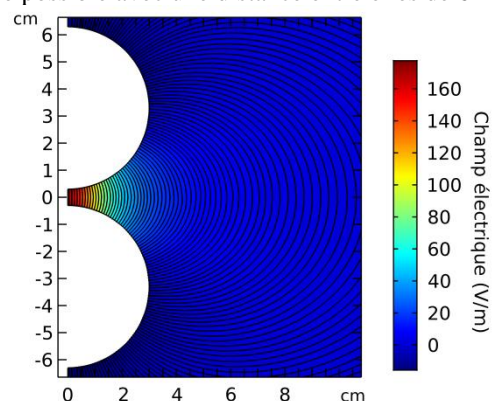


Figure 8. Simulation du champ électrique, par éléments finis, dans une géométrie sphère-sphère, avec une distance inter-électrodes de 6mm et un diamètre de sphère de 6cm.

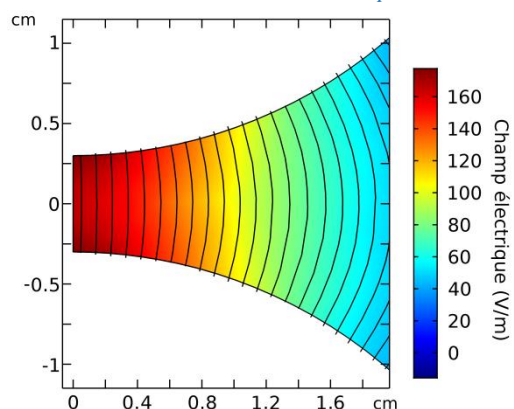


Figure 9. Zoom de la figure 8, entre  $\pm 1$ mm en axe  $y$  et de zéro à 2mm en axe  $x$ .

Les résultats des simulations en figures 8 et 9 montrent comment le champ électrique, entre des électrodes sphériques de rayon 3cm, est relativement uniforme axialement sur la ligne centrale des sphères (entre 0 et 0.4cm de rayon, la variation horizontale verticale est inférieure à 2%). Ainsi, pour des décharges plasma amorcées pour des produits  $Pd$  supérieurs au minimum de la courbe de Paschen (partie droite des courbes de la figure 4) les résultats expérimentaux suivront le comportement prévu par la théorie, puisque les décharges seront toujours amorcées dans la région de « chemin » le plus court (*ie* la région où le champ est relativement uniforme). Par contre pour des produits  $Pd$  inférieurs au minimum de la courbe de Paschen (partie gauche des courbes de la figure 4), la valeur du champ de claquage trouvée expérimentalement sera toujours égale à celle du minimum de la courbe de Paschen (il existera toujours un « chemin » d'une certaine distance  $d$  le long duquel les conditions d'amorçages sont les plus favorables). On note ici la contrepartie de l'utilisation d'électrodes sphériques : la conception du dispositif est plus simple mais il n'est pas possible de tracer la « partie gauche » de la courbe de Paschen. Cela permet en revanche d'être sûr que les étudiants ont bien compris les « courbes de Paschen » pour être capable de comprendre ce qu'il se passe sur leur dispositif pour de faibles valeurs de  $Pd$  (côté gauche de la courbe de Paschen).

Afin d'aller plus loin, les étudiants ont aussi à leur disposition une paire d'électrode « pointe-plan » pour investiguer l'influence d'un champ fortement non-uniforme dans une configuration non-symétrique. Cette configuration d'électrode a aussi été simulée par les étudiants.

#### V.4/ Expérience plasma

Au cours de l'expérience plasma, les étudiants sont mis au défi de tracer la courbe de Paschen et d'étudier le comportement du plasma froid pour différentes pressions et configurations d'électrodes.

Les électrodes utilisées seront de trois types :

- hémisphériques polies,
- hémisphériques sablées,
- point-plan.

Les sujets qui seront abordés sont les suivants :

1. la cause à la base de la luminosité du plasma,
2. la diffusion du plasma à différentes pressions et leurs causes,
3. la courbe de Paschen,
4. les effets de pointe (renforcement du champ électrique).

Pour les points 1 et 2 ont été utilisées les électrodes hémisphériques polies (figure 10) car ce sont celles qui permettent le mieux d'obtenir des résultats conformes à la courbe de Paschen « classique » (électrodes plan-plan infinies). En effet, compte tenu de leur taille (6 cm de diamètre) et de la distance entre les électrodes (5,5 mm), ils créent un champ électrique relativement homogène

entre les deux électrodes, comme l'ont démontré les simulations du chapitre V.3.1.



Figure 10. Électrodes hémisphériques avec polissage (à gauche) et sablé (à droite) à utiliser pendant ce cours.

Toutes les photos et graphiques qui seront présentés dans ce chapitre ont été obtenus par les étudiants du cours.

#### V.4.1/ La lumière du plasma

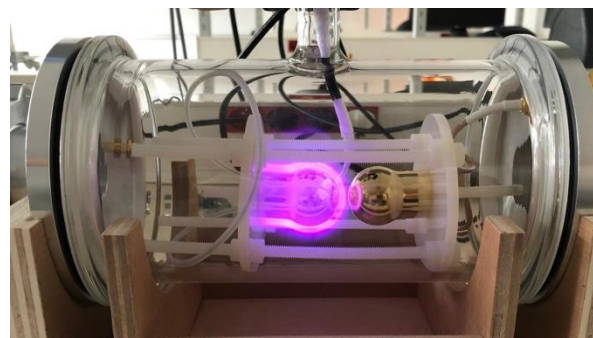


Figure 11. Plasma allumée dans l'air.

Dans le plasma, comme on l'a expliqué, il se produit des phénomènes d'ionisation, mais aussi des phénomènes d'excitation des atomes. C'est pourquoi, une fois que les électrons des atomes excités reviennent à leur état fondamental, ils émettent des photons dont la longueur d'onde dépend du saut d'énergie entre l'état excité et l'état fondamental.

Le spectre d'émission est donc dépendant du type de gaz utilisé.

Les étudiants ont pu allumer des plasmas dans différents gaz (Argon, air et néon) et ainsi observer les différences de couleur.

#### V.4.2/ La diffusion du plasma à différentes pressions et leurs causes

Le plasma froid, comme déjà mentionné, est dans ce cas généré par une avalanche d'électrons entre les deux électrodes. Ce sont donc les électrons qui ionisent la matière lorsqu'ils la traversent, perdent de l'énergie (vitesse) et génèrent d'autres électrons.

S'il n'y a pas d'intensification du champ électrique dû à une asymétrie entre les électrodes (les deux électrodes sont similaires) le plasma aura tendance à s'allumer sur la cathode (comme par exemple montré sur la figure 11).

La distance que les électrons peuvent parcourir entre deux collisions est inversement proportionnelle à la pression du gaz, donc le plasma est observé plus loin de

la cathode à basse pression et plus près de la cathode à haute pression. En suivant la même procédure, à basse pression, le plasma sera moins lumineux, car l'énergie est répartie sur un plus grand volume, tandis qu'à haute pression, il sera plus lumineux, car l'énergie est répartie sur un plus petit volume.

Les étudiants ont pu en faire l'expérience directe (figure 12) en créant des plasmas dans l'air à différentes pressions et en observant le comportement des plasmas générés.

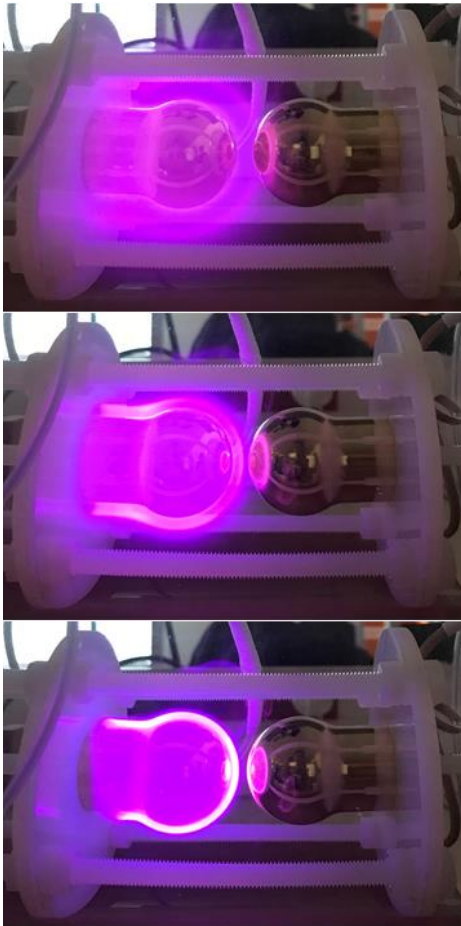


Figure 12. Evolution de la diffusion des plasmas générés dans l'air à : 100 mTorr (en haut), 1 Torr (au milieu), 10 Torr (en bas).

#### V.4.3/ La courbe de Paschen

La théorie de la courbe de Paschen a déjà été largement décrite dans le chapitre V.1. Les étudiants sont mis au défi de tracer la courbe de Paschen (avec les incertitudes de mesure), en suivant le protocole présenté à la figure 13.

Pour une pression donnée, le protocole a été appliqué trois fois afin de recueillir trois valeurs de tension de décharge, ce qui a ensuite permis de calculer une valeur moyenne et une barre d'erreur. L'erreur de pression a été prise en compte en considérant l'erreur intrinsèque de la sonde de pression utilisée. Il est important de noter que l'utilisation de seulement trois mesures pour calculer une moyenne ou une barre d'erreur sur la tension de claquage n'est bien sûr pas suffisante. Ce choix de trois mesures a été pris à cause de la contrainte de durée du cours, qui ne permettait pas aux étudiants de faire plus

de mesures sur le temps qu'il leur était imparti. Ce point a été spécifié aux étudiants, l'important étant que ces derniers puissent vérifier expérimentalement que le phénomène de claquage a une composante statistique.

Les étudiants ont tracé la loi de Paschen pour deux géométries d'électrodes (sphère-sphère et point-plan) schématisées dans la figure 14.

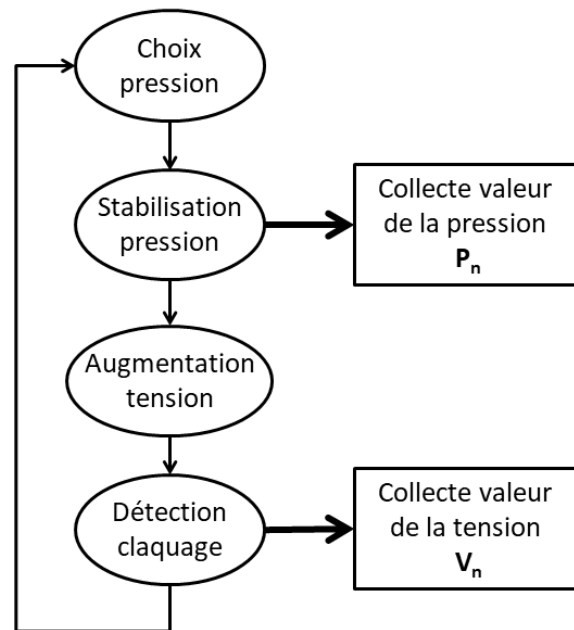


Figure 13. Protocole utilisé par les étudiants pour mesurer la tension de claquage afin de tracer la courbe de Paschen.

Comme expliqué précédemment, la géométrie sphère-sphère a été utilisée pour tracer une courbe de Paschen dans des conditions standards (champ électrique relativement homogène), tandis que la géométrie électrode point-plan a été utilisée pour explorer la courbe de Paschen dans des conditions de renforcement du champ électrique au niveau d'une électrode (champ électrique hétérogène).

Les étudiants ont ensuite tracé la courbe de Paschen pour les deux géométries d'électrodes qui leur ont été proposées, et les ont comparées à la courbe de Paschen théorique

Sur la figure 15 est tracé la comparaison des résultats expérimentaux avec la courbe de Paschen théorique, pour un claquage dans l'air et des électrodes sphère-sphère (polie-polie et sablée-polie). La courbe théorique a été tracée avec un coefficient d'émission secondaire  $\gamma = 10^{-2}$  [12-13].

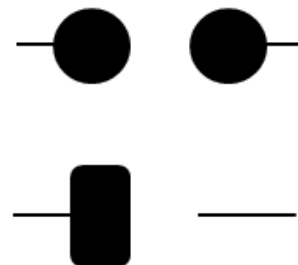


Figure 14. Schématisation des électrodes (distance inter-électrodes de 5.5 mm) utilisées par les étudiants pour



mesurer la tension de claquage afin de tracer la courbe de Paschen.

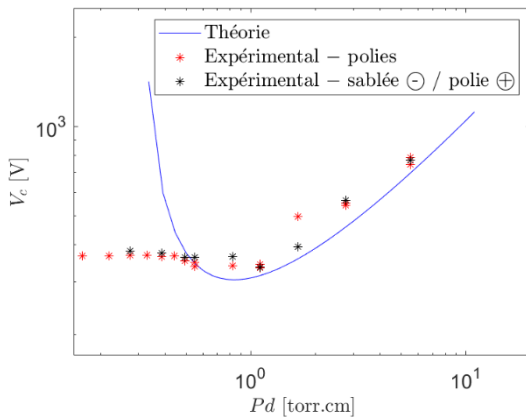


Figure 15. Courbe de Paschen théorique pour l'air (noir) et points expérimentaux sur la courbe de Paschen obtenus en faisant varier la pression du gaz dans la chambre expérimentale avec des électrodes sphère-sphère (polie-polie et sablée-polie)

Comme spécifié précédemment, les points obtenus à l'aide des électrodes sphériques devraient suivre le comportement de la courbe théorique pour des produits  $Pd$  supérieurs au minimum de Paschen et être constants pour les  $Pd$  inférieurs.

Comme attendu, les étudiants ont immédiatement observé que les points en question suivent relativement fidèlement la courbe théorique en ce qui concerne le minimum Paschen et le bras droit de la courbe. De plus, les points obtenus sont bien constants sur la « partie gauche » de la courbe.

Les étudiants ont ensuite étudié l'influence de l'état de surface des électrodes (polie ou sablée) sur les courbes de Paschen. Les étudiants ont pu se rendre compte visuellement que les décharges plasmas n'étaient pas de même nature selon les états de surfaces (des points localisés scintillants dans le cas des électrodes sablées). Cela est certainement dû à des concentrations locales de champ électrique avec les électrodes sablées. En revanche, pour notre dispositif expérimental, l'état de surface n'a pas un impact significatif sur les courbes de Paschen expérimentales (comme le montre par exemple la figure 15 pour un cas sablée-polie).

Pour finir, les étudiants se sont aussi intéressés à la configuration pointe-plan. Cette configuration est souvent étudiée puisqu'elle représente un problème de décharges parasites que l'on trouve dans divers domaines, par exemple dû à un défaut de fabrication induisant une forte intensification du champ électrique. Ils ont pu alors observer l'influence de l'intensification du champ dû à la présence de la pointe. De plus, dû à la forte asymétrie de la configuration, ils ont pu se rendre compte de l'influence de la polarité des électrodes sur la décharge plasma obtenue.

## VI/ Conclusion

Ce cours est réalisé en fin de second semestre de première année et a pour objectif d'initier les étudiants à la physique des plasmas froids.

À la fin du cours, les étudiants ont préparé une présentation de 15 minutes suivie de 5 minutes de questions pour mettre en forme ce qu'ils avaient appris pendant le cours.

Bien que n'ayant qu'une compréhension approximative des plasmas, les étudiants ont beaucoup apprécié le cours, les exemples et les manipulations proposés, et lorsqu'ils ont été interrogés sur les différents aspects de la création, de la stabilisation et du développement d'un plasma froid, ils ont pu fournir des réponses adéquates.

Le cours en question, comme indiqué dans le titre et l'introduction, vise à initier les étudiants et non à fournir une compréhension complète des plasmas froids.

Sur la base des commentaires des étudiants à la fin du cours, pour les années à venir, nous essaierons de varier beaucoup plus les manipulations en ajoutant la création et la stabilisation de plasmas inductifs, ainsi que l'initiation des étudiants à la spectrométrie d'émission optique.

## VII/ Bibliographie

- [1] D. A. Gurnett, A. Bhattacharjee, « Introduction to Plasma Physics: With Space and Laboratory Applications », Cambridge University Press, 2005.
- [2] F. Llewellyn-Jones, « The Glow Discharge: And an Introduction to Plasma Physics », London, Methuen; New York, Wiley, 1966.
- [3] Jean-Marcel Rax, Bernard Bigot, « Physique des plasmas : Cours et applications », Dunod, 2005.
- [4] Stéphane Mazouffre 2016 Plasma Sources Sci. Technol. 25 033002.
- [5] J.M Meek and J. D. Craggs, « Electrical Breakdown of gases », Wiley, 1978.
- [6] E. Badareu and I. Popescu, « Gaz ionisés : décharges Electriques dans les Gaz », Editions Dunod (1965).
- [7] A. E. D. Heylen, « Sparking Formulae for Very High-Voltage Paschen Characteristics of Gases », IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, 2006.
- [8] R. Altenburger, C. Heitz and J. Timmer, « Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach », Journal of physics D: applied physics, 2002.
- [9] Pfeiffer-vacuum, Introduction to Vacuum Technology, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/know-how/introduction-to-vacuum-technology/general/vacuum-definition/>

- [10] Pfeiffer-vacuum, CMR 361, 1000 hPa F.S., DN 16 CFR, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PTR24602.en.pdf>.
- [11] Pfeiffer-vacuum, CMR 364, 1 hPa F.S., 8 VCR, <https://www.pfeiffer-vacuum.com/productPdfs/PTR24633.de.pdf>
- [12] A.A. Martins, M.J. Pinheiro, On the propulsive force developed by asymmetric capacitors in a vacuum, Physics Procedia, Volume 20, 2011, Pages 112-119, ISSN 1875-3892 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.08.010>
- [13] Yuri P. Raizer, Gas Discharge Physics, Springer Berlin, Heidelberg, 1991.

## CONVERSION D'ENERGIE ELECTRIQUE TRIPHASEE

GIACOMO GALLI <sup>1</sup>, GILLES PERUSOT <sup>1</sup>, MATTHIEU BERRANGER <sup>1</sup>, NOEMI LANCIOTTI <sup>2</sup>

1 : Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace, 10 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse  
[giacomo.galli1235@gmail.com](mailto:giacomo.galli1235@gmail.com)

2 : IUT de Blagnac, Départements Génie Industriel et Maintenance (GIM), 1 Pl. Georges Brassens, 31700 Blagnac

**Résumé :** Bien que les machines électriques ainsi que l'électronique de puissance soient bien étudiés dans les différents parcours du BAC+1 au BAC+3, ils sont souvent étudiés séparément. De nombreux étudiants de niveau M2 en cours d'électrotechnique, tout en ayant déjà vu le principe régissant le redressement et l'ondulation de la tension triphasée, ainsi que le fonctionnement des machines électriques, sont incapables de décrire le fonctionnement d'un variateur de vitesse associé à un moteur électrique. Le cours présenté dans cet article vise à combler ces lacunes, en proposant un format de cours qui vise l'acquisition de connaissances et compétences par le biais de l'expérience, tout en passant par des simulations et en apportant au fur à mesure quelques rappels théoriques.

### I/ Positionnement de l'activité

Le PREX (Pratique Expérimentale) est un format de cours qui est proposé au second semestre de chaque première année aux étudiants de l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-SUPAERO). Les objectifs de l'activité sont affichés dans le tableau 1.

Ce format de cours permet de favoriser et améliorer l'apprentissage des étudiants en s'appuyant sur plusieurs des six leviers mis en évidence par l'étude présentée par l'auteure dans [1]. On se réfère par la suite au troisième levier présenté par l'auteure, à savoir « Donner du sens aux apprentissages en augmentant la valeur des activités aux yeux de l'étudiant, notamment en le rapprochant de son futur vécu professionnel ». En ce sens, plusieurs sujets sont laissés au choix des étudiants et la philosophie sous-jacente est de leur permettre d'aborder un sujet d'étude d'un point de vue pratique, que ce soit par simulation, par manipulation ou bien les deux.

Le sujet de cet article concerne l'étude de la chaîne de puissance pour une propulsion hybride voire électrique des avions.

Le développement de l'avion plus électrique, jusqu'à complètement électrique, joue un rôle clé dans la thématique de la lutte contre le réchauffement climatique. Pour pouvoir développer ces systèmes, il est nécessaire de former des ingénieurs ayant de solides compétences dans le développement et l'utilisation des moteurs électriques.

Le choix du thème de notre activité pédagogique se justifie par les compétences préalables des étudiants entrants qui, tout en ayant déjà vu le principe régissant le redressement et l'ondulation de la tension triphasée, ainsi que le fonctionnement des machines électriques, sont incapables de décrire le fonctionnement d'un variateur de fréquence ainsi que de mettre en évidence son utilité. Les raisons de ce manque peuvent être trouvées dans le système de formation précédent, où les

<b>Savoir élaborer une démarche expérimentale en réponse à des objectifs</b>	1.a Identifier et hiérarchiser les paramètres et grandeurs physiques pertinentes
	1.b Spécifier une configuration expérimentale
	1.c Savoir anticiper les plages de mesure utiles
<b>Avoir un regard critique sur la technique de mesure</b>	2.a Connaître et critiquer la configuration d'une chaîne de mesure
	2.b Savoir évaluer les limites des capteurs utilisés : performances en bruit et dynamique de mesure
	2.c Cerner les limites de la précision des mesures
	2.d Savoir mener un calcul d'incertitude
<b>Savoir exploiter les résultats expérimentaux et en extraire des conclusions en vue de les communiquer</b>	3.a Assurer le post-traitement des données
	3.b Faire une analyse des résultats
	3.c Confronter les résultats expérimentaux à des modèles (théoriques ou numériques)
	3.d Présenter les résultats et analyses associées via des supports adaptés

Tableau 1 : Compétences à travailler dans le PrEx

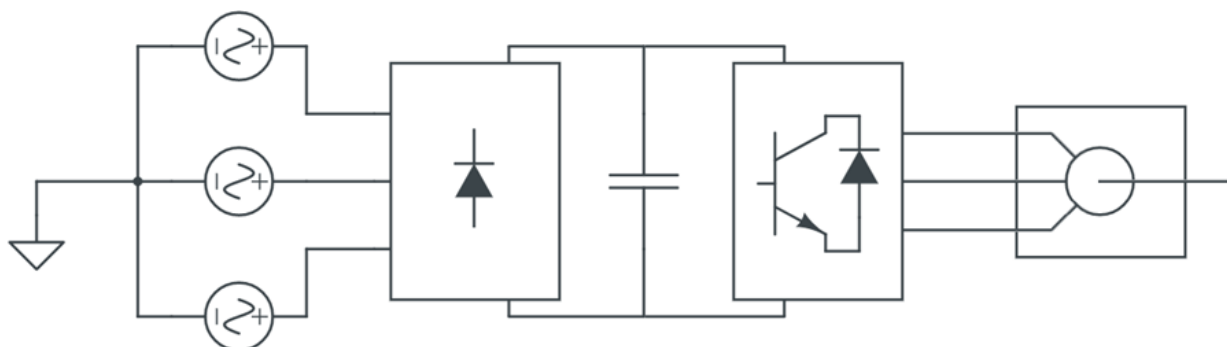


Figure 1. Structure utilisée dans le cours décrit.

Les sujets susmentionnés sont couverts dans des sessions totalement séparées avec une forte composante théorique.

Cette réflexion nous a conduit à exploiter deux autres leviers, notamment : « Rendre l'étudiant plus actif durant son cours », pour obtenir ses apprentissages plus profonds, plus durablement ancrés et plus transférables » ; « Augmenter le sentiment de maîtrise ou de compétence de l'étudiant ».

Le cours présenté dans cet article vise à favoriser ces dynamiques, en proposant une structure basée sur l'expérience (70%), avec une part de simulation (25%) et quelques rappels théoriques (5%).

Pendant le cours, leurs compétences de base autour de :

- machines électriques,
- redresseur de tension triphasé (diodes et Thyristors),
- onduleur de tension triphasé

sont évoquées, renforcées, et testées préliminairement par des simulations et enfin par l'expérience.

Chaque compétence est utilisée avec l'objectif final d'alimenter efficacement une machine électrique triphasée selon le schéma en figure 1.

De plus, des études [2] ont montré l'importance de présenter la problématique générale avant de passer à l'étude de chaque partie. Cela permet à l'étudiant d'arriver à mettre en place la connexion des différentes parties de façon correcte. Il est judicieux de se rappeler que l'enseignant connaît la réponse alors que l'étudiant est en train d'en construire une.

## II/ Moyens mis en œuvre avec détail des coûts

Pour toutes les simulations nous avons choisi d'utiliser le logiciel PSIM, très bien adapté à nos besoins (même dans sa version gratuite).

Le redressement (par le biais d'un pont de diodes) et l'ondulation de la tension triphasée ont été étudiés en utilisant un bloc d'enseignement « Onduleur triphasé pédagogique SEMITEACH » (figure 2). Le redressement avec des thyristors a été étudié en utilisant un bloc d'enseignement « Redresseur à thyristors pédagogique SEMITEACH » (figure 3).

Le moteur/générateur électrique, ainsi que toutes ses propriétés (vitesse, couple, courant de démarrage, etc.) sont étudiés en utilisant le banc de conversion d'énergie pédagogique Leroy en figure 4.

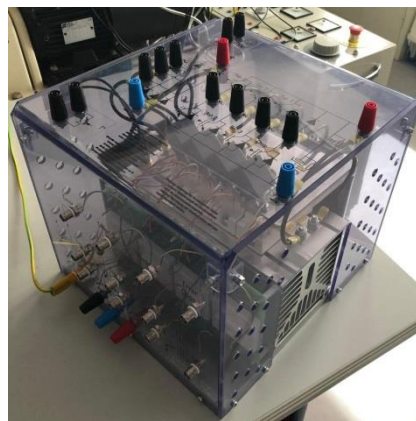


Figure 2 : Système SEMITEACH IGBT [3].



Figure 3 : SEMITEACH Thyristor Power Electronics Teaching System [4].

Le Tableau 2 résume les systèmes pédagogiques utilisés pendant le cours ainsi que les objectifs fixés derrière chaque application. Un focus sur le prix de chaque système est également présenté pour permettre au lecteur d'avoir une idée des coûts de mise en œuvre pour construire le cours.

D'un point de vue matériel, un certain nombre de sondes, de câbles et d'oscilloscopes ont été utilisés pour afficher les tensions et les courants des différents montages électriques, ainsi que des ordinateurs pour effectuer des simulations. Ces outils ne sont pas comptabilisés dans le tableau car il s'agit d'équipements partagés non attribuables à un seul cours.

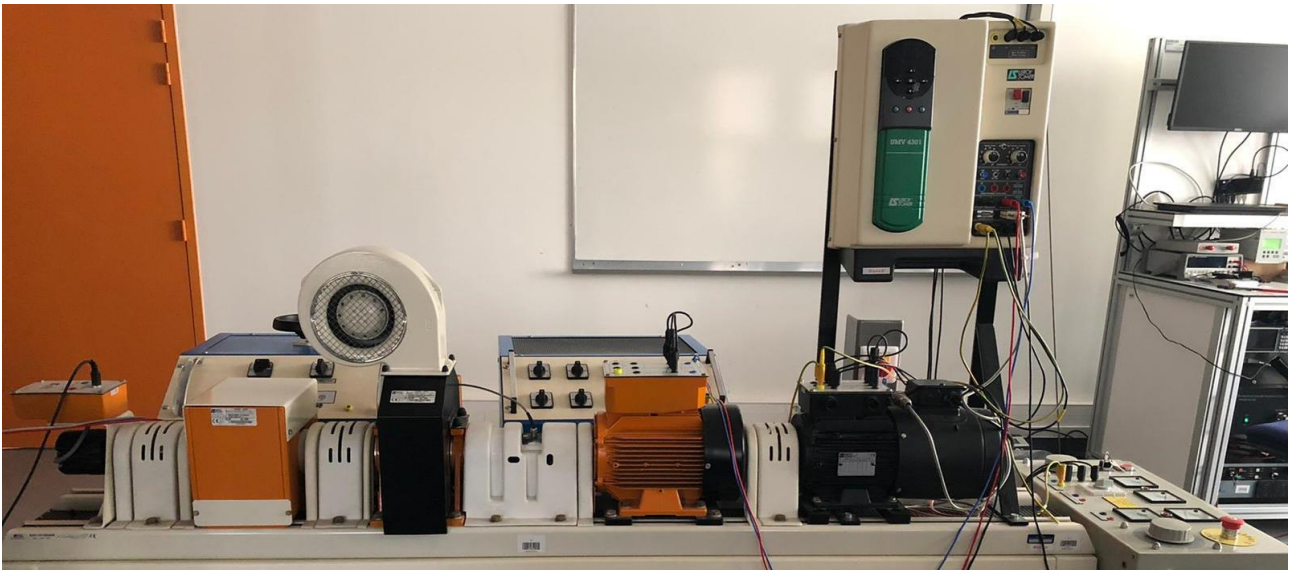


Figure 4 : Banc de test utilisé, dans lequel on trouve : alimentation triphasée variable (en bas à droite), moteur asynchrone (en bas au centre à droite, en noir), variateur de fréquence commercial (en haut au centre à droite), générateur synchrone (en bas au centre, en orange), contrôle de vitesse et de couple (en bas au centre, en blanc), frein électromagnétique (en bas à gauche).

Nom	Objectif	Prix
Système SEMITEACH IGBT (figure 2)	Redressement (avec des diodes) et ondulation de la tension triphasée	2000 €
SEMITEACH Thyristor Power Electronics Teaching System (figure 3)	Redressement et contrôle de la tension avec de thyristors	2000 €
Bloc d'étude moteur/générateur (figure 4)	Etude d'un moteur/générateur électrique	12000 €
Variateur Leroy <i>Tableau 2 : Matériel utilisé coûts et objectifs</i> (figure 4)	Comparaison d'un fait maison	
Carte électronique commande PWM	Compréhension commande PWM	200 €

### III/ Déroulement Pratique Expérimentale

Le cours dure 20 heures, les étudiants organisés en binôme ont été encadrés la moitié du temps (~10 heures) par deux enseignants. Pendant les 10 heures restantes, les étudiants effectuent leurs propres recherches ou simulations en autonomie. Dans le cas des expériences en laboratoire, les manipulations ont été effectuées en présence d'au moins un des professeurs. Ensuite (si rien ne change dans le circuit électrique), les étudiants sont libres de continuer à manipuler de manière autonome.

Le déroulement du PREX est présenté dans la fig.5.

Le PREX a été organisé de manière à travailler chaque partie tant d'un point de vue simulé que réel, afin de comparer les deux résultats et les écarts éventuels.

Cette démarche en sciences de l'ingénieur, qui intègre la démarche scientifique et connue par les étudiants issus de la filière scientifique en pré-bac ainsi que des CPGE [5], permet de rentrer dans une problématique grâce à la simulation de tout ou une partie d'un système, de définir le comportement attendu et tester sa réponse via la manipulation. Elle permet ainsi à l'étudiant d'améliorer sa compréhension du système, en cherchant de réduire le gain entre le système simulé et celui réel.

La compréhension du fonctionnement de l'onduleur et du redresseur et surtout de leur fonction vis-à-vis de la variation de vitesse du moteur, a permis aux étudiants de s'approprier au préalable le principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse commercial.

Le démarrage et le fonctionnement du moteur ont été évalués initialement avec le variateur commercial (fig.4), les différentes maquettes pédagogiques (fig. 2 et 3), puis avec le déploiement d'une carte de commande de type PWM conçue pour ce cours (fig. 12).

Dans la prochaine section, chaque bloc sera présenté de façon individuelle.

D'un point de vue pédagogique, le cadre posé au tout début de cet article nous a imposé une structure bien précise pour chaque séance.

Tout d'abord, avant chaque rencontre l'étudiant avait accès à la présentation ainsi qu'au sujet, afin de lui permettre d'accroître le sentiment de maîtrise de son apprentissage ainsi que d'aller rechercher, parmi ses compétences précédemment acquises, les outils pour aborder la problématique mise en évidence.

De plus, l'enseignant présent dans la salle a cherché pour chaque activité proposée à trouver un équilibre entre la découverte par soi-même et l'assistance vers la solution. Cette méthode semble favoriser la procéduralisation chez l'apprenant [6], c'est-à-dire sa capacité à accomplir une ou plusieurs tâches (connaissance procédurale [7]).

Finalement, comme spécifié dans l'introduction de cet article, ce module doit permettre à l'étudiant

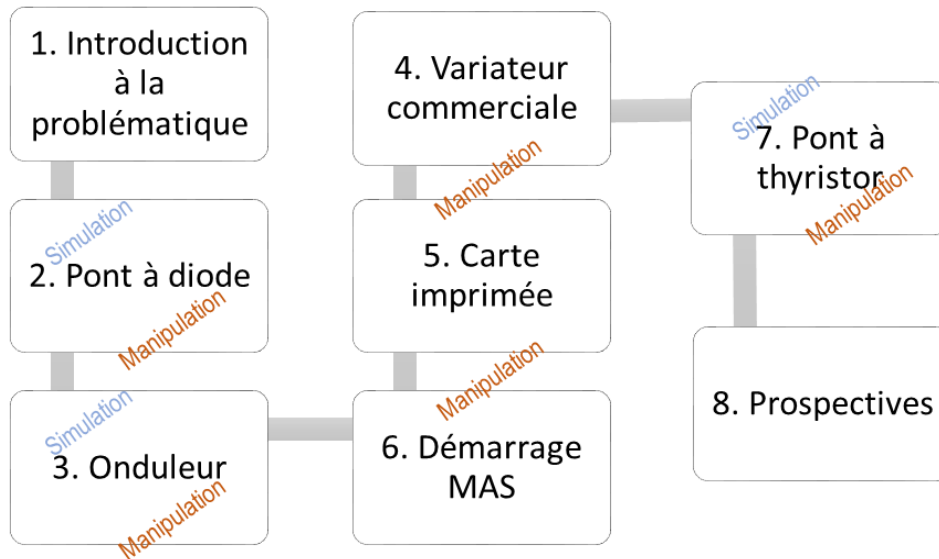


Figure 5 : Déroulement PREX Conversion d'énergie.

d'acquérir les capacités d'élaboration d'une démarche expérimentale. Conséquemment il sera possible de remarquer qu'à chaque séance les étudiants sont amenés à comparer les résultats obtenus en simulation avec ceux expérimentaux et théoriques.

#### IV/ Extrait des consignes

Dans cette partie nous présentons une introduction de chaque séance ou regroupement de séances. Des extraits de questions ainsi que des pistes de réponse sont proposées (marquées en italique).

##### Séance 1 : Simulation convertisseur AC/DC et comparaison avec la maquette

Après une présentation générale du système et de ses composants, les étudiants ont étudié son comportement par simulation. Les résultats obtenus ont été expliqués grâce à la théorie.

Au cours de la séance 2, seulement après avoir exploré numériquement le fonctionnement des deux

convertisseurs (ac/dc et dc/ac), ces résultats seront validés par des mesures sur le banc expérimental.

**Q2** : Concernant la présentation de cours Intro\_simulation\_PSIM.ppt, préparez des questions sur les points qui ne vous semblent pas clairs ou que vous aimeriez pouvoir approfondir.

**Q3** : Reproduire le circuit de la figure 6 sur PSIM et afficher la variation temporelle de tous les instruments de mesure de tension utilisés. La variation temporelle des tensions dans le circuit est présentée dans la figure 7.

**Q4** : Effectuez des recherches (si nécessaire) pour comprendre comment construire le circuit de pont de diodes monophasé (si vous avez des problèmes avec la recherche, demandez à l'un des deux professeurs).

**Q5** : Réaliser un circuit avec un pont de diodes monophasé sur PSIM avec une résistance de charge parallèle ( $4.6\Omega$ ) représentant la prochaine partie du circuit à connecter.

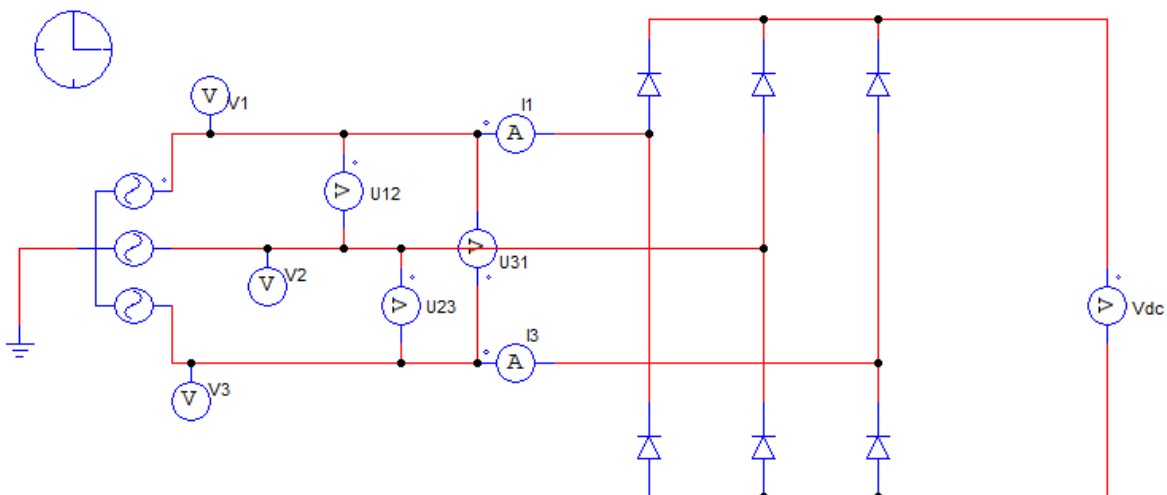


Figure 6 : Simulation conversion AC-DC sous le logiciel PSIM.

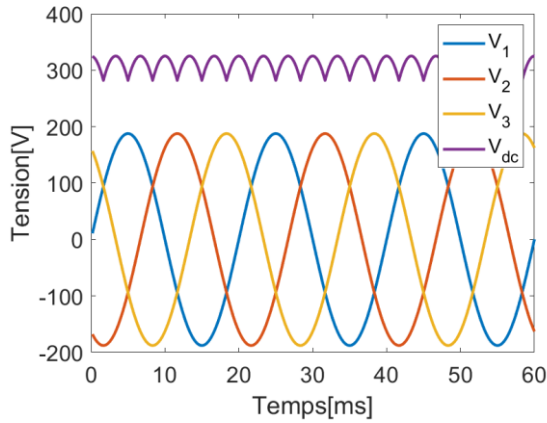


Figure 7 : Variation temporelle des tensions mesurée dans le circuit en figure 6.

- Q6 :** Comparer les valeurs de tension et courant avant le pont de diodes avec celles après le pont de diodes.
- Q7 :** Ajouter une capacité parallèle entre le pont de diodes et la résistance.
- Q8 :** Faites varier la capacité entre les valeurs 0.01mF et 100mF. Comparer les valeurs de tension avant le pont de diodes avec celles après le pont de diodes en fonction des valeurs de la capacité.
- Q9 :** Répétez ce qui a été fait dans les questions 4 à 8 pour un pont de diodes triphasé.
- Q11 :** En utilisant le diagramme en figure 8, trouver l'expression qui relie la tension de crête de l'alimentation triphasée à la tension continue moyenne à la sortie du redresseur.

Le système triphasé d'entrée est défini ci-dessous :

$$\begin{cases} v_1 = V_m \sin(\omega t) \\ v_2 = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_3 = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

avec  $\omega t = \theta$ .

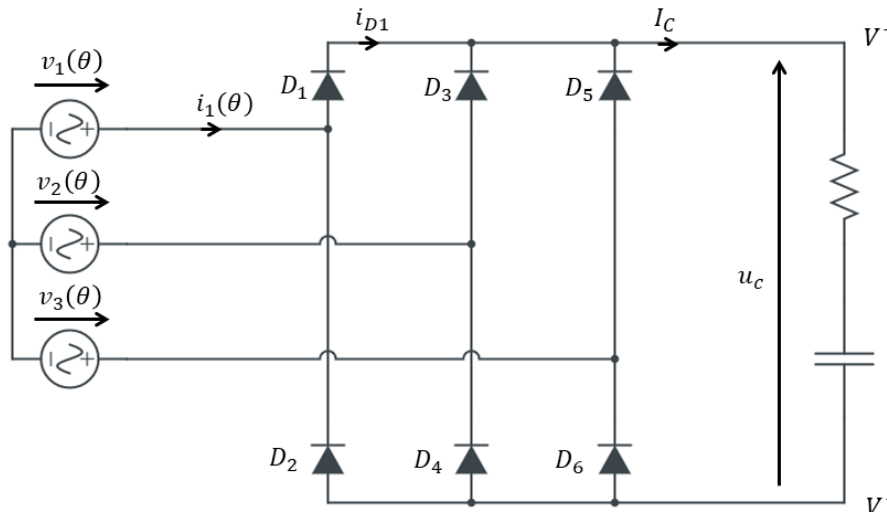


Figure 8 : Schéma convertisseur AC-DC.

On considère l'intervalle  $[\pi/6 - \pi/2]$ , pendant lequel les diodes D1 et D4 conduisent. La tension continue moyenne à la sortie du redresseur  $u_c(t)$  peut être écrite sous la forme suivante :

$$u_c(t) = v_1(t) - v_2(t)$$

$$\langle u_c(\theta) \rangle = \frac{1}{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} u_c(\theta) d\theta$$

Après développement [8], on obtient :

$$\langle u_c(\theta) \rangle = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$$

Cette question permet de développer chez l'étudiant son esprit critique : il cherche à interpréter le résultat de sa simulation en s'appuyant sur ses connaissances, acquises pendant le cycle d'étude précédent. En revanche, dans le cas où ces notions n'auraient pas été abordées ou bien maîtrisées, le format du cours permet au travail en binôme de compenser la lacune ou bien une intervention spécifique de l'enseignant.

**Séance 2 : Simulation convertisseur dc/ac et comparaison avec la maquette.**

Pendant cette séance la technique de modulation à largeur d'impulsion a été exploitée par les étudiants. Ci-dessous un extrait du cahier du PrEx.

Comme on peut le voir sur la figure 1, une fois la tension alternative transformée en une tension continue, il est nécessaire d'obtenir, à partir de la tension continue, trois tensions sinusoïdales alternatives, chacune étant déphasée de  $120^\circ$  par rapport aux autres. Pour ce faire, nous utiliserons un onduleur contrôlé par une technique appelée « Modulation de largeur d'impulsion » (MLI) ou plus couramment (utilisez ce terme pour effectuer une recherche) « Pulse Width Modulation » (PWM).

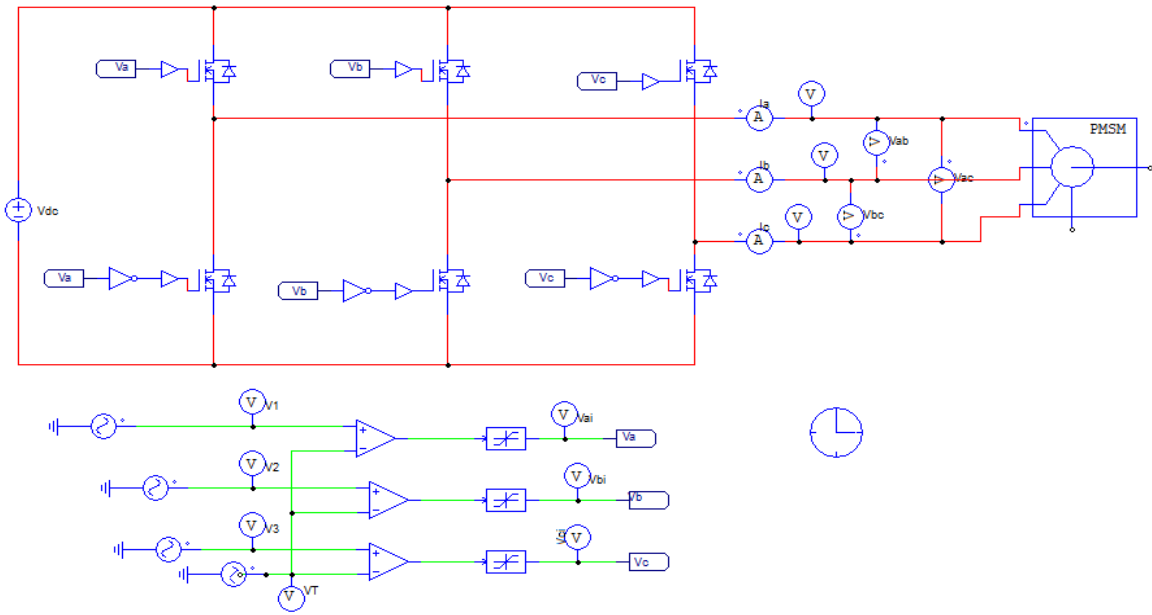


Figure 9: Simulation de l'onduleur triphasé avec commande sous le logiciel PSIM.

**Q12** : Effectuez des recherches (si nécessaire) pour comprendre comment cela fonctionne et comment construire un PWM. Une fois le temps de recherche libre terminé, une présentation intitulée PWM.ppt vous sera proposée.

**Q14** : Réalisez un schéma fonctionnel d'onduleur monophasé utilisant un PWM.

**Q15** : Réalisez un schéma fonctionnel d'onduleur triphasé (phases déphasées de 120°) utilisant un PWM.

**Q16** : Pour les deux diagrammes fonctionnels produits (Q14 et Q15), réaliser deux circuits sur PSIM. Proposition de schéma de simulation de l'onduleur triphasé avec commande en figure 9.

**Q17** : Se focaliser sur le circuit de l'onduleur triphasé et afficher les trois tensions composées à la sortie du système ( $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ac}$ ). Comparez par une FFT le signal de sortie du système avec le signal de commande PWM.

Les graphiques demandés sont fournis dans la figure 10 où l'acronyme DSP signifie Densité Spectrale de Puissance.

**Q18** : Ajoutez un filtre passe-bas pour chaque phase afin de contrôler les signaux de sortie.

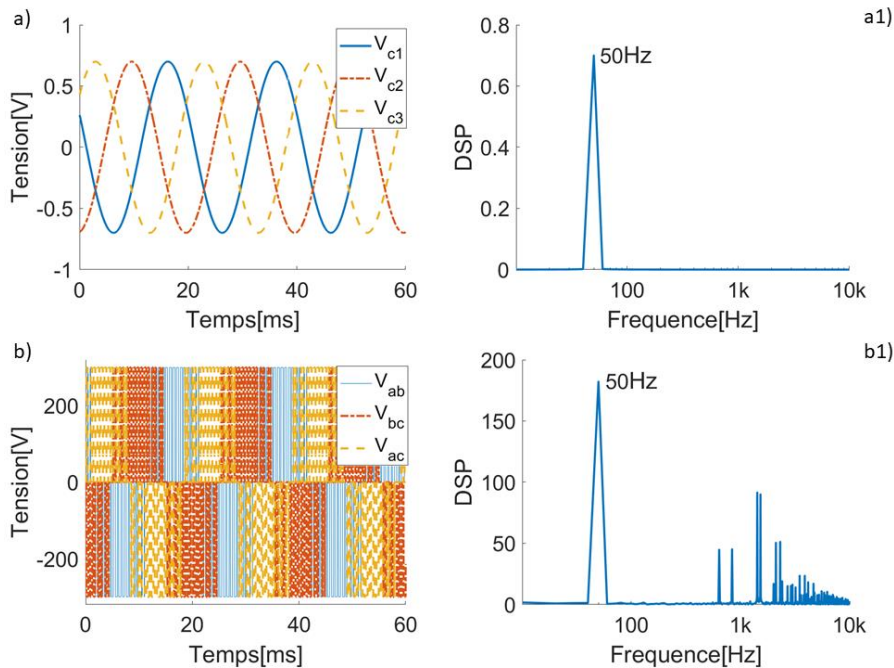


Figure 10 : Résultats de la simulation, dont le diagramme est dans la figure 10. a) Tensions de commande de la PWM ; b) Tensions composées de sortie de l'onduleur triphasé ; a1) Transformée de Fourier (FFT) du signal Vc1 de la figure b ; b1) Transformée de Fourier (FFT) du signal Vab de la figure a.



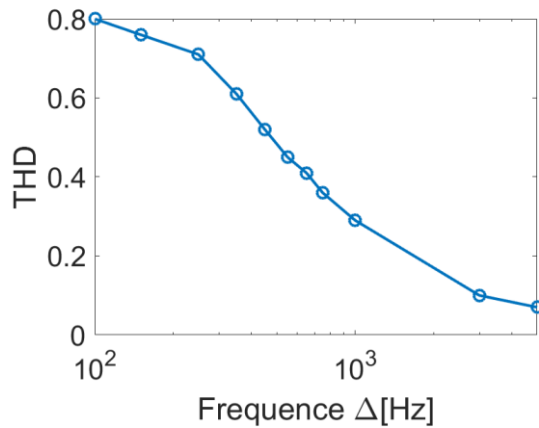


Figure 11 : Variation du THD en fonction de la fréquence du signal triangulaire de commande PWM.

**Q19 :** Varier la fréquence de l'onde triangulaire de commande PWM et les comparer avec les valeurs du taux de distorsion harmonique (abrégé THD, total harmonic distortion en anglais) de l'un des courants triphasés à la sortie du système. *La variation du THD en fonction de la fréquence du signal triangulaire de commande PWM est fournie dans la figure 11.*

**Q20 :** Varier la fréquence du signal de commande triphasé et vérifier les effets sur les signaux en sortie du système.

**Séance 3 et 4 : Proposition architecture de carte électronique. Prise en main de la carte proposée par l'équipe enseignante**

Proposition *binôme* : génération du signal triangulaire à base de deux AOP (comparateur double seuil + intégrateur). Signal triphasé généré numériquement par une fonction sinus (programmation microcontrôleur).

La carte électronique conçue par l'équipe enseignante est reportée en fig.12. Elle est alimentée par une source de tension continue de 12V. Il est possible, via des potentiomètres, de faire varier la fréquence de la modulante et de la porteuse. Les signaux de commande des trois sinusoïdes ainsi que celui de la porteuse triangulaire sont visualisables à l'oscilloscope. Également, il est possible de visualiser les signaux logiques envoyés à un bras de l'onduleur (0 = IGBT ouvert, 1= IGBT fermé) ainsi que les signaux en 0÷5V qui permettent de commander le système de la fig.2.

Les étudiants ont utilisé la carte électronique pour valider les résultats obtenus par simulation.

**Séance 5 et 6 : Comparaison prestations variateur commercial VS maquette au démarrage. Introduction à la commande scalaire**

**$U/f = \text{const.}$  Comparaison prestation convertisseur ac/dc pont de diodes VS pont de thyristors**

Pendant la première de ces deux séances, les étudiants ont d'abord testé le fonctionnement du moteur au démarrage, en relevant le courant de démarrage à l'oscilloscope. Cela a permis de comparer la valeur du courant absorbé par le moteur au démarrage ( $I_d$ ) avec sa valeur nominale ( $I_n$ ) et de remarquer le facteur de proportionnalité entre les deux ( $I_d = 7I_n$ ).

Dans le support du PrEx, l'équipe décrit les techniques de variation de résistance rotorique ainsi que de variation de tension et fréquence afin de limiter le courant au démarrage. Ce passage permet d'introduire l'intérêt d'employer un pont à thyristors pour la conversion ac/dc, c'est-à-dire afin de moduler la valeur moyenne de la tension en sortie du redresseur.

**Q48 :** Proposer des méthodes pour contrôler la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

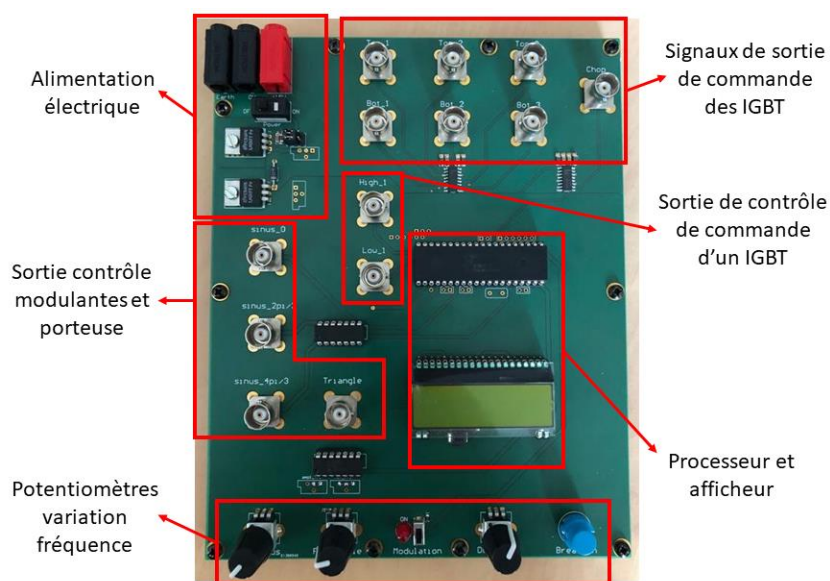


Figure 12 : Schéma implantation de la carte électronique pour la commande PWM.

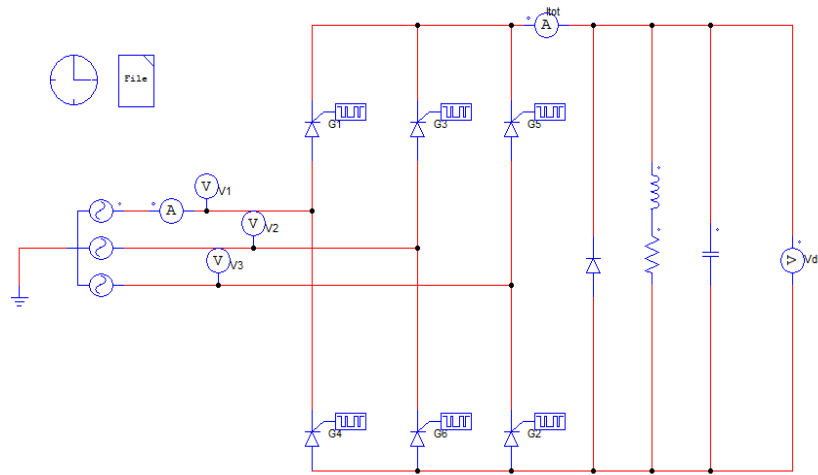


Figure 13 : Simulation du pont à thyristor triphasé sous le logiciel PSIM.

**Q49 :** Effectuez des recherches (si nécessaire) pour comprendre comment cela fonctionne et comment construire un pont à thyristors. Une fois le temps de recherche libre terminé une présentation intitulée Pont\_à\_Thyristors.ppt vous sera proposée.

**Q51 :** Réalisez un schéma fonctionnel de pont à thyristors triphasé.

**Q52 :** Pour le diagramme fonctionnel produit, réaliser un circuit sur PSIM. Un schéma du pont ac-dc à thyristors est proposé en fig.13.

**Q53 :** Une fois le circuit fonctionnel crée, mesurez la tension de sortie CC en fonction des tensions d'entrée AC selon l'angle d'amorçage ( $\alpha$ ) choisi. En fig.14, l'évolution de la tension moyenne en sortie pour une tension efficace de  $x$  V et pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage ( $\alpha$ ), compris entre  $0^\circ$  et  $120^\circ$ .

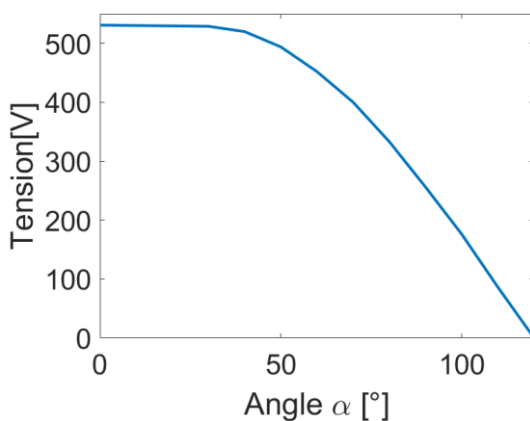


Figure 14 : Variation de la tension moyenne en sortie du pont à thyristor triphasé en fonction de l'angle de retard à l'amorçage ( $\alpha$ ).

**Q56 :** En utilisant les simulations faites sur le pont à thyristors et l'onduleur triphasé, combinez les deux simulations pour utiliser le pont de thyristors pour alimenter l'onduleur triphasé sur PSIM.

**Q57 :** Évaluez les tensions de sortie dans ce cas (pont à thyristors + onduleur triphasé) par rapport à une alimentation via un pont de diodes.

### V/ Retour des étudiants et perspectives

L'évaluation des apprentissages a été réalisée sur la base de trois modes ci-dessous [9] :

- Une évaluation de type diagnostic au début de chaque séance. Cela a permis à l'enseignant de prendre connaissance du niveau des étudiants via un questionnement oral. D'ailleurs, une auto-évaluation de ce type a été faite par l'étudiant avant chaque séance, en travaillant la partie préparation. Un exemple d'auto-évaluation a été reporté en figure 15.
- Une évaluation de type formative sous forme de présentation orale, préparée et exposée en binôme. Cela a permis aux étudiants de commencer à se préparer pour l'évaluation sommative, tout en profitant de commentaires de l'enseignant afin de s'améliorer et progresser. Cet exercice a également mis en évidence d'éventuels points à éclaircir.
- Une soutenance orale d'une durée de 20 minutes a clôturé le cours. Cette soutenance a eu lieu en face d'un jury d'enseignants-chercheurs, dont celui qui a dirigé le PrEx. Les autres membres étaient les responsables des autres PrEx proposés sur d'autres domaines.

Les étudiants ont été jugés par rapport aux compétences présentées dans le Tableau 1, les mêmes auto-évaluations initiales et finales.

Un échange avec les étudiants a aussi permis de faire ressortir de possibles points d'amélioration pour la prochaine session PrEx Conversion d'Énergie de 2023. Ils ont exprimé un intérêt vers la programmation de la commande de la carte électronique. À partir de cette demande, l'écriture d'une partie de la commande serait confiée aux étudiants, la génération des signaux sinusoïdaux par exemple.

En ce qui concerne les perspectives de l'équipe enseignante, d'un point de vue disciplinaire, une nouvelle version de la carte a été déjà conçue afin

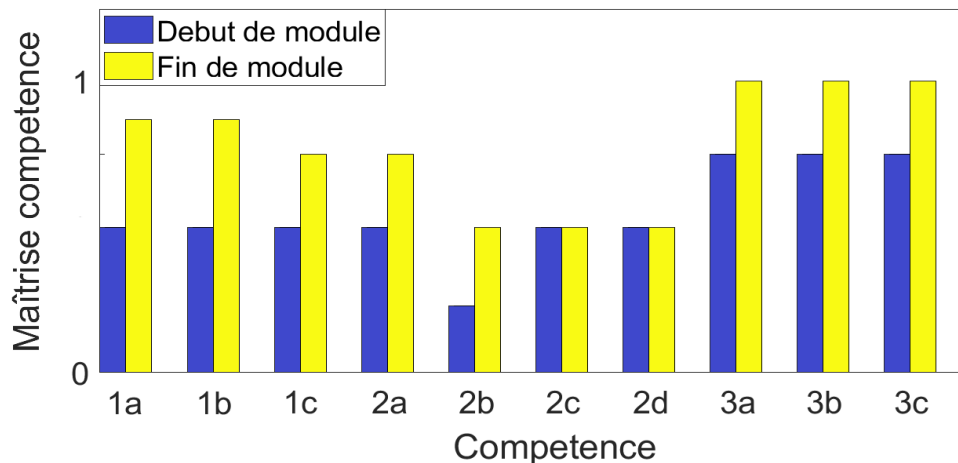


Figure 15 : Retour des étudiants sur leur perception de maîtrise avant et après le PrEx Conversion d'Énergie.

d'effectuer la commande « U/f constante ». Cette nouvelle version permettra de commander en cascade les deux convertisseurs afin de limiter le courant de démarrage du moteur.

D'un point de vue pédagogique il paraît souhaitable de changer le déroulement vis-à-vis des compétences travaillées. L'idée serait de faire travailler chaque étudiant du binôme sur un des deux convertisseurs tant qu'ils sont en simulation et en validation expérimentale via les systèmes des figures 2 et 3.

Cela permettrait à chaque étudiant de travailler les compétences ciblées par le module tout en économisant du temps qui sera consacré à la mise en place de la commande « U/f constante ». Un temps d'échange sera préconisé afin que chacun puisse présenter à l'autre le fonctionnement du convertisseur étudié, en sachant que l'apprentissage par les pairs présente plusieurs atouts tant pour celui qui explique que pour celui qui apprend [10].

De plus, un suivi plus rigoureux de l'étudiant est envisagé, en prenant le temps en début de module de faire un bilan plus poussé du niveau des étudiants ainsi qu'en demandant au jury de prendre le temps de remplir la grille des compétences lors de la soutenance orale.

A long terme, l'équipe souhaite mettre en place un dispositif plus performant pour évaluer l'impact de ce module sur l'évolution de l'étudiant dans son cursus (à la fois son utilité et utilisabilité [11]), via des questionnaires anonymes par exemple sur l'ensemble de la promotion ou encore, via des entretiens individuels.

## VI/ Bibliographie

- [1] M. Poumay, « Six leviers pour améliorer l'apprentissage des étudiants du supérieur », *Revue Internationale de Pédagogie de l'Enseignement Supérieur*, 2014.
- [2] Jeannotte D., « Raisonnement mathématique : proposition d'un modèle conceptuel pour l'apprentissage et l'enseignement au primaire et au secondaire », 2015.

- [3] SEMITEACH, « IGBT Module stack », [https://www.kit-elec-shop.com/gb/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=201](https://www.kit-elec-shop.com/gb/index.php?controller=attachment&id_attachment=201).
- [4] SEMIKRON, « Application Note, Thyristor Power Electronics Teaching System », [https://www.kit-elec-shop.com/gb/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=1079](https://www.kit-elec-shop.com/gb/index.php?controller=attachment&id_attachment=1079).
- [5] « Réforme du lycée options SI et CIT en seconde », [https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii.disciplines.actoulouse.fr/files/specialite\\_si/accompagnements\\_et\\_complements\\_reforme\\_2019/essentiel\\_de\\_la\\_reforme\\_2019\\_par\\_nos\\_ia-iplr\\_de\\_la\\_cademie/reforme\\_si\\_31\\_01\\_2019.pdf](https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii.disciplines.actoulouse.fr/files/specialite_si/accompagnements_et_complements_reforme_2019/essentiel_de_la_reforme_2019_par_nos_ia-iplr_de_la_cademie/reforme_si_31_01_2019.pdf)
- [6] Manuel Musial, Fabienne Pradère et André Tricot, « Prendre en compte les apprentissages lors de la conception d'un scénario pédagogique », *Recherche et formation*, 68 | 2011, 15-30.
- [7] Anderson J. R., « Acquisition of cognitive skills », *Psychological Review*, 1982, vol. 89, no. 4, pages : 369 – 406.
- [8] Luc Lasne, « *Electronique de puissance* » 2e édition -Editions Dunod - ISBN 978-2-10-072135-1.
- [9] Académie Nancy-Metz, « Évaluation diagnostique, formative, sommative », <https://sites.ac-nancy-metz.fr/svt/evaluation/divers/index.php?idp=177>
- [10] A. Núñez-Andrés, A. Martínez-Molina, N. Casquero-Modrego et al., « The Impact of Peer Learning on Student Performance in an Architectural Sustainability Course », *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 5 Janvier 2022.
- [11] Sandra Nogry, Stéphanie Jean-Daubias, Magali Ollagnier-Beldame, « Evaluation des eiah : une nécessaire diversité des Méthodes », *Communication recherche CNRS*.

# Etat de l'art : Électronique de puissance des systèmes de traction et des stations de charge des véhicules électriques : Situation actuelle et défis.

YOUSSEF AMRY<sup>1, 2, 3, 4</sup>, ELHOUSSIN ELBOUCHIKHI<sup>1</sup>, FRANCK LE GALL<sup>2</sup>, MOUNIR GHOGHO<sup>3</sup>, SOUMIA EL HANI<sup>4</sup>

1 ISEN Yncréa Ouest, LABISEN, Avenue du Champ de Manoeuvre, Carquefou, 44470 Nantes, France

[youssef.amry@isen-ouest.yncrea.fr](mailto:youssef.amry@isen-ouest.yncrea.fr), [elhoussin.elbouchikhi@isen-ouest.yncrea.fr](mailto:elhoussin.elbouchikhi@isen-ouest.yncrea.fr)

2 ISEN Yncréa Ouest, LABISEN, 20 Rue Cuirassé Bretagne, 29200 Brest, France

[franck.le-gall@isen-ouest.yncrea.fr](mailto:franck.le-gall@isen-ouest.yncrea.fr)

3 TicLAB, International University of Rabat, Rabat 11100, Morocco

[mounir.ghogho@uir.ac.ma](mailto:mounir.ghogho@uir.ac.ma)

4 "Energy Optimization, Diagnosis and Control" Research Group, STIS Research Center, Mohammed V University, ENSAM, Rabat 10100, Morocco

[s.elhani@um5r.ac.ma](mailto:s.elhani@um5r.ac.ma)

**Résumé :** Avec la nécessité d'un transport plus respectueux de l'environnement et le large déploiement des véhicules électriques et hybrides rechargeables, les stations de recharge des véhicules électriques (VE) sont devenues un enjeu majeur pour les constructeurs automobiles et un véritable défi pour les chercheurs du monde entier. En effet, le coût élevé du stockage de l'énergie des batteries, l'autonomie et la durée de vie limitées des VE, le temps de charge des batteries, le coût de déploiement d'une infrastructure de charge rapide et l'impact significatif sur le réseau électrique sont à l'origine de plusieurs projets de recherche axés sur les topologies avancées de l'électronique de puissance et l'optimisation des stations de charge des VE en termes de transfert de puissance et d'emplacement géographique. On peut distinguer trois niveaux de charge, qui diffèrent en termes de puissance de sortie et de temps de charge. Plus le niveau de charge est élevé, plus le processus de charge est rapide, car une plus grande quantité de puissance est fournie au véhicule, au détriment des problèmes de qualité de l'énergie et des perturbations. En outre, on peut distinguer trois types de systèmes de charge, à savoir la recharge par induction (transfert d'énergie sans contact), les systèmes de charge par conduction et l'échange de batteries. En outre, les VE englobent les VE à pile à combustible (PC), qui utilisent l'hydrogène comme vecteur énergétique, et qui font aujourd'hui l'objet de recherches approfondies dans les milieux universitaires et industriels. Cet article de synthèse vise à présenter l'état de l'art des principales avancées en matière d'architectures d'électronique de puissance pour les systèmes de traction des VE et les stations de recharge des VE basées sur des batteries. Plus précisément, l'accent est mis sur les spécifications de l'électronique de puissance de la chaîne cinématique des véhicules électriques légers et des stations de charge, les solutions proposées en matière d'électronique de puissance, les avantages et les inconvénients de toutes ces technologies, ainsi que les perspectives de travaux de recherche futurs en termes de charge intelligente des VE et de solutions modernes pour l'atténuation des perturbations du système électrique.

## I/ Introduction

La prise de conscience croissante du réchauffement climatique et les progrès des systèmes de stockage des batteries dans l'électronique de puissance et les technologies des moteurs électriques ont conduit à une expansion à grande échelle des véhicules hybrides, de véhicules électriques hybrides rechargeables et de véhicules à pile à combustible (PAC). Une augmentation significative du nombre de véhicules électriques (VE) pourrait avoir un impact sur les performances et l'efficacité du réseau électrique, notamment : La congestion, la réduction de l'efficacité, les problèmes de qualité de l'énergie et les perturbations, ainsi que la régulation de la tension, augmenteront considérablement dans un proche avenir. Par conséquent, l'émergence rapide des véhicules

électriques nécessite une infrastructure avancée de stations de recharge privées et publiques qui fournissent des services de recharge efficaces, fiables et robustes tout en réduisant les impacts sur le réseau.

Les véhicules électriques de tourisme et les véhicules utilitaires légers sont sur le point de se généraliser. Cette évolution est motivée par la volonté de réduire les impacts environnementaux et de parvenir à un transport sans combustible fossile. Les véhicules électriques offrent de nombreux avantages par rapport aux véhicules traditionnels à moteur à combustion interne (MCI), tels que la réduction du nombre de pièces mobiles, un meilleur rendement, un couple de démarrage plus élevé, une réduction des coûts d'entretien et d'exploitation, et la possibilité d'être alimentés par une énergie renouvelable produite localement. Cependant, l'adoption massive des VE n'est

pas sans poser de problèmes : Les VE sont généralement plus chers que les véhicules à moteur à combustion interne ; l'extraction et la conversion du lithium sont coûteuses et peu respectueuses de l'environnement ; le poids et la durée de vie des batteries sont critiques ; et l'infrastructure de recharge publique n'en est qu'à ses débuts. En outre, la charge massive non réglementée des VE peut générer des perturbations importantes dans le réseau électrique. Du côté du client, contrairement aux véhicules à moteur à combustion interne qui ont besoin de quelques secondes à quelques minutes pour faire le plein, les voitures électriques ont besoin de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures pour se recharger complètement, ce qui implique un temps d'attente important. Il convient de souligner que l'autonomie des VE de moyenne portée est encore très limitée et restreint leur utilisation au milieu urbain. Sur le plan économique, les progrès technologiques et la réduction des coûts liés à l'augmentation des capacités de production des usines de fabrication conduiront à une diminution du prix des batteries, qui représente le coût le plus contraignant du véhicule électrique. En effet, en électrochimie, l'autonomie des batteries ne cesse d'augmenter grâce à l'amélioration de la densité énergétique des batteries. En ce qui concerne l'ingénierie électrique et l'électronique de puissance, les solutions concernant la réduction de l'impact sur le réseau électrique et le soutien au réseau en fournissant des services auxiliaires pendant les périodes de pointe (concept *vehicle-to-grid*) sont toujours en cours, et cela représentera la principale piste sur laquelle seront basés les prochains travaux de recherche. En effet, la recharge des véhicules électriques aura un impact considérable sur la stabilité du réseau électrique. En outre, il sera nécessaire de répondre aux besoins d'un nombre important et croissant de clients en termes de disponibilité des stations de charge et d'exigences de charge telles que le temps de démarrage, la puissance requise et l'état de charge souhaité (SOC).

Les progrès de la technologie des batteries et des piles à combustible dans les moteurs et dans l'électronique de puissance ont favorisé la pénétration rapide des VE dans le secteur des transports. Dans les VE, les convertisseurs d'électronique de puissance contrôlent le flux d'énergie de la source d'énergie (batteries, réservoirs d'hydrogène et piles à combustible) aux roues par l'intermédiaire d'un moteur électrique. La classification des véhicules électriques dépend de la combinaison des sources d'énergie, des dispositifs de stockage d'énergie et des convertisseurs de puissance qui entraînent le véhicule. Dans un véhicule électrique à batterie (BEV), seule la batterie est utilisée comme source d'énergie, qui peut être combinée avec des supercondensateurs pour améliorer les performances dynamiques. La pile à combustible associée au réservoir d'hydrogène et à la batterie est utilisée dans un véhicule électrique à pile à combustible (FCEV). La batterie associée à l'électronique de puissance, aux moteurs d'entraînement et au moteur à combustion interne est utilisée dans les véhicules électriques hybrides et les véhicules électriques rechargeables. Tous ces VE

présentent l'avantage de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer l'efficacité de la conversion énergétique par rapport aux véhicules traditionnels à moteur à combustion interne. Cependant, ils présentent certains inconvénients liés à la faible autonomie et au long temps de recharge des batteries pour les BEV et aux problèmes de sécurité pour les FCEV.

L'infrastructure de recharge est d'une importance capitale pour le déploiement massif de l'utilisation des VE. En effet, il est nécessaire d'installer des stations de recharge pour VE parallèlement aux stations-service, en particulier sur les autoroutes qui ont un impact minimal sur le système de distribution électrique. Ces chargeurs de VE doivent être fiables, robustes, modulaires, compétitifs en termes de coûts et conformes aux normes de qualité de l'énergie. Les stations de charge pour VE peuvent être classées en trois catégories : transfert d'énergie par conduction, transfert d'énergie par induction et échange de batterie. Le transfert d'énergie par conduction est subdivisé en chargeurs embarqués, qui sont conformes à la charge en courant alternatif, et en chargeurs hors-bord, qui sont utilisés pour la charge en courant continu. En outre, les stations de charge des VE comprennent trois niveaux de charge en fonction de la puissance et de la durée de la charge. Tous les VE sont équipés d'un chargeur AC/DC embarqué de niveau 1 qui se branche simplement sur une prise de courant alternatif standard. Le niveau 2 est également un chargeur CA, qui est plus rapide que le chargeur de niveau 1. Ce niveau est également basé sur l'utilisation du chargeur AC/DC embarqué dans le VE mais conçu pour des puissances plus élevées. Enfin, le niveau 3 est un chargeur rapide à courant continu avec une électronique de puissance externe au VE. Les niveaux et les temps de charge s'appliquent aux VE et aux hybrides rechargeables, mais pas aux hybrides traditionnels, car ils sont chargés par régénération ou par le moteur, et non par un chargeur externe. Lorsqu'ils sont connectés à l'infrastructure de charge, les VE peuvent être utilisés pour soulager le réseau pendant les périodes de congestion en mettant en œuvre la technologie du véhicule au réseau. Cet article présente l'état de l'art concernant les technologies et les principales caractéristiques des véhicules partiellement ou entièrement électriques. Les méthodes de charge des VE à batterie (leurs types, infrastructures et normes) et les activités de recherche récentes sur les architectures d'électronique de puissance sont discutées en indiquant leurs avantages et inconvénients. Ensuite, les améliorations requises pour des méthodes de charge des VE efficaces et optimales sont mises en évidence. Les techniques actuellement utilisées dans les applications industrielles pour surmonter les problèmes liés à l'intégration des stations de charge des VE dans le réseau électrique sont présentées. Enfin, une discussion est menée sur les stations de recharge intelligentes, plus précisément les stations de recharge avec production locale d'énergie en utilisant les ressources renouvelables disponibles associées aux progrès les plus récents des systèmes de stockage d'énergie. Les véhicules électriques à pile à combustible et les principaux défis liés à l'hydrogène vert, considéré comme un vecteur

énergétique flexible, sont brièvement présentés. Cet examen permet de conclure que le principal obstacle à l'adoption massive des VE est le problème de la recharge pour les BEV et la production d'hydrogène vert pour les FCEV.

## II/ Technologies des véhicules électriques légers et des stations de recharge

Cette section présente deux aspects relatifs aux véhicules électriques et aux stations de recharge l'infrastructure comme suit :

- En partant d'une étude mécanique et du cycle de conduite WLTP, nous présentons les besoins en termes de couple, de puissance et d'énergie d'un véhicule. Ensuite, nous présentons toutes les technologies de véhicules possibles : Véhicules à moteur à combustion interne, véhicules hybrides et véhicules électriques.
- Présenter les technologies des stations de recharge pour les véhicules électriques et les stations de ravitaillement en carburant pour les véhicules à pile à combustible.

### II.1/ Besoins en puissance et en énergie

Pour évaluer les besoins en puissance et en énergie des véhicules légers, des procédures d'essai harmonisées au niveau mondial pour les véhicules légers (WLTP) sont utilisées. L'objectif de ces procédures est de garantir une meilleure prise en compte des conditions réelles d'utilisation des véhicules et de leurs technologies actuelles lors de la certification

#### II.1.1/ Procédures d'essai harmonisées au niveau mondial pour les véhicules légers (WLTP)

Le WLTP est une norme d'essai et de certification des véhicules qui mesure la consommation de carburant, l'autonomie électrique et les émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants. Cette procédure d'essai s'applique principalement aux voitures particulières et aux véhicules utilitaires légers, tandis que les autres procédures concernent les motos et les véhicules lourds. La norme WLTP est entrée en vigueur en Europe en septembre 2017 pour les nouveaux modèles et en septembre 2018 pour tous les nouveaux véhicules, remplaçant le nouveau cycle de conduite européen (NEDC), datant de 1973 et mis à jour en 1996. Ces procédures d'essai ont également été adoptées en Chine et au Japon ces dernières années. La figure 1 présente les trois grandes catégories du cycle WLTC. Chaque catégorie comprend plusieurs cycles de conduite, connus sous le nom de Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC), conçus pour représenter une utilisation réelle dans la circulation urbaine, la circulation extra-urbaine, sur les routes carrossables et sur les autoroutes. La durée de chaque cycle est la même pour toutes les classes, mais les courbes d'accélération et de vitesse sont différentes. Les cycles WLTC sont

basés sur la classification préliminaire des véhicules suivante :

- La classe 1 concerne les véhicules pour lesquels le rapport de la puissance nominale en W/kg  $\leq 22$ .
- La classe 2 concerne les véhicules dont le rapport de la puissance nominale en W/kg  $> 22$  mais  $\leq 34$ .
- La classe 3 concerne les véhicules dont le rapport de puissance nominale en W/kg  $> 34$ . La majorité des véhicules sont inclus dans la classe 3.

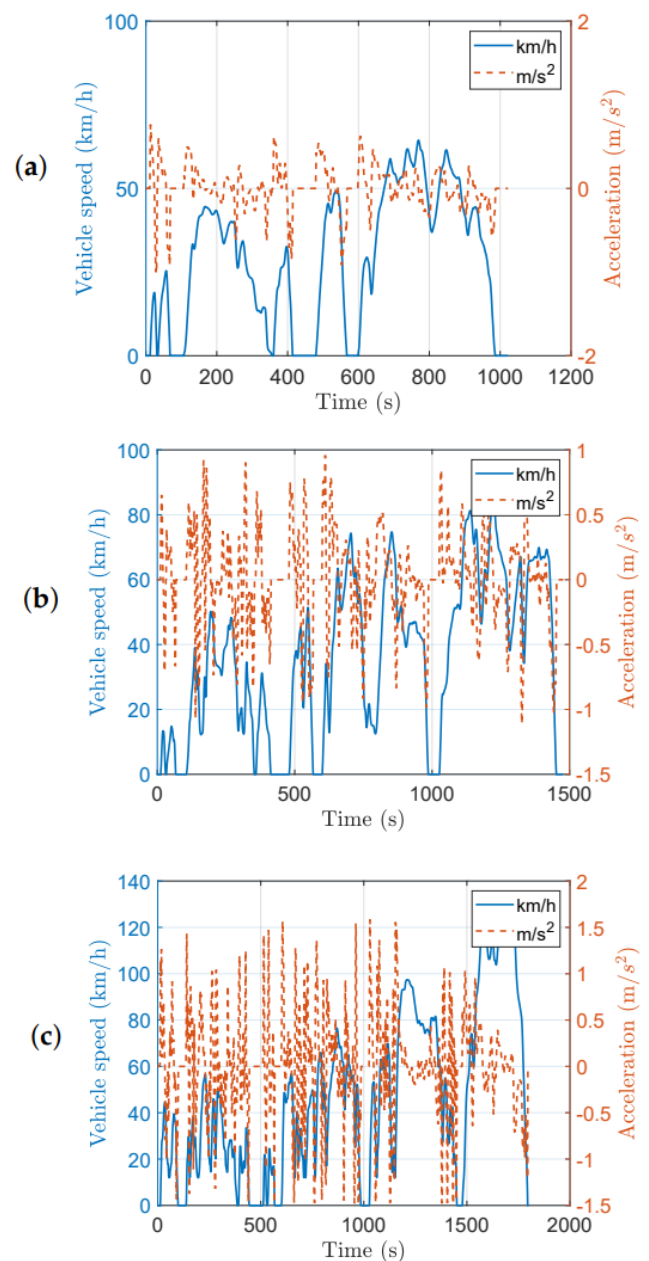


Figure 1 : Cycles de conduite WLTP pour la validation.  
 (a) Classe 1 : rapport puissance/poids en W/masse à vide en kg  $\leq 22$ .  
 (b) Classe 2 : rapport puissance/poids en W/masse à vide en kg  $> 22$  mais  $\leq 34$ .  
 (c) Classe 3 : rapport puissance/poids en W/masse à vide en kg  $> 34$ .

II.1.2/ Résultats des études numériques

Certaines simulations ont été réalisées pour un véhicule standard de classe 3, dont le rapport puissance-poids est supérieur à 34 W/kg, afin de quantifier les besoins en puissance et en énergie dans une application réelle. Les paramètres du véhicule considéré sont indiqués dans le tableau 1. Lorsqu'un véhicule se déplace, plusieurs forces de résistance doivent être surmontées, comme le montre la figure 2 :

- Force aérodynamique :  $F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_x S_f V^2$  ;
- Force de résistance au roulement :  $F_{rr} = f_{rr} M g \cos(\alpha)$  ;
- Force de résistance à la pente :  $F_{rc} = M g \sin(\alpha)$ .

Un calcul simple conduit aux équations suivantes qui modélisent la dynamique du véhicule :

$$\begin{cases} (J_{weels} + MR^2) \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r \\ C_r = \frac{1}{2} \rho C_x S_f R^3 \Omega^2 + M g (\sin(\alpha) + f_{rr} \cos(\alpha)) \end{cases}$$

Où,  $C_r$  est le couple résistant qui est appliqué aux roues et  $\Omega$  est la vitesse de rotation des roues.

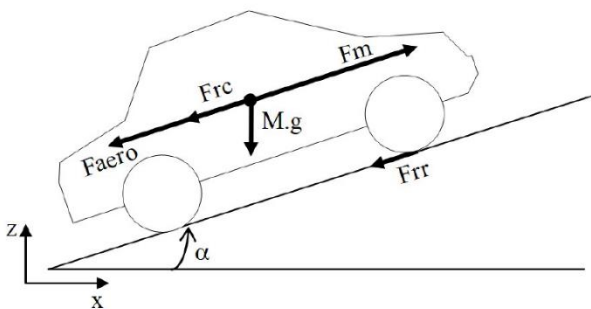


Figure 2 Forces affectant les véhicules en mouvement

Les besoins en puissance pour atteindre un cycle de conduite WLTP sont représentés à la figure 3. Ces courbes montrent que la puissance maximale requise est d'environ 85 kW, ce qui est bien supérieur à la puissance moyenne. De plus, le couple d'entraînement est d'environ 1,5 kN.m, ce qui est d'une importance capitale pour le dimensionnement des moteurs d'entraînement. Les besoins énergétiques sont illustrés à la figure 4 pour les véhicules de classe 1, de classe 2 et de classe 3, sans tenir compte du freinage par récupération. Il est intéressant de mentionner que, pour les véhicules de classe 3, les besoins énergétiques sont d'environ 250 Wh/km. Cela signifie que, pour une autonomie de 500 km et en considérant qu'une profondeur de décharge de 80 % est requise, l'énergie stockée dans la batterie devrait être de 156,25 kWh sans tenir compte de l'énergie requise pour alimenter les unités auxiliaires (pompe de circulation d'eau, système de contrôle, pompe de circulation de carburant, ventilateur de ventilation, pompe de circulation d'air, etc.)

Symbole	Paramètre	Valeur
$\rho$	Densité de l'air	1,2 kg/cm <sup>3</sup>
$C_x$	Coefficient de pénétration de l'air	0.302
$S_f$	Section transversale du véhicule	2.4 m <sup>2</sup>
$f_{rr}$	Coefficient de résistance au roulement	0.012
$g$	Accélération de la gravité	10 m/s <sup>2</sup>
$\alpha$	Angle de la pente	
$M$	Poids du véhicule	1500 kg
$R$	Rayon de la roue motrice	0.35 m
$J_{weels}$	Moment d'inertie des roues	0.75 x 4 kg.m <sup>2</sup>

Tableau 1 Paramètres du véhicule

Certaines solutions peuvent être mises en œuvre pour minimiser l'énergie requise dans le transport comme suit :

- Réduction de la masse des véhicules : l'objectif dans l'industrie automobile est de réduire le poids de 30% avec une limite de coût de 500 € pour 100 kg.
- Amélioration de l'aérodynamisme :
  - Pas d'amélioration significative du  $C_x$  (minimum de 0,26).
  - Réduction de la surface frontale du véhicule.

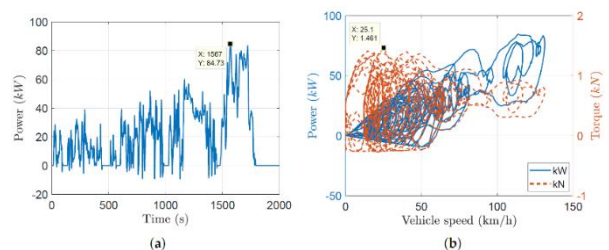


Figure 3

Résultats de la simulation pour les véhicules de classe 3.

- (a) Puissance en fonction du temps
- (b) Puissance en fonction de la vitesse du véhicule

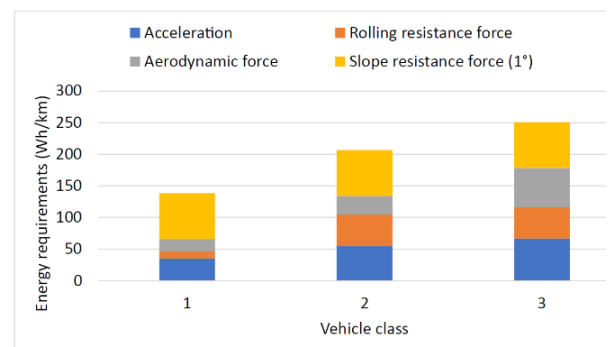


Figure 4 Exigences énergétiques pour un véhicule standard (tableau 1) en utilisant les cycles de conduite WLTP

- Réduction de la puissance totale de la charge routière par l'amélioration de la technologie des pneus.
- Évolution de l'infrastructure routière : gestion du trafic et amélioration des chaussées.
- Eco-conduite : conduite la plus sûre et la plus souple possible pour réduire la consommation d'énergie et limiter les émissions polluantes.

II.2/ Technologie des véhicules :

Sur la base des besoins en puissance et en énergie présentés précédemment, plusieurs technologies de véhicules peuvent être envisagées. En effet, les véhicules peuvent être classés en fonction des moteurs

utilisés : les véhicules à un moteur, qui comprennent les véhicules à moteur à combustion interne, les BEV et les FCEV, ou les véhicules hybrides, qui comprennent à la fois un moteur à combustion interne et un moteur électrique. On peut également les classer en fonction des dispositifs de stockage d'énergie utilisés : réservoir d'essence pour les véhicules à moteur à combustion interne, batteries pouvant être associées à des supercondensateurs pour les véhicules électriques (BEV), et réservoir d'hydrogène et batterie pour les véhicules électriques (FCEV). La classification des VE est présentée à la figure 5. Les avantages et les inconvénients des véhicules électriques et à moteur à combustion interne sont présentés dans le tableau 2.

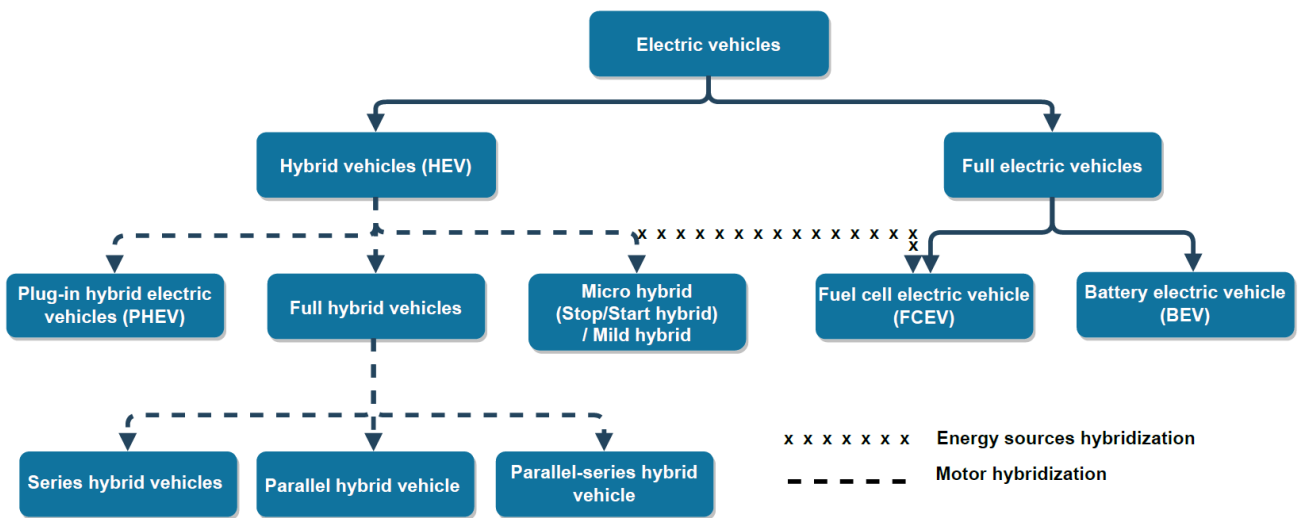


Figure 5 Classification des véhicules électriques

	Véhicules à moteur à combustion interne	Véhicules électriques
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Densité énergétique élevée du système de stockage (12 kWh/kg).</li> <li>- Infrastructure de distribution d'énergie.</li> <li>- Temps de ravitaillement très faible (60 L en moins de moins de 5 min représentant une puissance de plusieurs MW).</li> <li>- Présence d'une source de chaleur pour prévenir l'intérieur l'habitacle du véhicule.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Couple élevé à vitesse nulle.</li> <li>- Pas d'émissions polluantes.</li> <li>- Haut rendement.</li> <li>- Adapté à un usage urbain.</li> <li>- Principe mécanique simple.</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Émissions de gaz à effet de serre</li> <li>- Système mécanique sophistiqué</li> <li>- Faible rendement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible densité énergétique du système de stockage (moins de 200 Wh/kg)</li> <li>- Temps de recharge élevé.</li> <li>- Absence d'infrastructures de distribution d'hydrogène et de stations de recharge rapide pour les BEV.</li> <li>- Pas de source de chaleur pour réchauffer le véhicule pour les BEV.</li> </ul>

Tableau 2 Comparaison entre véhicules à moteur à combustion interne et véhicules électriques



### 11.2.1/ Véhicules à moteur à combustion interne

Le moteur à combustion interne (MCI) est un moteur thermique qui transforme l'énergie chimique du carburant en énergie cinétique, laquelle est utilisée pour propulser, déplacer ou alimenter le véhicule. Les moteurs à combustion interne sont généralement alimentés par des combustibles fossiles comme le gaz naturel ou des produits pétroliers tels que l'essence, le carburant diesel ou le mazout. Des carburants renouvelables comme le biodiesel et le bioéthanol sont également utilisés, et sont généralement mélangés à des carburants fossiles. L'hydrogène, qui est rarement utilisé, est actuellement obtenu massivement à partir de combustibles fossiles (hydrogène gris) et rarement à partir de ressources énergétiques renouvelables (hydrogène vert). Pour les véhicules de classe 3, la consommation d'énergie est d'environ 250 Wh/km, ce qui correspond à 25 kWh pour une autonomie de 100 km. En supposant un rendement thermique du moteur de 30 %, l'énergie thermique nécessaire pour parcourir 100 km est de 83,33 kWh. Le diesel ayant une densité énergétique de 9,7 kWh/L, un véhicule de classe 3 consomme environ 8,59 L et produit environ 22,3 kg pour parcourir 100 km (223 g par km). Si le réservoir du véhicule a une capacité de 70 L, l'autonomie totale de ce type de véhicule est de 814 km. La puissance que doit produire ce moteur à combustion interne doit être égale à 85 kW. Malheureusement, le moteur à combustion

interne présente l'inconvénient d'avoir un couple limité ou nul à basse vitesse et une bande de couple très limitée. Une transmission manuelle et un embrayage ou une transmission automatique sont généralement utilisés pour surmonter ce problème au prix d'un système de transmission de puissance complexe.

### 11.2.2/ Véhicules hybrides et hybrides rechargeables

Un véhicule électrique hybride (HEV) est un véhicule qui, en plus de sa ressource énergétique primaire (énergie chimique du carburant), dispose d'une seconde forme de stockage d'énergie réversible : hydraulique, pression, cinétique ou électrochimique. En général, les HEV combinent le moteur électrique associé au dispositif de stockage d'énergie de la batterie avec l'ICE pour alimenter les roues. De cette façon, le moteur à combustion interne fonctionne dans sa bande d'efficacité maximale et le moteur électrique permet d'atteindre la phase d'accélération. En effet, un moteur électrique est plus efficace pour produire du couple et le moteur à combustion interne est plus efficace pour maintenir une vitesse élevée. Les HEV comprennent les micro hybrides, les hybrides légers, les hybrides complets et les hybrides rechargeables. Le tableau 3 présente certaines caractéristiques en fonction du niveau d'hybridation.

Niveau d'hybridation	Consommation de carburant en cycle combiné	Puissance électrique installée	Tension de la batterie
Micro hybride (hybride avec démarrage/arrêt)	3 à 10 %	2 à 6 kW	12 V à 42 V
Hybride léger	15 à 25 %	10 à 20 kW	120 V à 150 V
Full Hybrid/Plug-In Hybride	30 à 40 %	20 à 60 kW	200 V à 300 V

Tableau 3 Véhicules hybrides : niveau d'hybridation

On peut distinguer trois configurations de véhicules entièrement hybrides, comme le montre la figure 6, à savoir les véhicules série, parallèle et parallèle-série. Le passage du moteur à combustion interne au moteur électrique et vice-versa au moment opportun, ainsi que le freinage par récupération, permettent d'améliorer l'efficacité de l'ensemble du système. Dans un véhicule hybride série (figure 6a), le moteur à combustion interne fournit généralement une puissance moyenne, tandis que les pics de puissance sont gérés par le dispositif de stockage d'énergie. Le moteur à combustion interne, qui

n'est pas directement couplé aux roues, peut être utilisé dans une plage de fonctionnement optimale, ce qui réduit la consommation et la pollution. Le moteur à combustion interne démarre automatiquement lorsqu'il ne reste que 30 % de charge dans la batterie. L'autonomie en mode électrique pur est d'environ 60/70 km. La batterie est chargée à partir du réseau électrique principal pour les véhicules électriques rechargeables, ou pendant la conduite lors des phases de récupération d'énergie : dans les descentes, lors du ralentissement en levant le pied de la pédale d'accélérateur, ou lors du

freinage. Dans la configuration hybride parallèle (figure 6b), le moteur à combustion fournit la puissance aux roues de la même manière que dans un véhicule conventionnel. Il est couplé mécaniquement à un moteur électrique qui peut l'assister. Selon la structure et la conception du véhicule, l'accouplement mécanique peut être soit un accouplement d'addition de couple, soit un mécanisme d'addition de vitesse. Enfin, le véhicule hybride à séries parallèles (figure 6c) combine les deux principes présentés précédemment. Ce véhicule est composé de deux machines électriques et d'un engrenage planétaire qui permettent le couplage mécanique avec l'ICE.

### II.2.3/ Véhicules électriques à batterie

Dans les BEV, le système de stockage de l'énergie des batteries (BESS) fournit l'énergie nécessaire à la traction/propulsion. L'autonomie du véhicule électrique dépend de la capacité de la batterie et du comportement du conducteur. Aujourd'hui, des batteries de 360 à 400 V de tension continue sont utilisées et des recherches approfondies sont menées pour augmenter la tension à 800 V. Plusieurs technologies de moteurs électriques sont utilisées pour propulser les VE, comme les moteurs synchrones à aimants permanents, les moteurs à induction, les moteurs synchrones à rotor bobiné et les moteurs à réluctance synchrones à aimants permanents internes (IPMSynRM). Le système de conversion de puissance typique des BEV est illustré par la figure 7a. Les BEV peuvent fonctionner selon deux modes différents : le mode batterie et le mode freinage par récupération. En mode batterie, l'énergie est transférée au moteur qui entraîne les roues par l'intermédiaire d'un convertisseur CC/CC survolté suivi d'un convertisseur CC/CA. En mode de freinage par récupération, l'énergie

cinétique du véhicule est convertie en électricité et stockée dans la batterie. Avec le mode de freinage par récupération, l'énergie consommée aux roues est d'environ 15 kWh par 100 km (sauf pour la conduite sur autoroute). Le rendement du train de transmission est d'environ 90 %. Par conséquent, 16,7 kWh d'énergie électrique sont nécessaires pour atteindre une autonomie de 100 km. Si l'on souhaite obtenir la même autonomie qu'avec un véhicule à moteur à combustion interne, il faut disposer d'une énergie de 145 kWh. Les batteries ne peuvent pas être complètement déchargées, et une batterie de 160 kWh est nécessaire. L'énergie spécifique des batteries dépend de la technologie utilisée. Elle varie de 75 Wh/kg pour les batteries Lithium-Titane-Oxyde (LTO) à environ 250 Wh/kg pour les batteries Lithium-Nickel-Manganèse-Cobalt-Oxyde (NMC). En considérant une énergie spécifique d'environ 150 Wh/kg, la masse totale de la batterie requise doit être de 1100 kg. Malheureusement, ce poids est énorme et la mise en œuvre de cette batterie n'est pas adaptée pour diverses raisons telles que le coût de la batterie, son poids et son temps de recharge. Le dimensionnement précédent de la batterie est effectué sur la base de l'autonomie du véhicule électrique. Il est primordial que les batteries choisies permettent de fournir la puissance requise tout en respectant les contraintes thermiques. Une étude thermique est nécessaire pour réaliser un dimensionnement approprié de la batterie en fonction de la contrainte de puissance ou pour limiter la puissance requise et par conséquent les performances du véhicule électrique. Une autre solution consisterait à combiner deux types d'ESS : des batteries pour obtenir l'autonomie requise et des supercondensateurs pour délivrer les pics de puissance.

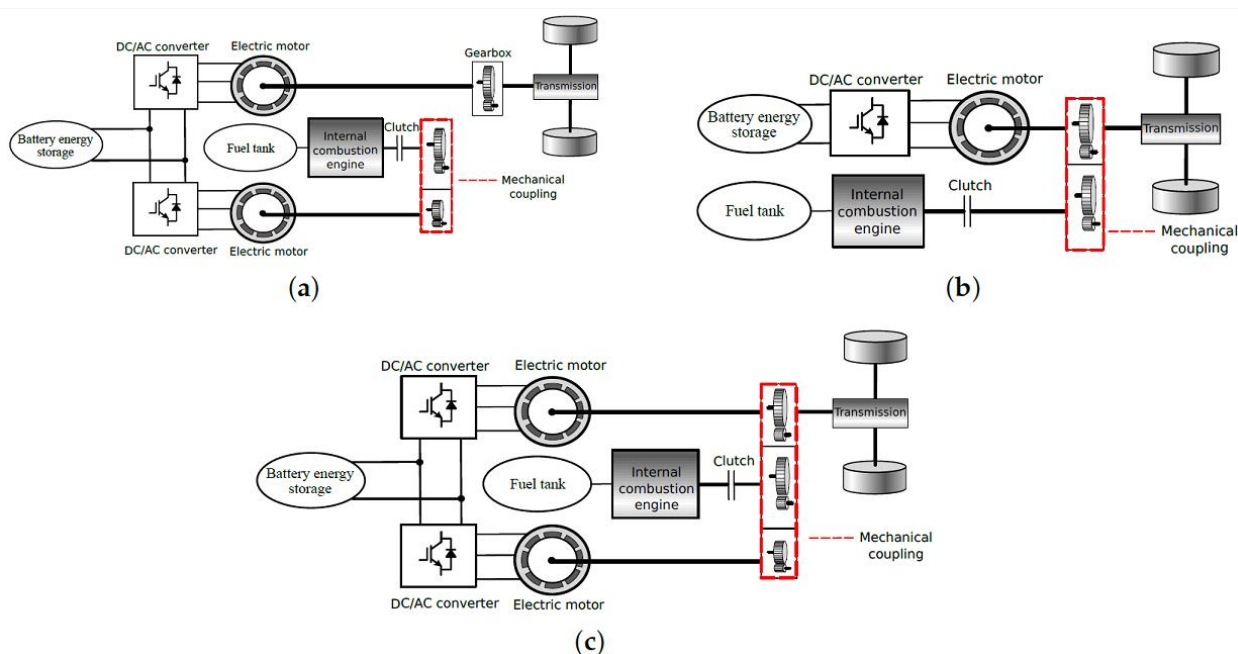


Figure 6 Classification des véhicules entièrement hybrides. (a) Véhicule hybride série. (b) Véhicule hybride parallèle. (c) Véhicule hybride parallèle-série.

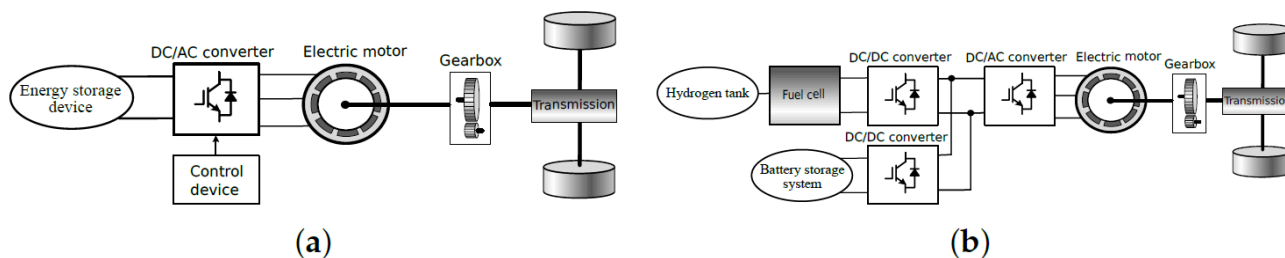


Figure 7 Véhicules à moteur électrique. (a) Véhicules électriques à batterie. (b) Véhicules électriques à pile à combustible.

#### 11.2.4/ Véhicules électriques à pile à combustible

Un véhicule électrique à pile à combustible (FCEV) est un véhicule électrique qui utilise une pile à combustible en combinaison avec une petite batterie ou un supercondensateur, pour alimenter son moteur électrique embarqué, comme le montre la figure 7b. L'élément clé du véhicule électrique à pile à combustible est la pile à combustible, qui produit de l'électricité en utilisant l'oxygène de l'air et l'hydrogène comprimé stocké dans une technologie spéciale de réservoirs à 350 bars ou 700 bars (10 000 PSI). Les FCEV sont considérés comme des véhicules à émissions nulles qui ne rejettent que de l'eau et de la chaleur. Des piles à combustible à basse température (80 °C) sont disponibles sur le marché, tandis que les piles à combustible à haute température (160 °C) font l'objet de recherches approfondies dans les milieux universitaires et industriels. Il existe plusieurs types de piles à combustible, comme les piles à membrane électrolyte polymère, les piles à méthanol direct, les piles à combustible alcalines, les piles à combustible à acide phosphorique, les piles à combustible à carbonate fondu, les piles à combustible à oxyde solide et les piles à combustible réversibles. On peut distinguer cinq modes de fonctionnement dans les FCEV. En mode carburant, une pile à combustible est utilisée pour alimenter le moteur du groupe motopropulseur du véhicule électrique. En mode batterie, une batterie est utilisée pour propulser le train individuellement. L'utilisation des deux modes, pile à combustible et batterie, est appelée mode combiné. Dans ce mode, la puissance moyenne est fournie par la pile à combustible et les pointes de puissance sont fournies par la batterie. En mode partagé, la pile à combustible est utilisée pour faire avancer le véhicule et pour charger la batterie. Enfin, en mode régénératif, l'énergie cinétique est utilisée pour charger la batterie pendant le freinage du véhicule. Les véhicules à pile à combustible présentent les avantages d'une plus grande autonomie et de temps de ravitaillement courts. De plus, tant que l'énergie utilisée pour produire de l'hydrogène est durable, il s'agit d'un véritable carburant vert. Cependant, l'efficacité des véhicules à pile à combustible n'est que de 38 % par rapport aux véhicules électriques, dont l'efficacité est de 80 à 95 %. De plus, malgré certains progrès dans la technologie de production de l'hydrogène, il s'agit dans la grande majorité des cas d'un hydrogène gris polluant qui nécessite des processus à forte intensité énergétique, largement alimentés par du gaz naturel et des

combustibles fossiles ou beaucoup d'électricité nucléaire. Enfin, la livraison de l'hydrogène nécessiterait la construction d'une nouvelle infrastructure vaste et coûteuse.

#### 11.3/ Stations de recharge

Avec l'expansion rapide du marché des véhicules électriques (véhicules électriques et hybrides rechargeables) et l'augmentation de la capacité de leurs batteries, une infrastructure de recharge correctement répartie, offrant des possibilités de recharge fiables et sûres, est essentielle pour répondre aux besoins des utilisateurs et contribuer au déploiement de la mobilité électrique. Les technologies de recharge des VE peuvent être classées en trois grandes catégories, à savoir la recharge par conduction, la recharge par induction et l'échange de batteries, comme le montre la figure 8 et les illustrations correspondantes sont fournies à la figure 9.

##### 11.3.1/ Équipement d'alimentation des véhicules électriques

L'équipement d'alimentation du véhicule électrique (EVSE) fournit de l'électricité aux batteries du véhicule électrique. L'EVSE comprend des conducteurs d'énergie électrique, des ports de charge, des équipements de protection, ainsi que des logiciels et des dispositifs et protocoles de communication utilisés pour fournir de l'énergie électrique afin de recharger les batteries des VE de manière efficace et sécurisée, et pour assurer la communication entre le VE et la station de charge, d'une part, et gérer les interactions entre la station de charge et le réseau électrique, d'autre part. Les types et les normes des EVSE sont présentés dans le tableau 4. Ces normes et codes définissent principalement l'interface entre le VE et l'EVSE et l'interface entre le VE et le réseau électrique. Les normes les plus courantes sont la norme SAE J1772 en Amérique du Nord et les normes IEC 61851/62196 en Europe et sur les marchés émergents. Ces EVSE peuvent être à courant alternatif ou à courant continu, comme le montre la figure 8. La charge en courant alternatif utilise l'énergie directement du réseau électrique, l'EVSE se contentant de surveiller le flux d'énergie et d'assurer un environnement de fonctionnement sûr, comme le montre la figure 10. La conversion du courant alternatif en courant continu est effectuée à bord pour alimenter la batterie. Toutefois, les options de charge en courant continu convertissent le courant alternatif du réseau en courant continu hors du véhicule et alimentent directement la batterie du véhicule électrique (figure 10). Cela permet des niveaux de puissance de charge plus élevés que pour la charge en

courant alternatif. Tous les chargeurs nécessitent des broches simples pour les communications et les commandes, qui assurent la détection des défauts et la protection contre les surcharges. Les communications des véhicules et des chargeurs modernes comprennent la communication avec le véhicule, qui surveille le flux de données dans les véhicules, notamment l'état de charge, la communication avec le chargeur, qui supervise le flux

de données dans l'EVSE, et enfin la communication avec le réseau, qui supervise le flux de données dans les fournisseurs de données tiers. L'EVSE a des exigences spécifiques en matière de qualité de l'alimentation mais dispose d'une large gamme de puissance de sortie autorisée pour différents niveaux de charge.

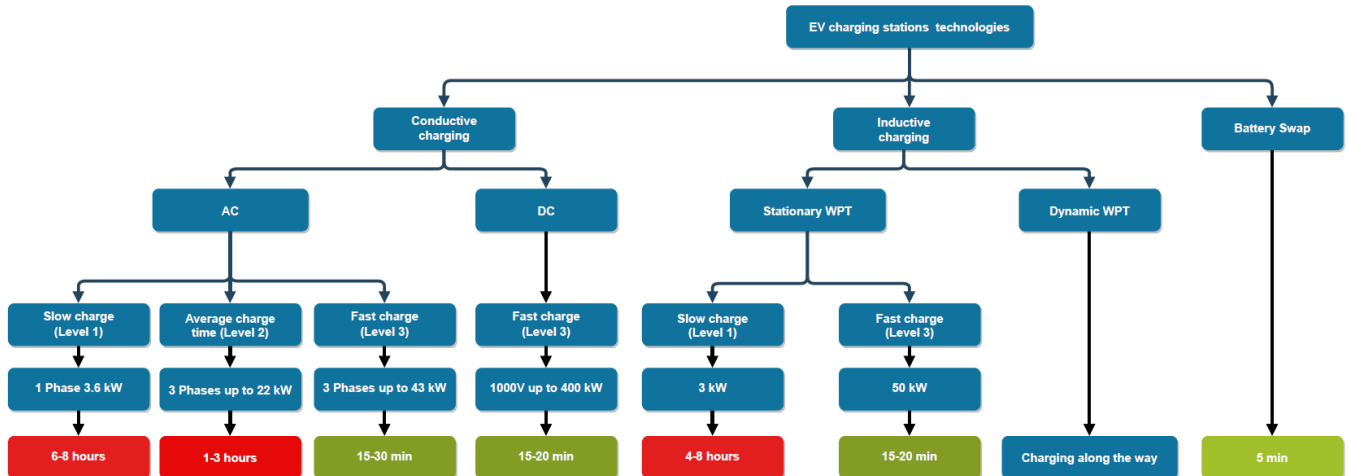


Figure 8 Classification de stations de recharges

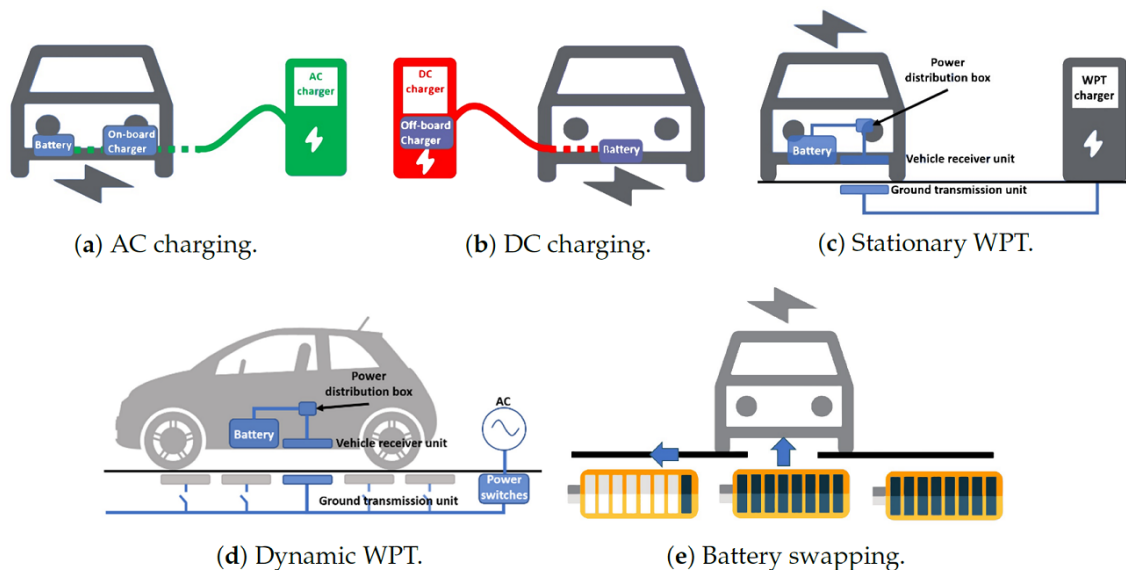


Figure 9 Illustration de classification de stations de recharges

### 11.3.2/ Modes de charge des VE et niveau des stations de charge

Il existe trois modes de charge des VE : la charge conductive, la charge inductive et l'échange de batteries. Ces modes de charge sont brièvement décrits dans ce qui suit :

- Chargeurs par conduction :

Les chargeurs par conduction peuvent être embarqués ou non. Les chargeurs embarqués sont des chargeurs à courant alternatif qui sont limités en termes de taille et de puissance nominale. La conversion CA/CC est effectuée à l'intérieur du véhicule, ce qui peut

offrir la possibilité d'utiliser le système de conversion de l'énergie de traction pour la charge des batteries. Les chargeurs hors-bord sont des chargeurs à courant continu caractérisés par une puissance de sortie plus élevée. En outre, cette configuration offre plus de flexibilité en termes de puissance pouvant être fournie. Les stations de recharge par conduction peuvent être classées en trois niveaux distincts. Les EVSE sont classés en niveau 1, niveau 2 et chargeur rapide DC, qui diffèrent en termes de type et de niveau de puissance de sortie. Tous les véhicules peuvent être connectés à un chargeur de niveau 1 ou de niveau 2. Cependant, certains véhicules ne peuvent pas être chargés sur un chargeur de

niveau 3 car ils dépassent les limites fixées par les constructeurs, comme les limites liées au taux de charge des batteries.

- Chargeur de niveau 1 : La charge de niveau 1 se fait via un chargeur de VE embarqué de faible puissance (ne dépassant pas 2 kW). Ces chargeurs se branchent sur une prise de courant standard de 220 V (120 V en Amérique du Nord) et peuvent recharger un VE pour une autonomie de 200 km en 20 h. Les prises de courant standard sont disponibles partout ; la recharge de niveau 1 est généralement effectuée à domicile et dans les aires de stationnement des immeubles résidentiels.
- Chargeur de niveau 2 : Les chargeurs de niveau 2 sont généralement des chargeurs à courant alternatif qui sont concernés par les normes suivantes : type 1 (j1772), type 2 (mennekes), et chargeur AC Tesla. Ce niveau est basé sur l'utilisation du chargeur AC/DC embarqué du VE conçu pour des puissances plus élevées. La charge de niveau 2 nécessite une station de charge fixe alimentée par un circuit de dérivation séparé de 208 V ou 240 V. Elle nécessite un équipement et une installation spécifiques pour son déploiement au niveau domestique et commercial.
- Chargeur de niveau 3 : Il s'agit généralement de chargeurs à courant continu basés sur l'utilisation de l'EVSE hors-bord offrant une puissance beaucoup plus élevée que les niveaux 1 et 2 et pouvant charger un véhicule électrique beaucoup plus rapidement (moins d'une heure). Ces chargeurs sont installés le long des autoroutes. Le niveau 3 doit être conforme aux exigences des normes suivantes : type 2 DC (mennekes), CHAdeMO (JEV G105-1993), chargeurs Tesla DC, CCS combo et GB/T.
- Chargeurs inductifs :
  - Le chargeur inductif est un système de transfert d'énergie sans contact (WPT) permettant la charge des batteries à partir d'ondes électromagnétiques. Ce type de charge est disponible en deux configurations :
    - La charge stationnaire : réalisée à l'arrêt sur une place de parking. Cette configuration permet de supprimer les bornes nécessaires, le déclenchement de la charge et le paiement étant commandés par le système multimédia du véhicule électrique.
    - Charge dynamique : La recharge du VE s'effectue pendant la conduite grâce à un dispositif intégré le long de la route.

La recharge sans fil résoudra efficacement le problème de la multitude de ports de recharge dont la forme, la taille et la configuration des broches varient selon la marque du VE et le pays. En fait, avec l'utilisation de cette méthode de recharge, tous les véhicules électriques seront rechargés avec la même infrastructure et seront dispensés de l'utilisation de câbles conventionnels. De plus, grâce à l'intégration au

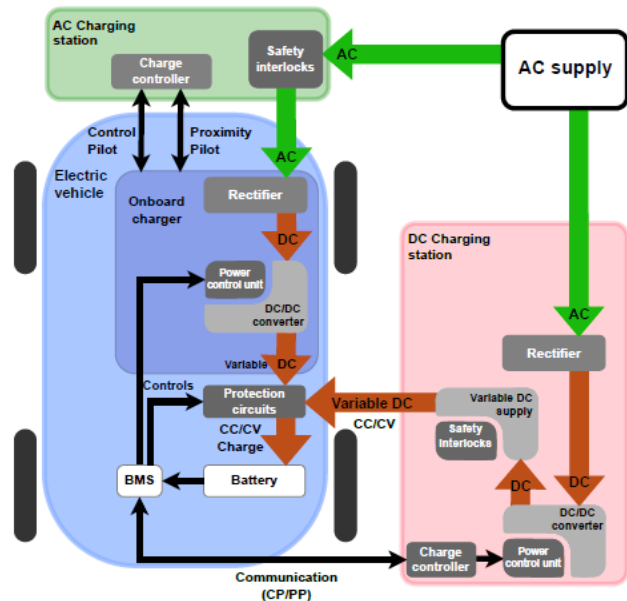


Figure 10 Équipement pour l'alimentation des véhicules électriques.

sol du système, il évite tout risque de vandalisme ou d'arrachage par un conducteur distrait et élimine également tout risque d'électrocution puisqu'il n'y a aucun contact électrique. De plus, avec la charge inductive dynamique, il est possible de réduire la capacité de la batterie, ce qui contribuera à une réduction considérable du coût du VE. Cependant, cette méthode de charge présente certains inconvénients. En effet, la méthode de charge par induction a un rendement global inférieur à celui de la méthode de charge par conduction, car le processus de conversion d'énergie utilisant un espace d'air est moins efficace que le transfert d'énergie direct utilisant des câbles. En outre, l'efficacité de la charge inductive diminue en raison du désalignement entre les bobines de l'émetteur et du récepteur.

- Échange de batteries :

L'échange de batterie fonctionne sur la base du remplacement de la batterie déchargée par une batterie identique avec une charge de 100%. Le processus consiste à se rendre dans une baie d'échange de batteries, et un processus automatisé positionne le véhicule, déconnecte la batterie actuelle et la remplace par une batterie entièrement chargée. Les batteries déchargées sont rechargées dans la station pour une utilisation ultérieure. Le système fonctionne selon le modèle commercial selon lequel l'utilisateur du VE est propriétaire du véhicule, et non de la batterie. L'échange de batterie reste la méthode la plus rapide (équivalent au temps de ravitaillement). Cependant, cette méthode est très difficile à mettre en œuvre car les batteries doivent être standardisées entre plusieurs fabricants de VE. De plus, les utilisateurs sont plus susceptibles de rejeter l'idée de changer leurs batteries avec d'autres personnes qui peuvent avoir de mauvaises conditions de santé. Il existe également d'importants problèmes de coûts et de logistique, car il faut disposer d'un nombre suffisant de batteries supplémentaires dans le poste d'aiguillage pour approvisionner rapidement les clients.










Connecteurs	Modes de charge	Symboles	Pays	Broches	Tension/Courant/Puissance	Normes
Type1/j1772	AC		USA Japon	3 broches d'alimentation (L, N, PE)	1Φ 120V, ≤ 16A, 1.9 kW 1Φ 240V, ≤ 80A, 19.2kW	SAE j1772, IEC 62196
Type2/Mennekes	AC		EU Chine	5 alims. (L1, L2, L3, N, PE) 2 commandes – CP, PP (PWM sur CP)	1Φ 230V, ≤ 32A, 7.4kW 3Φ 400V, 63A, 43kW	IEC 62196 GB/T 20234.2-2015
	DC		Tesla (EU)	5 alims. (2DC+, 2DC-, PE) 2 commandes CP (PWM), PP	400V, ≤ 140 A, 56 kW	IEC 62196
CHAdEMO (JEV G105-1993)	DC		Japon	3 alims (DC+, DC-, PE) 7 commandes (comm. CAN)	200-500V, ≤ 400A, 200kW CHAdEMO 2.0 : 1000V, ≤ 400A, 400kW	IEC 61851-23, -24 IEC 62196-3 IEEE 2030.1.1TM-2015
CSS/Combo	DC		USA	3 alims. AC 2 alims. DC 2 commandes CP (en PLC), PP	200-1000V DC, ≤ 350A, 350kW	IEC 62196-1/2/3 IEC 61851-1/22 IEC 61851-1/23, ISO/IEC 15118 DIN SPEC 70121 SAE J2847/2
			EU	5 alims. AC 2 alims. DC 2 commandes CP (en PLC), PP		
GB/T	DC		Chine	5 alim.:(DC+,DC-,PE), 2 alim. Aux. BT 4 broches de signal : 2 PP, 2CAN	750V/ 1000V, ≤ 250A, 237.5kw	GB/T 20234
Tesla	AC		Monde (Sauf EU)	3 alim.(DC+,DC-,E) 2commande CP, PP	1Φ 240V, ≤ 72A, 17.2kW	IEC 62196
	DC			3 alim.(L1,N,E) 2commande CP, PP	400V, ≤ 650A, 250kW	

Tableau 4 Types et normes de connecteurs de chargement.

#### IV/ Électronique de puissance pour les stations de recharge des VE

La charge des VE nécessite des stations de charge monophasées ou triphasées qui ont des capacités de flux de puissance unidirectionnel ou bidirectionnel. En outre, les chargeurs de VE peuvent utiliser des équipements de traction pour atteindre une densité de puissance élevée et réduire le poids afin de gagner de la place dans le véhicule tout en augmentant l'efficacité.

##### IV.1/ Spécifications

D'une manière générale, une station de recharge pour véhicules électriques doit répondre aux spécifications suivantes et assurer un certain nombre d'autres fonctions, notamment la durabilité, l'efficacité et les performances :

1. Mettre en œuvre une correction du facteur de puissance : absorber un courant sinusoïdal exempt d'harmoniques avec un facteur de puissance égal à 1.
2. Topologie bidirectionnelle de l'électronique de puissance qui permet de participer au stockage d'énergie sur le réseau afin de mettre en œuvre un concept de véhicule à réseau ou de véhicule à domicile.
3. Topologie bidirectionnelle de l'électronique de puissance permettant de participer au stockage d'énergie sur le réseau afin de mettre en œuvre un concept de véhicule à réseau ou de véhicule à domicile.
4. Utilisation de l'onduleur de traction dans l'électronique de puissance de charge des VE.
5. Pas d'inductance de filtrage supplémentaire en utilisant les enroulements du moteur de traction.
6. Possibilité d'équilibrer les cellules élémentaires de la batterie en mettant en œuvre une partie des fonctions du système de gestion de la batterie.
7. Transfert d'énergie sans contact.

##### IV.2/ Solutions d'électronique de puissance

Pour répondre aux exigences des stations de recharge des VE, plusieurs solutions d'électronique de puissance ont été proposées et mises en œuvre par les constructeurs automobiles et les fournisseurs d'énergie. Ces solutions sont brièvement présentées et discutées dans les sous-sections suivantes. Le lecteur peut se référer à l'article suivant pour plus de détails sur les configurations de l'électronique de puissance.

##### IV.2.1/ Chargeur de batterie unidirectionnel

Les chargeurs unidirectionnels comportent un pont redresseur à diodes (DBR) associé à un étage de filtrage et à un convertisseur DC/DC, comme le montre la Figure 11. Le DBR peut être monophasé (Figure 11) ou triphasé pour augmenter la puissance de charge. De plus, un transformateur d'isolation haute fréquence est utilisé pour assurer l'isolation pendant la charge du véhicule électrique. Cette topologie de convertisseur n'a pas la

capacité d'utiliser la batterie du véhicule électrique comme ressource énergétique et d'injecter ensuite de l'énergie dans le réseau électrique. Cependant, elle permet de fournir des services auxiliaires, principalement la régulation de la tension, en fournissant ou en absorbant la puissance réactive du réseau principal sans que la batterie du véhicule électrique ne se décharge. Les chargeurs de batterie unidirectionnels offrent une solution simple et facile à contrôler pour gérer le parc de VE et répondre aux exigences d'une solution de charge sûre, fiable et compétitive en termes de coûts. Cependant, avec la pénétration croissante des VE dans le secteur des transports, ceux-ci sont appelés à jouer un rôle clé dans la régulation du réseau principal (principalement, la régulation de la fréquence et de la tension), ce qui ne peut être totalement assuré par les chargeurs de VE unidirectionnels. Par conséquent, il est nécessaire de mettre en place des topologies de flux d'énergie bidirectionnelles qui permettent aux VE d'agir comme un stockage d'énergie distribué sur le réseau électrique.

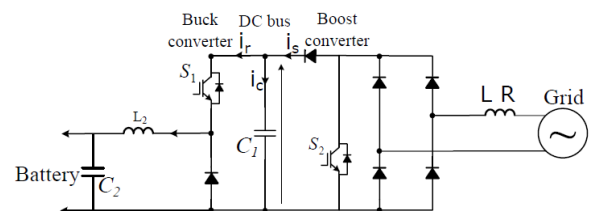


Figure 11 Chargeur de VE unidirectionnel

##### IV.2.2/ Chargeur de batterie bidirectionnel

Les chargeurs de VE bidirectionnels sont composés de deux étages, à savoir un frontal actif (AFE) monophasé ou triphasé suivi d'un convertisseur CC/CC bidirectionnel, comme le montre la figure 12. L'AFE est un convertisseur CA/CC bidirectionnel qui permet de réguler la tension du bus CC et de contrôler les courants de réseau quasi-sinusoïdaux, tout en assurant un facteur de puissance unitaire (contrôle de l'angle de phase du courant) ou en échangeant de la puissance réactive avec le réseau électrique. Le deuxième étage permet de contrôler le courant de charge de la batterie. Le convertisseur DC/DC peut avoir une configuration de circuit isolée ou non isolée. Cette topologie de convertisseur offre un échange bidirectionnel de puissance avec le réseau principal pour soutenir le réseau pendant les périodes de congestion et se comporter comme un stockage d'énergie supplémentaire pendant les périodes creuses. La charge bidirectionnelle présente plusieurs avantages par rapport à la charge unidirectionnelle. Lors de la recharge d'un véhicule électrique, il a été démontré que l'utilisation de la recharge bidirectionnelle peut augmenter les bénéfices d'au moins 25 % par rapport à la recharge unidirectionnelle standard grâce au principe du véhicule au réseau (V2G). Dans le cadre de la charge bidirectionnelle, l'utilisation de la capacité des batteries des VE peut également contribuer aux services auxiliaires, tels que le maintien de la fréquence et de la tension aux niveaux nominaux et le contrôle des risques

de congestion. En effet, ce système énergétique distribué permet de fournir/absorber de la puissance active pour maintenir la fréquence nominale du réseau (paramètre global) et de fournir/absorber de la puissance réactive pour réguler le niveau de tension (paramètre local).

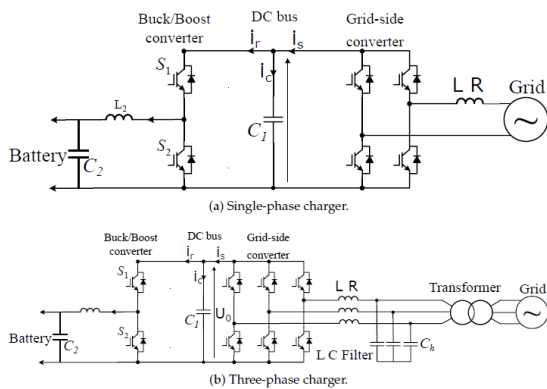


Figure 13 Chargeur de VE bidirectionnel

#### IV.2.3/ Chargeur de VE intégré à bord

La charge en courant alternatif nécessite généralement un convertisseur de puissance CA/CC embarqué. Il est intéressant de noter que le moteur et le convertisseur d'entraînement du moteur, qui convertit le courant continu de la batterie en courant alternatif pour le moteur, peuvent également être utilisés comme chargeur embarqué pour la batterie. En effet, les dispositifs existants de la chaîne cinématique sont reconfigurés avec un minimum de composants supplémentaires pour permettre la recharge. Il n'est donc pas nécessaire de disposer d'un convertisseur de puissance CA/CC distinct pour le chargeur embarqué. Étant donné que le convertisseur de puissance de la chaîne cinématique est généralement de grande puissance (plus de 100 kW), cela signifie également que le VE peut atteindre des taux de charge assez élevés (plus de 22 kW). Le défi consiste à concevoir l'entraînement du moteur et sa commande de manière à assurer la double fonctionnalité de charge du VE à l'arrêt et de propulsion du VE en mouvement.

Le chargeur de VE intégré à bord est un chargeur de VE bidirectionnel qui utilise un seul onduleur/redresseur pour tous les modes de fonctionnement du VE. Cette topologie permet de minimiser le nombre de dispositifs électroniques de puissance puisque les mêmes commutateurs de puissance sont utilisés pour la traction/propulsion du véhicule électrique, le freinage et la recharge de la batterie. De cette façon, le coût, la taille et le poids du chargeur du véhicule électrique sont considérablement réduits. La figure 13 présente la topologie d'un tel système de conversion de puissance dans lequel le même convertisseur est utilisé pour alimenter le moteur et recharger la batterie du véhicule électrique. Dans la figure 14, la configuration du chargeur embarqué utilise le convertisseur de traction ainsi que les enroulements du moteur. Les enroulements du moteur de chaque phase sont divisés en deux parties équivalentes, puis reconnectés en sens inverse pour

annuler le couple en mode de charge de la batterie. L'enroulement du moteur agit comme un filtre inducteur de sorte que les courants de ligne sont des courants sinusoïdaux lisses avec un faible THD. Un excellent exemple de cette mise en œuvre est le Renault ZOE EV, qui fournit une charge rapide AC embarquée de 43 kW.

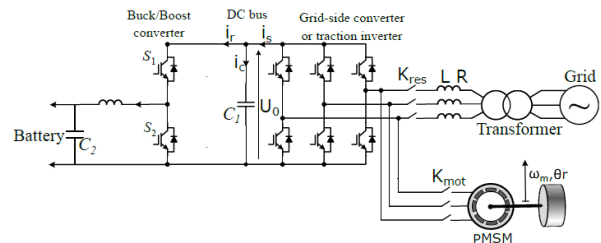


Figure 12 Chargeur de VE bidirectionnel utilisant l'onduleur de traction

Renault a déclaré utiliser une boîte de jonction qui permet de modifier le fonctionnement du moteur et des composants de l'entraînement du moteur pour l'utiliser comme chargeur de VE embarqué.

Le principal problème de ces chargeurs EV intégrés est le couple produit par le moteur en raison du courant circulant dans les enroulements du moteur. Une solution pour contrôler ce couple consiste à utiliser un frein mécanique pendant la charge de la batterie. D'autres solutions, qui dépendent du type de moteur, peuvent être mentionnées : Dans le cas d'un moteur à courant alternatif à rotor bobiné, la coupure de l'excitation annule le champ magnétique du rotor. Par conséquent, l'interaction entre les champs magnétiques du stator et du rotor est annulée et la condition de couple nul est maintenue pendant la charge. Cependant, même si l'excitation est coupée, un couple réactif peut se produire, entraînant la vibration ou même la rotation de

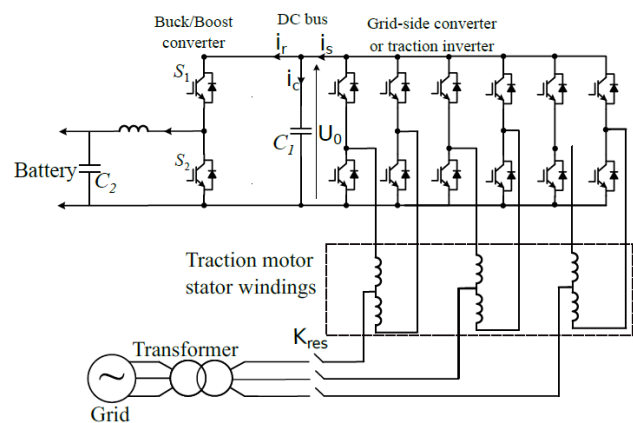


Figure 14 Chargeur de VE bidirectionnel utilisant l'onduleur de traction et les enroulements du moteur

la machine. Dans le cas d'un moteur synchrone à aimants permanents, comme il n'a pas de couple de démarrage, les enroulements du stator de la machine triphasée peuvent être connectés au réseau sans risque de rotation du rotor. Toutefois, des vibrations peuvent tout de même se produire. Par ailleurs, les chargeurs embarqués intégrés pour les VE présentent d'autres inconvénients, à savoir :



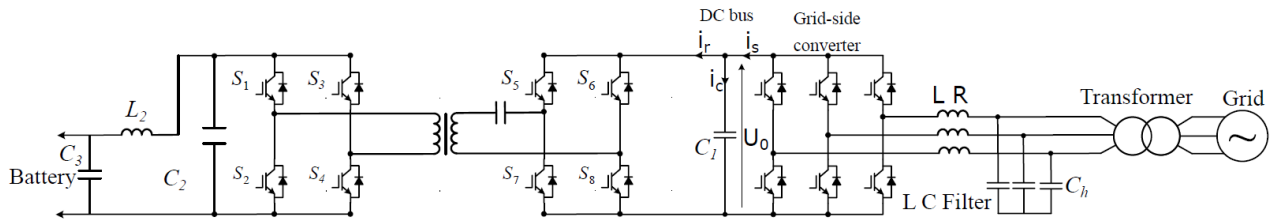


Figure 15 Chargeur de VE basé sur le transfert de puissance sans contact

- Nécessité d'une machine électrique spécialement conçue ;
- Difficulté d'accès au point neutre des enroulements du moteur ;
- Fiabilité réduite en raison de l'utilisation de contacteurs mécaniques.

IV.2.4/ Chargeur de batterie bidirectionnel utilisant des convertisseurs multiniveaux modulaires

Ce type de chargeurs intégrés utilise des convertisseurs multiniveaux modulaires (MMC), qui sont plus intéressants que les convertisseurs à deux niveaux et les convertisseurs à pincement de point neutre. Le MMC est un convertisseur de source de tension avancé qui présente des avantages concurrentiels tels qu'une puissance de sortie de haute qualité, une grande modularité, une évolutivité simple, une capacité de tolérance aux pannes et une faible demande de tension et de courant pour les commutateurs de puissance. Ces dernières années, l'incorporation de semi-conducteurs à large bande (SiC et Gan) a été étudiée pour mettre en œuvre l'application MMC avec d'autres avantages tels que des opérations à haute tension et à haute puissance, de faibles pertes de puissance, un rendement élevé, une fiabilité améliorée, une taille de module et un système de refroidissement réduits.

Le convertisseur en pont en H multi-niveaux en cascade est le mieux adapté aux applications de charge

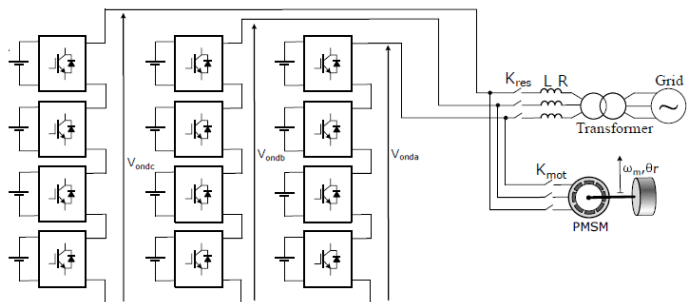


Figure 16 Chargeur de VE bidirectionnel utilisant des convertisseurs multiniveaux modulaires

de batterie. La topologie du convertisseur utilisant un MMC au niveau des cellules de la batterie pour réaliser à la fois le convertisseur de traction et le chargeur de batterie embarqué est illustrée à la figure 15. En mode moteur, le courant passe des batteries au moteur par l'intermédiaire des onduleurs en cascade. Les onduleurs en cascade peuvent également être utilisés comme redresseurs en mode chargeur de batterie. Il est possible d'utiliser les enroulements du moteur comme

inductance, mais il est plus approprié d'utiliser de petites inductances externes.

IV.2.5/ Chargeur de VE basé sur le transfert de puissance sans contact

La charge inductive est la meilleure alternative aux chargeurs conductifs en raison des nombreux avantages qu'offre cette technologie. En effet, ce mode de charge présente les avantages suivants : accessibilité, charge standardisée, facilité d'échange d'informations avec le véhicule, et sécurité pour l'utilisateur puisqu'il n'y a pas de contact électrique et que les câbles lourds sont éliminés. Cela peut réduire considérablement le poids du véhicule et, par conséquent, sa consommation d'énergie. La recharge par induction est basée sur le principe du transfert d'énergie sans fil, comme le montre la figure 16. Dans cette configuration, la tension alternative du réseau est redressée à l'aide d'un convertisseur CA/CC avec une correction du facteur de puissance (PFC) pour garantir un facteur de puissance unitaire et ajuster la tension de sortie redressée (qui est généralement d'environ 400 V). Un onduleur haute fréquence est alimenté par la tension de sortie continue et produit une onde de tension carrée à une fréquence de 85 kHz. L'onduleur haute fréquence est suivi d'un réseau d'adaptation d'impédance (IMN) éliminant les harmoniques de courant produites et compensant la puissance réactive due à l'inductance de fuite de la bobine émettrice, ce bloc est également connu dans la littérature comme l'étage de compensation primaire. Lorsque la bobine émettrice est alimentée par la tension de sortie filtrée de l'onduleur, elle produit un champ magnétique variable dans le temps qui peut être dirigé vers la bobine réceptrice à l'aide de noyaux de ferrite, ce qui permet un transfert de puissance sans fil de l'assemblage au sol à l'assemblage du véhicule. Le champ magnétique variable dans le temps induit une tension alternative dans la bobine du récepteur à la même fréquence que la tension de la bobine primaire. Cette tension est appliquée à un étage de compensation secondaire (IMN), puis redressée. Le redresseur peut être un redresseur contrôlé ou un redresseur à diodes. Dans les systèmes bidirectionnels, un redresseur contrôlé est nécessaire pour assurer un flux de puissance bidirectionnel afin de mettre en œuvre le concept V2G. Enfin, un convertisseur DC/DC buck-boost est utilisé pour contrôler le courant fourni à la batterie.

### IV.3/ Résumé des exigences techniques relatives aux stations de recharge des VE

Les modes de charge des VE varient en fonction de plusieurs critères liés à l'efficacité, la durabilité, la performance et le coût. Plusieurs architectures d'électronique de puissance ont été étudiées dans le milieu universitaire et mises en œuvre dans l'industrie. Avec l'évolution du système électrique des véhicules et l'augmentation de la demande de puissance de charge pour différents niveaux, de nouveaux types de chargeurs CA dont le fonctionnement est basé sur l'utilisation de l'onduleur de traction et des enroulements du moteur du VE émergent. Ces types de chargeurs permettent de fournir une puissance élevée avec une architecture compacte et un faible coût. En outre, la charge inductive semble être une technologie très intéressante pour les stations de charge des VE dans un avenir proche, en particulier pour les applications domestiques.

Spécifications	1	2	3	4	5	6
Chargeur de batterie unidirectionnel	✓					
Chargeur de batterie bidirectionnel	✓	✓				
Chargeur de batterie bidirectionnel utilisant l'inverseur de moteur	✓	✓	✓			
Chargeur de batterie bidirectionnel utilisant l'inverseur du moteur et le enroulement de la machine électrique	✓	✓	✓	✓		
Chargeur de batterie bidirectionnel utilisant des convertisseurs modulaires multiniveaux	✓	✓	✓	✓	✓	
Chargeur de batterie basé sur le transfert de puissance sans contact	✓	✓				✓

Tableau 5 Spécifications et topologies d'électronique de puissance proposées (les numéros 1 à 6 font référence aux spécifications de l'électronique de puissance des stations de recharge des VE présentées dans la section 3.1 et la coche signifie que la topologie d'électronique de puissance proposée est conforme à la spécification correspondante).

Le tableau 5 rappelle les spécifications des chargeurs de VE présentées dans la section 3.1 et présente la conformité entre ces spécifications et les chargeurs de VE présentés.

### V/ Chargement intelligent et atténuation de l'impact sur le réseau électrique

À mesure que le parc de véhicules électriques s'agrandit, les besoins en énergie électrique deviennent cruciaux, en particulier pendant les périodes de pointe. La recharge des véhicules électriques aura un impact considérable sur la stabilité du réseau électrique. En outre, il sera nécessaire de répondre à la demande d'un nombre important et croissant de clients en termes de disponibilité des stations de charge et d'exigences de charge (heure de début, puissance et SOC souhaité). Dans ce qui suit, l'impact des chargeurs de VE sur les systèmes électriques est discuté. Ensuite, trois stratégies

de charge sont présentées et analysées de manière critique, à savoir la charge non contrôlable des VE, la charge à double tarification des VE et la charge intelligente des VE. Cette revue critique met en évidence la pertinence du contrôle adaptatif et de la gestion intelligente de l'énergie des stations de charge qui peuvent intégrer des ressources énergétiques distribuées (DER) et des systèmes de stockage d'énergie (ESS).

#### V.1/ Stratégies de recharge

Dans plusieurs pays, en raison des incitations gouvernementales à opter pour une mobilité verte, une augmentation annuelle significative des ventes de VE est attendue dans les années à venir. Les activités de charge non coordonnées et aléatoires d'un grand nombre de VE pourraient exercer une forte pression sur le système de distribution, entraînant plusieurs types de problèmes techniques et économiques. Ces problèmes comprennent une répartition sous-optimale de la production, d'énormes fluctuations de tension, une dégradation de l'efficacité et de l'économie du système, et une augmentation de la probabilité de pannes de courant dues à la congestion du réseau.

##### V.1.1/ Chargement incontrôlé et double tarification des VE

La recharge automatique implique que les propriétaires de VE commencent à charger la batterie dès que le véhicule est branché à un port de recharge, en supposant que le coût de l'électricité est le même tout au long de la journée. Contrairement à la charge ordinaire, dans le cas de la charge à double tarification, les utilisateurs chargent leur véhicule en fonction du prix de l'électricité. Les modèles de tarification actuels varient en fonction du temps d'utilisation (TOU) que le service public a fixé pour différentes tranches horaires. Il s'agit généralement de règles simples, comme les tarifs de jour et de nuit, qui visent à contrôler les pics de demande. Actuellement, en raison de la faible pénétration des VE dans le secteur des transports, aucune stratégie de charge spécifique n'est appliquée (charge non contrôlée) ou une stratégie passive est mise en œuvre. Parmi les stratégies passives, la plus courante est la charge en heures creuses, qui constitue une incitation économique à charger les véhicules électriques pendant la nuit. Toutefois, cette solution présente l'inconvénient d'augmenter brusquement la demande d'électricité, car tous les processus de charge des véhicules démarreraient presque simultanément. Par conséquent, avec l'augmentation de la mobilité électrique, il sera obligatoire de développer des stratégies de charge intelligentes pour soulager les systèmes de transmission et de distribution d'électricité et garantir des avantages économiques aux propriétaires de VE, aux agrégateurs et aux opérateurs de réseau. Afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie de double charge, des tests ont été effectués sur un échantillon de 1% de la population berlinoise, soit 16 000 conducteurs avec des trajets quotidiens spécifiques (domicile-travail et domicile-études) pour éliminer toute irrégularité. La ville de Berlin a été divisée en quatre parties (HUB1 à HUB4), chacune intégrant une courbe de charge de base correspondant à

une zone urbaine typique (résidentielle, industrielle ou commerciale) avec des puissances maximales autorisées de 9 MW, 4,4 MW, 8 MW et 8,2 MW, respectivement. La capacité maximale de la batterie disponible de chaque VE est supposée être de 10 kWh. Selon les résultats obtenus pour la stratégie de charge muette, la consommation d'énergie présente des pics typiques le matin (à l'arrivée au travail) et le soir (au retour à la maison). Pour la stratégie de double tarification, on a remarqué que les pics de demande d'énergie sont toujours présents malgré le changement du moment de sur-tarification, car les utilisateurs sont influencés par le prix de l'électricité. Cela signifie que, bien que les utilisateurs soient effectivement sensibles au signal du prix, cette stratégie ne fait que déplacer le pic de consommation sans le lisser dans le temps. L'adoption d'un processus de tarification intelligente est donc une condition essentielle pour éviter l'augmentation de la demande de pointe en électricité.

### V.1.2/ Stations de charge intelligentes

La charge intelligente désigne toute technologie qui optimise la charge ou la décharge d'un véhicule électrique en gérant la puissance de charge du véhicule de manière efficace, flexible et rentable. La recharge intelligente permet d'atténuer les problèmes liés à la congestion du réseau en remodelant la courbe de demande d'énergie pour remplir les vallées de recharge et supprimer les pics de puissance, comme le montre la figure 17. Elle optimise également l'intégration des énergies renouvelables qui sont généralement intermittentes, réduisant ainsi les coûts énergétiques liés à la recharge tout en contribuant à un transport plus durable. De plus, pour tirer profit de l'énergie renouvelable excédentaire, une station de recharge peut être équipée d'un système de stockage d'énergie. Les technologies de stockage d'énergie les plus courantes sont : le stockage électrochimique (batteries), le stockage chimique (production et stockage d'hydrogène) et le stockage mécanique (volants d'inertie). Ces systèmes de stockage d'énergie offrent de nombreux avantages, comme le stockage d'énergie pendant les périodes creuses ou lorsque la production d'énergie renouvelable est élevée. Ils peuvent fonctionner comme des générateurs de secours pendant les pannes de courant ou en mode îloté.

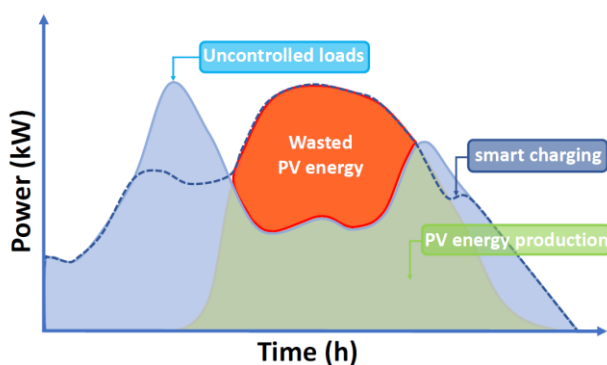


Figure 17 Profil de consommation d'une flotte de véhicules électriques pendant une journée de travail, avec et sans recharge intelligente, en tenant compte de l'intégration des énergies renouvelables.

La gestion du processus de charge en termes de programmation temporelle et de profil de puissance permettra non seulement de limiter les problèmes potentiels, mais aussi d'ouvrir de nouvelles perspectives. Cela peut être réalisé par l'utilisation de la technologie V2G (véhicule-to-grid). L'utilisation de la capacité de charge des véhicules électriques peut contribuer aux services auxiliaires, notamment en maintenant la fréquence et la tension aux niveaux requis, en contrôlant les risques de congestion et en gérant l'équilibre demande/production. L'utilisation du V2G favorise également l'intégration d'une production d'énergie renouvelable (SER) plus intermittente. Cette technologie est d'autant plus prometteuse que les véhicules électriques sont stationnés la plupart du temps. Connectés au réseau, les VE sont disponibles pour fournir de l'énergie au réseau et être rechargés avant de reprendre la route. Cependant, la mise en œuvre du concept V2G présente plusieurs défis. En effet, le système de gestion de l'énergie doit pouvoir communiquer avec les opérateurs/fournisseurs d'électricité et la flotte de VE afin de fournir la quantité d'énergie nécessaire pour répondre à la demande de services auxiliaires tout en respectant les exigences de charge du client. Il est primordial de noter qu'avec cette méthode, la dégradation des batteries des VE est accélérée en raison du nombre élevé de cycles de charge/décharge. Il est donc nécessaire de programmer de manière optimale le V2G en tenant compte des aspects techniques et économiques. En outre, il est crucial de disposer d'un échange d'informations automatisé et normalisé entre les véhicules et les opérateurs de prise. À cet égard, différents protocoles de communication sont utilisés : ISO/IEC 15,118 concerne la communication entre un véhicule électrique et la station de recharge, tandis que IEC 61,850 concerne la communication entre la station de recharge et le fournisseur d'énergie. Il existe plusieurs obstacles qui rendent ces systèmes de gestion de l'énergie pour les stations de recharge difficiles à mettre en œuvre, notamment :

- Le coût élevé de l'infrastructure de recharge, y compris les technologies de l'information et de la communication.
- La recharge intelligente exige que les véhicules électriques soient stationnés pendant de longues périodes afin que le système puisse contrôler et programmer efficacement le flux d'énergie. Ce type de condition est pertinent dans des endroits spécifiques tels que les stations de travail et les stations de recharge commerciales et n'est pas adapté aux autoroutes où les clients ne sont pas censés rester pendant de longues périodes.

### V.2/ Impact des chargeurs de VE sur le système électrique et méthodes d'atténuation

Le chargeur de VE de niveau 1 a l'avantage d'avoir un impact minimal sur le réseau électrique. Cependant, les chargeurs de niveau 2 et 3 augmentent la demande de puissance localement, ce qui peut avoir un impact

important sur la stabilité du réseau. En outre, étant donné que l'électronique de puissance non linéaire est considérablement impliquée, les chargeurs de VE induisent des perturbations de la qualité de l'énergie (PQ). Ces problèmes de qualité de l'énergie comprennent des pertes accrues dans les transformateurs de distribution, une distorsion harmonique, une déviation de la fréquence et de la tension, et une contrainte thermique excessive sur les câbles, les dispositifs de protection des commutateurs et les transformateurs. Ces perturbations peuvent être atténuées par l'utilisation de chargeurs à QP élevé et de chargeurs intelligents. De plus, les chargeurs de VE entraînent une augmentation des pertes du réseau puisque la valeur efficace des courants de la ligne de transmission et le contenu harmonique augmentent.

Pour surmonter ces problèmes, plusieurs mesures peuvent être mises en œuvre. En effet, la charge coordonnée des VE devrait soulager le système électrique et réduire les écarts de tension et de fréquence. Un comptage intelligent décentralisé peut être incorporé afin de garantir l'équilibre entre l'offre et la demande. En outre, pour réduire les harmoniques des courants de ligne, des techniques PWM à haute fréquence sont nécessaires, et des convertisseurs MMC et matriciels peuvent être utilisés. Enfin, l'utilisation de ressources énergétiques renouvelables (RES) et de dispositifs de stockage d'énergie au niveau des stations de charge peut atténuer de manière significative l'impact de la charge des VE sur le réseau électrique. Un exemple d'utilisation d'un système photovoltaïque et d'un système de stockage d'énergie hybride composé de batteries et d'un volant d'inertie pour une gestion optimale de l'énergie dans une station de recharge de VE est illustré à la figure 18.

Les principales avancées futures en matière de recharge des VE sont les suivantes :

- Le développement de chargeurs embarqués à haute tension (jusqu'à 1000 V DC) pour diminuer le temps de charge et réduire les courants de ligne et, par conséquent, pour réduire la contrainte thermique sur les composants du système de distribution.
- La charge optimale et coordonnée des VE pour soulager le réseau électrique et la mise en œuvre des concepts V2G et V2V, qui peuvent permettre de réduire la congestion du réseau et de diminuer la facture de charge des propriétaires de VE.
- Développement de chargeurs WPT à haut rendement.
- Utilisation de semi-conducteurs à large bande interdite, qui se caractérisent par une densité de puissance plus élevée, un meilleur rendement et une contrainte thermique moindre.
- Déploiement de l'hydrogène pour le stockage des énergies renouvelables et son utilisation massive dans le secteur des transports. Cet aspect est largement discuté dans la littérature et est illustré dans la figure 19.

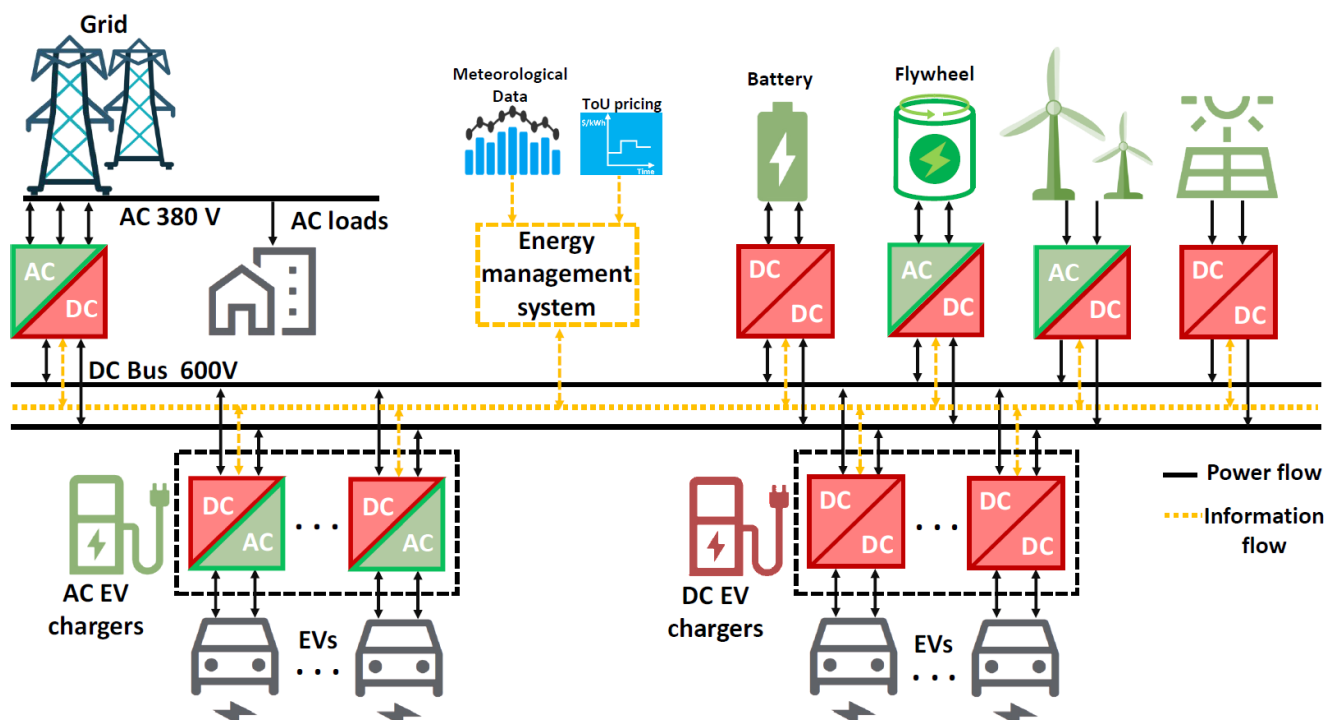


Figure 18 Station de recharge intelligente composée d'énergies renouvelables et des systèmes de stockage d'énergie (ESS).

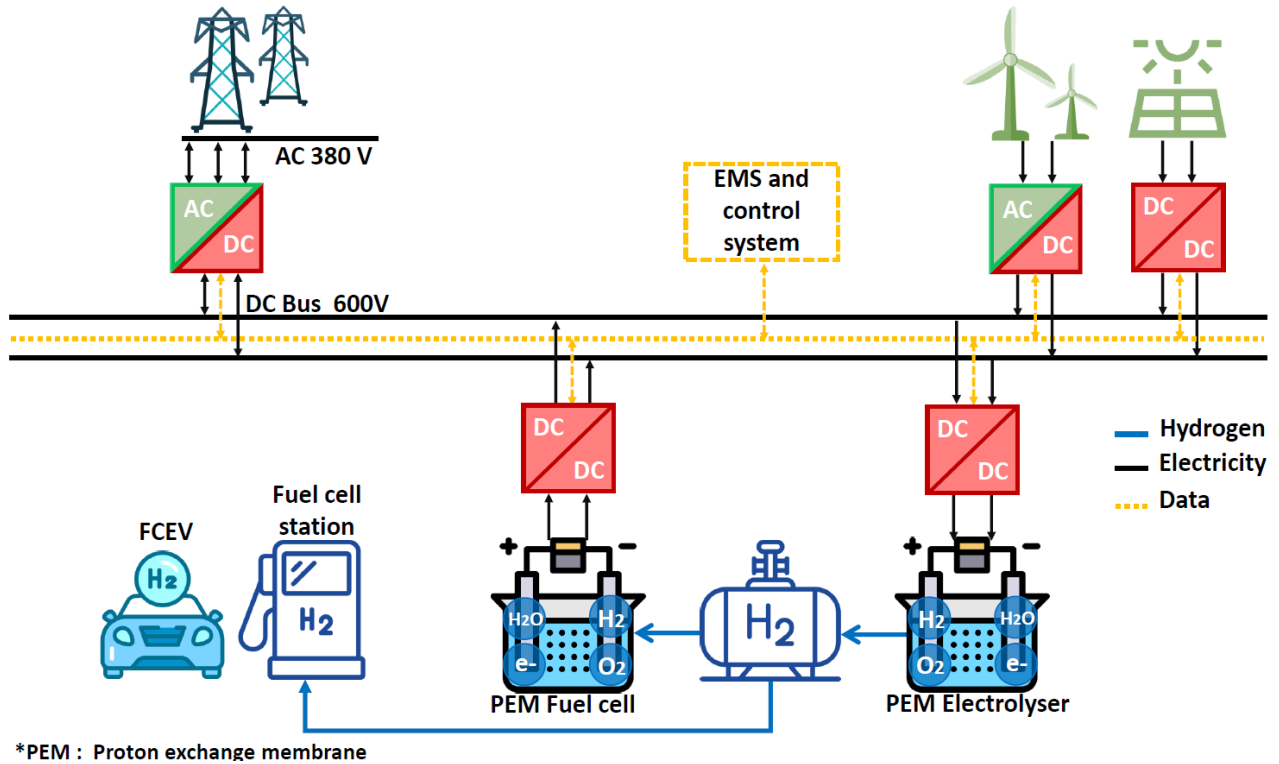


Figure 19 Production, stockage et utilisation d'hydrogène vert.

**VI/ Conclusions**

Le présent document a passé en revue l'état actuel des technologies des véhicules électriques, y compris les HEV, PHEV, BEV et FCEV, ainsi que les composants associés de l'électronique de puissance et des systèmes de conversion d'énergie. Les cycles de conduite WLTP ont été utilisés pour déterminer les besoins en puissance et en énergie d'un véhicule spécifique. Ensuite, les véhicules à moteur à combustion interne conventionnels, les véhicules hybrides et les véhicules entièrement électriques sont présentés et discutés. Sur la base des spécifications des chargeurs de VE, différents chargeurs de batterie embarqués et non embarqués ont été brièvement présentés et discutés. Plus précisément, les chargeurs embarqués intégrés offrent la possibilité d'optimiser l'utilisation des convertisseurs de puissance de traction/propulsion et des enroulements des moteurs, mais ils sont longs à recharger complètement les batteries des VE. D'autre part, les chargeurs hors-bord sont des chargeurs de grande puissance qui nécessitent quelques minutes pour recharger les batteries des VE jusqu'à 80 % de leur état de charge (SOC). Malheureusement, l'utilisation massive de ces équipements pourrait avoir un impact négatif sur le réseau électrique et provoquer des perturbations de la qualité du service. Pour surmonter ce problème, une solution consiste à intégrer des ressources énergétiques distribuées et des systèmes de stockage d'énergie au niveau des stations de recharge. De plus, la charge coordonnée et bien planifiée des flottes de VE est nécessaire pour atténuer l'impact sur le réseau de distribution sans mettre à niveau le réseau électrique. Enfin, la mise en œuvre des technologies V2G et V2V

est nécessaire pour tirer parti de ces systèmes de stockage d'énergie distribués.

**VII/ Bibliographie**

Cet article est une traduction et adaptation de : Electric Vehicle Traction Drives and Charging Station Power Electronics: Current Status and Challenges, Authors : Youssef AMRY, Elhoussin ELBOUCHIKHI, Franck LE GALL, Mounir GHOGHO, Soumia EL-HANI August 2022 in Energies MDPI. La bibliographie complète qui supporte le présent article 3EI est disponible sur le lien :

<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/16/6037>

# IMAGERIE DU SEIN PAR RESEAUX DE NEURONES CONVOLUTIONNELS EN CASCADE A PARTIR DE DONNEES CONJOINTES MICRO-ONDES ET ULTRASONS

VALENTIN NOEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Doctorant en imagerie médicale au laboratoire SATIE de l'ENS Paris Saclay, [valentin.noel1@ens-paris-saclay.fr](mailto:valentin.noel1@ens-paris-saclay.fr)

**Résumé :** Dans le contexte de la caractérisation précoce des tumeurs du sein, il est intéressant de combiner les modalités électromagnétiques (EM) et ultrasonores (US), car elles sont toutes deux non ionisantes et peu coûteuses, et offrent des caractéristiques de résolution complémentaires. Nous proposons ici une nouvelle structure de réseau neuronal convolutif (CNN), appelée réseau neuronal complexe en cascade tenant compte de la structure (SACC-CNN). Il se compose de deux parties, le réseau de reconstruction (SARNet) et le réseau de classification (SACNet). Le SACNet produit la carte des types de tissus qui est ensuite transmise au SARNet, qui reconstruit les paramètres EM et US. Ces deux parties peuvent être considérées comme deux modules indépendants. Une fonction de perte guidée par la physique est mise en œuvre dans le réseau SARNet pour améliorer la similarité structurelle. Les principales caractéristiques de ces approches, illustrées par des simulations, sont décrites.

**Mots clés :** imagerie du sein, électromagnétique, ultrasons, fusion de données, réseaux neuronaux convolutifs en cascade

## I/ Introduction

Les tumeurs mammaires font partie des tumeurs les plus courantes chez les femmes et leur détection précoce est essentielle à un stade précoce de la progression du cancer [1]. Le développement de technologies permettant d'imager une petite tumeur à faible coût et à faible risque est donc une question importante. Actuellement, la mammographie à rayons X reste l'approche la plus étendue pour cette détection. Malgré la haute résolution des résultats d'imagerie, la mammographie à rayons X présente un certain nombre de limites, notamment une faible sensibilité, des rayonnements ionisants, l'inconfort dû à la compression du sein et une détection très affectée par la densité du sein. La fusion de données multimodales (données ultrasonores et électromagnétiques) complémentaires a été étudiée [2]. Cependant, l'inversion conjointe est une autre façon de fusionner les données où celles-ci sont inversées simultanément. La similarité structurelle peut également être utilisée afin de combiner les paramètres de différentes modalités dans la procédure d'inversion [3]. Les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) peuvent être une bonne solution. À titre d'exemple, parmi beaucoup d'autres, dans [4], une structure CNN est conçue pour utiliser les champs mesurés comme entrée et prédire directement la carte de diffusion. Les réseaux de pointe pour la détection de tumeurs et/ou la reconstruction d'images du sein comprennent le réseau U-Net et certaines de ses extensions développées dans [5], ainsi que les réseaux de neurones artificiels (ANN) présentés dans [6]. Ce type de méthodes peut fournir des résultats de reconstruction en temps réel tout en tirant peu de profit des connaissances physiques disponibles.

C'est pourquoi on s'intéresse de plus en plus à la construction de réseaux de neurones afin qu'ils bénéficient de la physique du problème à résoudre. Dans ce contexte, plusieurs travaux se déroulant dans un cadre physique différent ont mis en œuvre des réseaux neuronaux inspirés de la physique (Physics-Inspired Neural Network ou PINN). Les efforts se sont principalement concentrés sur la conception d'un cadre physique qui peut être traduit de différentes manières. Dans l'imagerie du sein, il faut reconstruire l'image du sein et avant tout classer ses composants en tant que tissus avec ou sans tumeur. Des travaux antérieurs ont illustré différentes approches pour résoudre un tel problème, certaines avec l'apprentissage profond. A notre connaissance, aucun de ces réseaux n'a été inspiré/guidé par la physique de ce même problème malgré le fait qu'ils soient clairement bénéfiques à la qualité de la reconstruction et/ou de la classification. Dans cette contribution, on s'intéresse particulièrement à la précision de l'image du sein reconstruite et surtout à la similarité structurelle entre l'image du sein et la vérité terrain. En effet, une amélioration de la similarité structurelle entre l'image du sein et la vérité terrain devrait indiquer une amélioration de la qualité de l'image par rapport aux structures internes existantes du sein ainsi qu'une amélioration concernant la fiabilité du diagnostic par le biais d'une amélioration de la fiabilité de sa physique. Le réseau neuronal doit donc être configuré de manière à favoriser une reconstruction maximisant la similarité structurelle de l'image reconstruite. A partir d'un réseau de neurones multi-tâches développé précédemment, deux approches visant à améliorer la signification physique susmentionnée sont proposées. Le réseau ainsi développé est un réseau

neuronal multi-tâches en cascade influencé par la physique (plus précisément, avec une fonction de coût comportant des contraintes physiques inhérentes au problème étudié), composé d'un réseau neuronal principal divisé en deux réseaux neuronaux secondaires, comme illustré dans la figure Fig.1. Les entrées de ce réseau correspondant aux parties réelles et imaginaires de trois modalités différentes : ondes EM (1 Gz), ondes US (100 et 200 kHz).

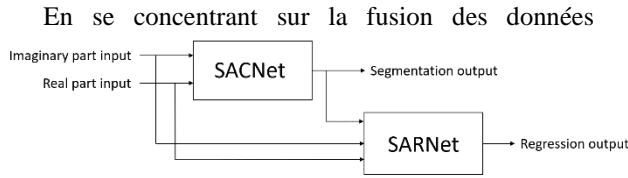


Figure 1 : Schéma de l'architecture du réseau SACC-CNN

électromagnétiques (EM) et ultrasonores (US), un cadre de réseau neuronal convolutif complexe en cascade à double flux avec « conscience structurelle » est proposé ici. Dans les expériences numériques, on suppose qu'il s'agit d'un sein en suspens - contrairement au sein compressé de la mammographie à rayons X - immergé dans un milieu de couplage non limité. La contribution est organisée comme suit. Dans la section II, la modélisation est présentée. Dans la section III, la structure du réseau est esquissée. Dans la section IV, des expériences numériques sur des fantômes de seins sont proposées. La conclusion est la section V. Notez que les travaux récents sur l'imagerie du sein et la fusion de données par les collègues mentionnés précédemment [7] ont été illustrés sur des fantômes mammaires et des ensembles de données comme ceux d'aujourd'hui, mais le passage à un CNN sur mesure contraste avec ces recherches antérieures.

**II/ Modélisation électromagnétique et ultrasonore**

Une géométrie bidimensionnelle est considérée, les matériaux de type fluide supportant uniquement les ondes de compression dans le cas US, tandis que le cas EM est concerné uniquement par la polarisation magnétique transversale.

Les ondes harmoniques temporelles sont supposées avec une dépendance temporelle  $\exp(-i\omega t)$  pour les US et les EM. Le sein est situé dans un domaine d'intérêt (DoI)  $\mathcal{D}$ . Le milieu de fond connu a une permittivité relative complexe de  $\epsilon_b$ , une perméabilité de  $\mu_b$  et, en conséquence, un nombre d'onde de  $k_b^{EM} = \omega \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_b \mu_b}$  en EM, une vitesse du son de  $c_b$ , atténuation  $\alpha_b$ , et nombre d'onde  $k_b^{AC} = \omega/c_b + \alpha_b$  en US. La perméabilité et la densité sont constantes partout. Les distributions spatiales de la permittivité relative complexe  $\epsilon_r(r) = \epsilon'_r(r) + i\epsilon''_r(r)$  de la vitesse du son  $c(r)$  et de l'atténuation  $\alpha(r)$  sont les inconnues. Pour chaque modalité,  $N_i$  sondes sont situées à  $r'_v$ ,  $v = 1, 2, \dots, N_i$  sur un cercle  $\mathcal{S}$ , comme l'indique la figure 2.

Chacune illumine la DoI et les champs diffusés sont collectés par tous.

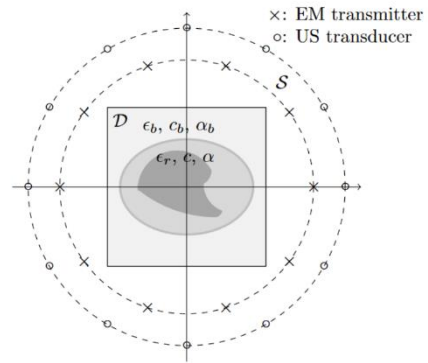


Figure 2 : Schéma de la configuration

Pour travailler numériquement avec ce modèle,  $\mathcal{D}$  est discrétisé en  $M = H \times W$  petits pixels carrés centrés sur  $m = 1, 2, \dots, M$ , dont la taille est différente entre le problème direct (acquisition des données) et le problème inverse (sondage du sein).

Les contrastes US et EM sont définis comme suit

$$\chi^{AC}(r) = \frac{(k^{ac}(r))^2 - (k_b^{ac})^2}{(k_b^{ac})^2}$$

$$\chi^{EM}(r) = \frac{(k^{em}(r))^2 - (k_b^{em})^2}{(k_b^{em})^2}$$

et la source de contraste pour l'incidence  $v$  comme suit

$$J_v(r) = \chi(r) F_v^t(r)$$

avec  $F$  champ de pression  $P$  ou champ électrique  $E$ . L'exposant "t" indique le champ total.

**III/ Approche du problème réseau de neurones convolutionnel**

La tâche principale est de renforcer la similarité structurelle (cohérence entre la structure de l'image reconstruite et celle de la vérité terrain – la structure peut être dans ce cas considérée comme correspondant aux contours de l'image de référence) de l'image, il est donc intéressant de comparer d'abord une structure CNN spécialisée non cascadée avec une entrée multi-flux et une stratégie d'apprentissage multi-tâches (CNN-MM) avec sa version cascadée (SACC-CNN) qui prend plus en compte la structure morphologique de l'objet basée sur la segmentation, puis de définir un réseau à fonction de coût guidé par la physique (PG SACC-CNN) guidant vers une meilleure similarité structurelle (et donc vers une physique plus réaliste).

**III.1/ Architectures des réseaux de neurones**

Comme indiqué, la structure du CNN-MM est inspirée d'un CNN à deux flux (similaire au CNN représenté dans la figure Fig.4). Dans le présent travail, des données EM à une seule fréquence et des données US à deux fréquences sont utilisées.

Pour introduire la connaissance physique, l'entrée du réseau choisie est la source de contraste et la quantité de champ  $\omega$  et  $f$ . Ces variables se trouvent à l'intérieur du

DoI et sont obtenues par rétropropagation. Remarquez que dans les méthodes de rétropropagation, un paramètre complexe est utilisé pour minimiser l'erreur quadratique dans le champ diffusé, ici ce paramètre de rétroprojection spécifique EM normalisé est simplement fixé à 1.

Pour chaque modalité à une fréquence donnée,  $\omega_v$  et  $f_v$  sont remodelés en images  $H \times W$  et permettront de limiter la longue corrélation au niveau des données et également de rendre le réseau efficace avec moins de couches ou avec des tailles de noyau plus petites. Les  $R\{\omega_v\}$ ,  $I\{\omega_v\}$ ,  $R\{f_v\}$  et  $I\{f_v\}$  (parties réelles et imaginaires de la source de contraste et de la quantité de champ) obtenus à partir de toutes les incidences sont séparés en entrée partie imaginaire et entrée partie réelle avec une taille de  $H \times W \times 4N_i$ . Pour réaliser la reconstruction, le réseau SARNet a une sortie de taille  $H \times W \times 4$  pour prédire les paramètres EM  $\epsilon'_r$  et  $\epsilon''_r$  (perméabilités relatives complexes), et les paramètres US  $c$  et  $\alpha$  (vitesse dans le milieu et atténuation) simultanément.

Outre la tâche de régression, un classificateur auxiliaire (SACNet) est introduit pour fournir une image de segmentation. Un classificateur softmax donne la distribution de probabilité sur les classes de sortie prédites (types de tissus et arrière-plan) pour chaque pixel et ledit pixel est classé dans la classe ayant le score le plus élevé. Cette tâche de segmentation est tout à fait pertinente pour la tâche de régression. Cet apprentissage multitâche peut faciliter la formation du réseau et améliorer sa capacité de généralisation. Un autre intérêt s'ajoute, puisque, toujours dans l'objectif d'alimenter le réseau en connaissances physiques, la sortie de la classification pourrait informer la reconstruction et donc potentiellement augmenter sa qualité. Une telle architecture est l'architecture dite en cascade esquissée dans les Fig.2, 3 et 4. Le CNN en cascade résultant est composé de deux blocs principaux, l'un étant le premier CNN en charge de la classification dont la sortie est directement entrée dans le second, en charge de la reconstruction. Ici, BN correspond à Batch Normalization.

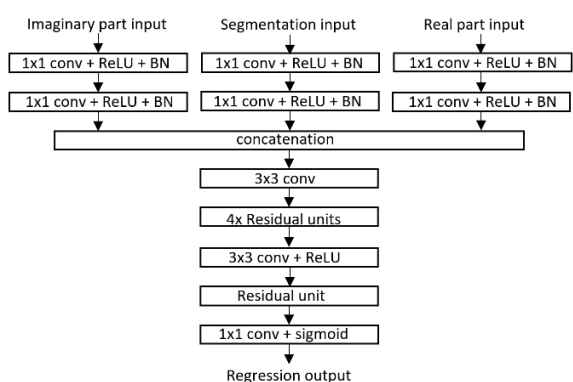


Figure 3 : Schéma de l'architecture du sous-réseau SARNet

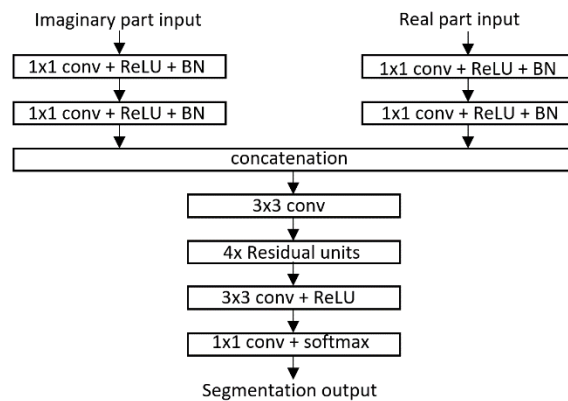


Figure 4 : Schéma de l'architecture du sous-réseau SACNet

### III.2/ Fonction de coût

Les réseaux considérés, c'est-à-dire CNN-MM et SACC-CNN (guidé par la physique), utilisent des fonctions de perte différentes. La fonction de perte pour la tâche de régression dans CNN-MM est choisie comme la moyenne de l'erreur absolue et de l'erreur au carré, comme suit

$$L_{reg} = \frac{1}{2NHW} \sum_n \sum_{h,w} \left( |\widehat{\zeta}_{h,w}^n - \zeta_{h,w}^n| + |\widehat{\zeta}_{h,w}^n - \zeta_{h,w}^n|^2 \right)$$

pour le paramètre  $\zeta$ , où  $\widehat{\zeta}_{h,w}^n$  est la valeur prédite du  $n$ -ième échantillon situé à  $(h,w)$  et  $\zeta_{h,w}^n$  est la vérité terrain.  $N$  est le nombre d'échantillons dans un lot d'apprentissage. Pour le SARNet, la même fonction de perte a d'abord été utilisée. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre "Physique", une fonction de perte peut être ajustée et utilisée comme guide physique pour la tâche d'apprentissage d'un réseau. Dans ce contexte précis, il serait particulièrement intéressant d'entraîner le SARNet de telle sorte qu'il se concentre sur la similarité structurelle entre l'ensemble d'entraînement et leurs vérités de base afin d'améliorer la définition des contours (internes et externes) reconstruits.

Dans cette optique, une métrique SSIM (Structural Similarity Index Metric) est mise en œuvre dans la fonction de perte guidée par la physique proposée pour comparer la similarité structurelle de l'image complète et de la vérité terrain (respectivement désignées par  $x$  et  $y$ ), avec

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1) + (2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}$$

dans laquelle  $\mu_x$  et  $\mu_y$  sont des moyennes locales des images,  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  sont des écarts types locaux,  $\sigma_{xy}$  est une covariance croisée locale, et  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes de régularisation. D'autres implémentations, par exemple une fenêtre glissante SSIM de plus petite taille, pourraient hypothétiquement donner une meilleure granularité à la similarité structurelle. En conséquence, cette connaissance conduit à la nouvelle fonction de perte

$$L_{regnew} = L_{reg} + \beta(1 - SSIM(x, y))$$



$\beta$  étant un terme de régularisation réglé à chaque époque par le biais d'un algorithme Hyperband tel que présenté dans [9]. Cette fonction de perte donnera donc la priorité à la similarité structurelle plutôt qu'à l'erreur quadratique.

Dans la tâche de segmentation, chaque pixel est classé dans un type de tissu ou un milieu de fond. Le classificateur Softmax est utilisé pour ce problème de classification multi-classes. La fonction de perte est l'entropie croisée comme suit

$$L_{seg} = -\frac{1}{NHW} \sum_n \sum_{h,w} \sum_k t_{h,w;k}^n \log(s_{h,w;k}^n)$$

en laissant  $t_{h,w;k}^n$  et  $s_{h,w;k}^n$  la vérité de terrain et la probabilité prédite du pixel pour la classe  $k$ .

#### IV/ Simulations numériques

Dans cette section, des simulations numériques sont effectuées pour évaluer les performances des réseaux conçus dans la section précédente.

##### IV.1/ Configuration des expérimentations et set de données

Les réseaux sont entraînés et testés avec des fantômes de seins réalistes disponibles dans le référentiel en ligne de l'UWCEM (University of Wisconsin Cross-Disciplinary Electromagnetics Laboratory) [10]. La composition du sein varie d'une personne à l'autre et les fantômes du référentiel sont classés en quatre classes en fonction de la densité radiographique : tissu presque entièrement gras, tissu fibroglandulaire épars, sein à densité hétérogène et tissu extrêmement dense.

Comme les seins denses présentent un risque plus élevé de cancers, les fantômes de seins classés dans les deux dernières classes, appelées classes 3 et 4, sont utilisés pour générer l'ensemble de données. Ceux-ci étant exempts de tumeurs, une tumeur artificielle est ajoutée dans la partie glandulaire avec une localisation aléatoire. Sa taille est fixée de manière aléatoire avec un rayon compris entre 6 mm et 8 mm pour ajouter de la variabilité.

Dans les simulations, pour le cas EM, 20 antennes sont disposées uniformément sur un cercle de rayon 0,1 m, fonctionnant comme des sources et des récepteurs idéaux simultanément à une seule fréquence 1 GHz. Pour le cas américain, 64 transducteurs fonctionnent à 100 et 200 kHz sur un cercle de 0,12 m de rayon. La DoI pour la simulation a une résolution de 0,5 mm, comme indiqué dans le référentiel, ce qui implique 300 × 300 pixels. Les champs diffus sont obtenus en résolvant le problème avant. Les calculs correspondants sont exécutés dans Matlab.

L'augmentation des données (opérations géométriques sur les données d'entraînement afin d'augmenter leur nombre) est utilisée pour élargir l'ensemble des données. Différents niveaux de bruit sont ajoutés aux champs diffusés, de 15 dB à 30 dB au-dessus du SNR moyen. La DoI est discrétisée en

75 × 75 pixels pour calculer les données d'entrée  $\omega$  et  $f$ . L'image du type de tissu et la distribution des paramètres EM et US avec la même discrétisation sont utilisées comme sortie. Une rotation et un retournement sont effectués sur l'entrée et la sortie d'un échantillon pour générer de nouvelles données. L'ensemble des données contient 2 920 d'échantillons, dont 1 536 d'échantillons de la classe 3 et 1 384 de la classe 4, divisés ensuite en un ensemble d'apprentissage de 2 336 échantillons et un ensemble de test de 584 échantillons.

Les plages de normalisation des paramètres sont de [1,70], [0,30], [1450,1650] et [0,5] pour  $\epsilon'_r$ ,  $\epsilon''_r$ ,  $c$  et  $\alpha$ , respectivement. Ici, l'atténuation à 200 kHz est prédite. Dans la tâche de segmentation, les pixels sont classés en six catégories selon le type de tissu indiqué dans le référentiel, à savoir le tissu de fond, la peau, la graisse, le tissu de transition, le tissu glandulaire et le tissu tumoral.

##### IV.2/ Détails d'implémentation

Tous les réseaux sont implémentés dans Keras avec le backend Tensorflow, exécutés sur un ordinateur portable avec un CPU NVIDIA Quadro P620. Les poids des pertes de segmentation et de régression sont fixés à 1 et 8, respectivement. La régularisation  $L_2$  est choisie pour tous les réseaux avec un paramètre de régularisation  $\gamma = 0.01$ . Les poids dans les couches convolutionnelles sont initialisés par l'initialisation de Xavier. Les réseaux sont entraînés avec le solveur ADAM avec un taux d'apprentissage initial de  $5e^{-4}$  qui décroît avec un facteur de 0,15 toutes les 10 époques. La taille du lot est de 10 et 60 époques sont exécutées au total.

Tous les réseaux sont entraînés sur le même set de données d'entraînement avec la même configuration. Pour les réseaux en cascade, chaque sous-réseau a été entraîné avec le jeu de données de base correspondant.

Il est à noter que différents jeux de données ont été testés sur les deux réseaux afin de quantifier leur efficacité de calcul, ce que nous aborderons à la fin de la partie évaluation quantitative.

##### IV.3/ Evaluation quantitative

La performance du réseau est évaluée par deux mesures pour différentes tâches. Pour la segmentation, l'Intersection-sur-Union (IoU) pour la classe  $i$  est calculée comme suit

$$IoU_i = \frac{1}{N} \sum_n \frac{p_{ii}^n + 1}{\sum_{k=1}^K p_{ik}^n + \sum_{k=1}^K p_{ki}^n - p_{ii}^n + 1}$$

où  $p_{ik}^n$  est le nombre de pixels dans l'échantillon de test  $n$  étiqueté comme classe  $i$  mais prédit dans la classe  $k$ , et  $K$  est le nombre de classes. Notez que, dans le calcul, un nombre de lissage de 1 est utilisé. Pour la régression, l'erreur relative est utilisée pour l'évaluation.

Les évaluations quantitatives, IoU, Err et SSIM sur l'ensemble de test sont données dans les tableaux Tab. 1, 2 et 3 respectivement. Pour fournir de meilleures comparaisons, un CNN inspiré de [11] appelé Res-Net 50, basé sur un modèle U-Net utilisant des connexions

par saut, a également été implémenté, car il a donné de bons résultats pour la reconstruction d'images.

Network	Medium	Skin	Fat	Transition	Gland	Tumor	Average
Res-Net	0.9972	0.8361	0.8635	<b>0.4221</b>	0.6779	0.7089	0.7533
CNN-MM	0.9948	0.8341	0.8604	0.4192	0.6768	0.7151	0.7511
SACC-CNN	0.9967	0.8358	0.8621	0.4200	0.6781	0.7165	0.7529
PG-SACC-CNN	<b>0.9989</b>	<b>0.8379</b>	<b>0.8660</b>	0.4219	<b>0.6798</b>	<b>0.7183</b>	<b>0.7545</b>

Tableau 1 : IoU obtenue par les différents réseaux sur les données de test

Network	Medium	Skin	Fat	Transition	Gland	Tumor	Average
Res-Net	0.997	0.836	0.863	<b>0.422</b>	0.678	0.709	0.753
CNN-MM	0.995	0.834	0.860	0.419	0.677	0.715	0.751
SACC-CNN	0.997	0.836	0.862	0.420	0.678	0.717	0.753
PG-SACC-CNN	<b>0.999</b>	<b>0.838</b>	<b>0.866</b>	<b>0.422</b>	<b>0.680</b>	<b>0.718</b>	<b>0.755</b>

Tableau 2 : Précision obtenue par les différents réseaux sur les données de test

Network	mean-SSIM	lowest SSIM	highest SSIM
Res-Net	0.796	0.504	0.892
CNN-MM	0.723	<b>0.512</b>	0.875
SACC-CNN	0.771	0.510	0.882
PG-SACC-CNN	<b>0.810</b>	0.511	<b>0.903</b>

Tableau 3 : Similarité structurelle obtenue par les différents réseaux entre les images reconstruites et leurs vérités terrain

De l'évaluation quantitative, on peut voir que le SAC Cascaded CNN pour reconstruire le type de tissu et la valeur du paramètre fonctionne le mieux sur l'ensemble de test. Le SACC-CNN guidé par la physique surpasse aussi légèrement le SACC-CNN dans la classification et la reconstruction. Il faut noter que les résultats SSIM montrés ici sont les SSIM moyens de l'ensemble du jeu d'essai et comprennent de fortes variations avec au moins une aberration correspondant au SSIM le plus bas rapporté dans le tableau Tab.3.

On peut conclure qu'un SACC-CNN n'est que légèrement plus performant sur ce jeu de données qu'un CNN-MM, tandis qu'un SACC-CNN guidé par la physique est modérément plus performant que les deux et est plus performant que le Res-Net pour la partie reconstruction, tout en menant à des résultats légèrement meilleurs, mais pas de manière significative, pour la partie classification. Il est possible d'obtenir une reconstruction en temps réel. En moyenne, avec l'implémentation de la transformation de Fourier rapide, les données d'entrée du réseau peuvent être calculées en 0,5681 secondes et il faut 0,2718 secondes pour obtenir les résultats de prédiction d'un échantillon sur un CPU Intel Core i7 10875H (2,30 GHz).

## V/ Conclusion

En vue de l'imagerie mammaire en temps réel, une structure cascadiée guidée par la physique a été proposée pour combiner les données EM et US. Outre la tâche de régression pour prédire les valeurs des paramètres, un classificateur auxiliaire est utilisé pour classer chaque pixel afin de réaliser la segmentation du modèle. L'architecture en cascade améliore la similarité structurelle de l'image fournie, tandis que la mise en œuvre d'une fonction de perte guidée par la physique

réduit l'erreur sur les valeurs des paramètres prédits et améliore la similarité structurelle de l'image.

Il est cependant possible d'imaginer de nombreuses fonctions de perte guidées par la physique pour les problèmes de diffusion inverse, et il est nécessaire d'étudier leur complémentarité afin de créer une fonction de perte guidée par la physique menant à un meilleur apprentissage.

## Références bibliographiques

- [1] G. Baldassarre and B. Belletti, "Molecular biology of breast tumors and prognosis," *F1000Research*, vol. 5, 2016
- [2] Y. Qin, T. Rodet, M. Lambert, and D. Lesselier, "Microwave breast imaging with prior ultrasound information," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 472–482, 2020.
- [3] L. A. Gallardo and M. A. Meju, "Joint two-dimensional DC resistivity and seismic travel time inversion with cross-gradients constraints," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 109, no. B3, 2004
- [4] P. Ran, Y. Qin, D. Lesselier, and M. Serhir, "Subwavelength microstructure probing by binary-specialized methods: Contrast source and convolutional neural networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 2, pp. 1030–1039, 2021
- [5] G. Du, X. Cao, J. Liang, X. Chen, and Y. Zhan, "Medical image segmentation based on u-net: A review," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 20508–1, 2020.
- [6] M. Ambrosanio, S. Franceschini, V. Pascazio, and F. Baselice, "Microwave breast imaging via neural networks for almost real-time applications," *arXiv preprint arXiv:2103.12522*, 2021.
- [7] Y. Qin, T. Rodet, M. Lambert, and D. Lesselier, "Joint inversion of electromagnetic and acoustic data with edge-preserving regularization for breast imaging," *IEEE Transactions on Computational Imaging*, vol. 7, pp. 349–360, 2021
- [8] Y. Qin, T. Rodet, M. Lambert, and D. Lesselier, "Microwave breast imaging with prior ultrasound information," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 472–482, 2020
- [9] L. Li, K. Jamieson, G. DeSalvo, A. Rostamizadeh, and A. Talwalkar "Hyperband: A novel bandit-based approach to hyperparameter optimization," *The Journal of Machine Learning Research*, vol. 18, no. 1, pp. 6765–6816, 2017
- [10] E. Zastrow, S. Davis, M. Lazebnik, F. Kelcz, B. Van Veen, and S. Hagness, "Database of 3D grid-based numerical breast phantoms for use in

computational electromagnetics simulations,” tech. rep., Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin-Madison, 2008.

- [11] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (Las Vegas, United States), pp. 770–778, 2016

## WORD EMBEDDING – LES MOTS ET LE MACHINE LEARNING

SASA RADOSAVLJEVIC<sup>1</sup>, SOLAL NATHAN<sup>2</sup>

1 : élève du département Nikola Tesla de l'ENS Paris-Saclay, actuellement en M2 SETI  
[sasa.radosavljevic@ens-paris-saclay.fr](mailto:sasa.radosavljevic@ens-paris-saclay.fr)

2 : élève du département Nikola Tesla de l'ENS Paris-Saclay, doctorant au LISN (Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique) sur le sujet "Job Recommender Systems : An Optimal Transport Approach".  
[solal.nathan@ens-paris-saclay.fr](mailto:solal.nathan@ens-paris-saclay.fr)

**Résumé :** Cet article introduit des méthodes de représentation des mots dans l'informatique au travers d'un premier exemple simple utilisant l'occurrence des mots dans un corpus de textes puis d'un exemple utilisant Word2Vec qui regroupe un ensemble de réseaux de neurones pour l'apprentissage de vectorisation des mots afin d'opérer sur ceux-ci. Une attention particulière sera faite quant aux biais introduits par rapport aux données d'apprentissage)

### I/ Introduction

Il existe de nombreux moyens de représenter les données. Le Machine Learning s'intéresse notamment à exploiter et analyser toutes les données possibles. Les données tabulaires sont les plus simples à représenter et à analyser informatiquement. Les images peuvent être traitées presque directement par réseau de neurones [1]. Certaines données sont cependant plus difficiles à traiter : les données temporelles [2] ou le texte par exemple. Les données textuelles ont pourtant une importance majeure car elles sont disponibles en très grandes quantités et sont une manière très compacte de transmettre de l'information, permettant de créer des bases de données beaucoup plus denses. Nous avons également accès à des données historiques beaucoup plus anciennes et variées que pour d'autres médias comme la vidéo.

Pour traiter les données textuelles il nous faut donc une représentation mathématique plus simple. Le word embedding (ou plongement lexical en français) est un ensemble de techniques permettant de transformer un mot ou ensemble de mot sous forme de vecteur.

Il s'agit en réalité d'une forme intelligente de réduction de dimensionnalité. En effet, gérer des données de grandes dimensions est très difficile à cause du « fléau de la dimension » (ou curse of dimensionality en anglais).

#### Comment créer et définir ces vecteurs de nombres réels à partir de simples mots ?

Une façon de faire est la représentation en fonction du contexte. Effectivement, les mots chat et chien seront souvent utilisés dans le même contexte, c'est-à-dire les mots qui entourent le mot cible. On parlera souvent d'un chat et d'un chien comme d'un animal de compagnie, une boule de poils. Placés dans la phrase : « Tu as beaucoup de chance d'avoir ce \_\_\_ comme animal de compagnie. » les deux mots pouvant prendre place à l'emplacement vide, ils seront alors tout deux représentés par des valeurs proches. Quid des autres animaux ? Un perroquet ne ressemble pas du tout à un

chat. C'est tout à fait viable pour d'autres animaux de compagnie. Cependant, la fréquence d'apparition de ceux-ci dans ce contexte est moins importante, diminuant la ressemblance des mots dans cette représentation vectorielle. C'est ainsi qu'avec un corpus de texte et de contexte très étoffé que les représentations seront plus ou moins précises après l'apprentissage du modèle.

#### Pourquoi est-ce important ?

Imaginez-vous opérer avec des nombres. Nous avons tous appris à l'école à faire des additions et des soustractions pour des tâches quotidiennes. Plus tard, vous avez appris à modifier l'amplitude d'un signal ou à soustraire des niveaux de couleurs à une image. Essayez de faire pareil avec des mots et cela devient tout de suite plus compliqué, surtout informatiquement. Avec une représentation vectorielle bien construite, il devient possible d'effectuer ces opérations. Par exemple, papa - homme + femme = maman, semble plutôt logique.

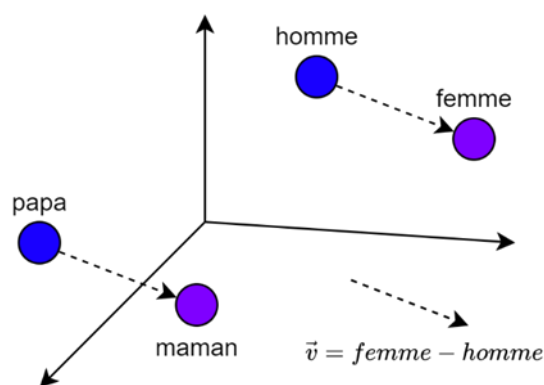


Figure 1 : Représentation vectorielle simplifiée

Cela reste cependant très complexe à mettre en place dans un algorithme. La capacité d'apprentissage automatique de la machine à l'aide de réseaux de neurones et la quantité importante de données présentes en ligne permet de faciliter cette représentation vectorielle.

## II/ Différentes méthodes

Afin de réaliser le word embedding, différentes méthodes et approches existent. Avant de voir ces différentes méthodes, il faut parler du Bag of words (BOW) ou Sac de mots. La représentation par BOW permet de décrire un document, dans notre cas un texte. Le modèle BOW vient compter l'occurrence de mots dans un texte et ainsi donner son histogramme. De cette manière, le résultat de la vectorisation sera impacté par l'histogramme des mots présents dans le corpus d'apprentissage.

### Question 1 :

A l'aide d'internet, décrivez une méthode de prédiction de mot utilisant l'histogramme d'occurrence.

### Réponse 1 [3][4] :

Dans le modèle Continuous Bag of Words (CBOW), l'objectif de l'apprentissage est de combiner la représentation vectorielle des mots du contexte (mots entourant le mot à prédire) afin de prédire le mot manquant.

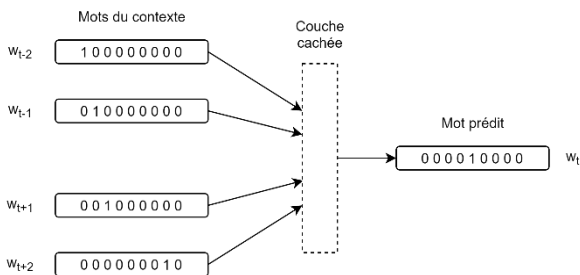


Figure 2 : Modèle CBOW

Dans le modèle Skip-gram à l'inverse, on va chercher à partir d'un mot observé, les mots de son contexte.

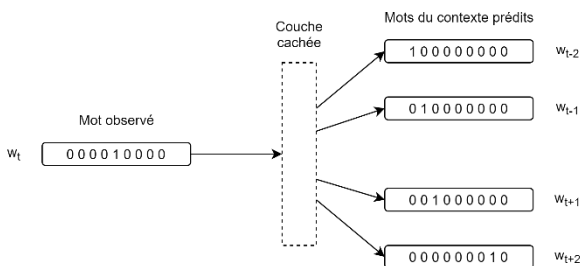


Figure 3 : Modèle Skip-gram

## III/ Première approche

Commençons par prendre plusieurs phrases (1) qui vont composer notre corpus et construire notre dictionnaire de mots.

```
document_1 = "le chat mange la souris"
document_2 = "le chien regarde le canard"
document_3 = "le canard regarde le chat"

corpus = (document_1, document_2, document_3)
```

### III.1/ Création du dictionnaire

On vient créer un dictionnaire de mots uniques qui va nous permettre de compter l'occurrence des mots.

```
# construction du vocabulaire
vocabulary = []
for d in corpus:
    for w in d.split(" "):
        if w not in vocabulary:
            vocabulary.append(w)
```

### III.2/ Calcul de l'histogramme

La manière la plus simple de visualiser l'occurrence ou la fréquence d'informations est l'histogramme. Pour ce faire, nous utiliserons les modules `matplotlib.pyplot` et `pandas` :

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
...
# initialisation de l'histogramme
freq = dict()
for v in vocabulary:
    freq[v] = 0
```

### Question 2 :

Compléter le code précédent pour afficher l'histogramme des mots du corpus.

### Réponse 2 :

```
# comptage des occurrences
for d in corpus:
    for w in d.split(" "):
        freq[w] += 1

print(freq)
df = pd.DataFrame({'freq':freq.values()},
index=freq.keys())
ax = df.plot.bar(rot=0)
plt.show()
```

Qui nous donne le résultat suivant :

```
{'le': 5, 'chat': 2, 'mange': 1, 'la': 1, 'souris': 1, 'chien': 1, 'regarde': 2, 'canard': 2}
```

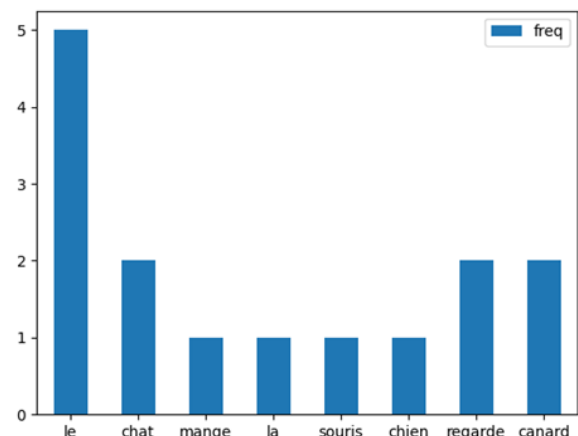


Figure 4 : Histogramme du corpus (1)

Plusieurs problèmes se posent avec une telle représentation. D'une part, on perd l'information sur l'ordre des mots et d'autre part, les mots tels que « le » et « la » vont être poussés vers le dessus alors qu'ils ne possèdent pas d'information sémantique.

### III.3/ Bag-of-words

Pour pallier ces premiers problèmes, on vectorise les phrases avec un histogramme par phrase (ou par texte) tout en gardant le vocabulaire entier présent dans le corpus.

```
# calcul d'un histogramme par document
import numpy as np

V = len(vocabulary)
D = len(corpus)
tf_idf = np.zeros([D, V])

for i, d in enumerate(corpus):
    for w in d.split(" "):
        j = vocabulary.index(w)
        tf_idf[i, j] += 1
print(tf_idf)
```

Résultat :

```
[[1. 1. 1. 1. 0. 0. 0.]
 [2. 0. 0. 0. 0. 1. 1. 1.]
 [2. 1. 0. 0. 0. 0. 1. 1.]]
```

Ce modèle est appelé sac de mots ou Bag-of-words (BOW). Ce modèle ne corrige pas tous les problèmes notamment car il n'y a toujours pas d'information sur l'ordre des mots. Les phrases « Le chat regarde le chien » et « Le chien regarde le chat » auront un vecteur identique. BOW n'apprend pas le sens des mots. En ce sens, la distance des vecteurs ne représente pas forcément la différence de sens.

## IV/ Word2Vec

Word2Vec est un groupe de réseaux de neurones avec relativement peu de couches cachées (~2) qui vectorise les mots dans un espace de « faible » dimension. Il implémente en particulier les modèles *CBOW* et *Skip-grams* vus en II/Réponse 1.

On utilisera Word2Vec à l'aide de la bibliothèque Python **Gensim** [5] :

```
pip install gensim
```

### IV.1/ Entraînement d'un modèle simple

En commençant par l'importation du modèle Word2vec, on peut, à partir d'un certain corpus de phrases et de textes, entraîner le modèle sur nos données.

```
from gensim.models import Word2Vec
```

Pour utiliser des données pour l'entraînement, il faut au préalable les mettre en forme correctement. Reprenons le corpus en III/ la mise en forme de la première phrase pour l'apprentissage ressemble à ceci :

```
p_1 = ["le", "chat", "mange", "la", "souris"]
```

Vient alors le paramétrage de l'entraînement :

```
model = Word2Vec(min_count=1, vector_size=5)
```

où de nombreux paramètres sont disponibles. Dans cet exemple, seuls les paramètres `min_count` (ignore les mots dont l'occurrence est moindre que le nombre) et `vector_size` (dimension des vecteurs) sont utilisés pour une utilisation simplifiée. Le détail des paramètres peut être trouvé ici.

La création du dictionnaire ne nécessite qu'une fonction :

```
model.build_vocab(corpus)
```

Puis l'entraînement :

```
model.train(corpus,
            total_examples=model.corpus_count,
            epochs=model.epochs)
```

On peut maintenant visualiser la représentation vectorielle du mot « chat » de dimension 5 avec l'objet `wv` qui contient la transposition entre mot et vecteur :

```
print(model.wv['chat'])
print(model.wv['souris'])
```

Résultat :

```
[-0.036320 0.057531 0.019837 -0.16570 -0.188976]
[-0.068111 -0.018929 0.115377 -0.150441 -0.078726]
```

et regarder les deux mots les plus proches.

```
print(model.wv.most_similar(positive=['chat'],
                             topn=3))
```

Résultat :

```
[('souris', 0.76687), ('canard', 0.61786), ('la', 0.54855)]
```

On remarque alors le premier souci d'avoir un faible jeu de données : la proximité des mots dans une phrases et l'occurrence des autres mots du corpus. De cette manière, le mot « chien » qui serait en réalité plus proche de « chat » que ne l'est « canard » ne se trouve pas dans les mots les plus similaires.

Il existe de nombreux modèles déjà entraînés avec différents datasets disponibles en ligne et qui sont présents dans l'API **gensim.downloader**.

### IV.2/ Utilisation d'un modèle pré-entraîné

Cette fois-ci, on utilise l'API qui propose un modèle entraîné à partir du dataset de Google News contenant environ 3 millions de mots en anglais très majoritairement.

```
import gensim.downloader as api
wv = api.load('word2vec-google-news-300')
```

Gensim propose quelques méthodes de traitement de mots. On peut regarder quelques mots présents dans le dictionnaire.

```
# Affichage de quelques mots du vocabulaire
for index, word in
    enumerate(wv.index_to_key):
        if index == 5:
            break
        print(f"word
#{index}/{len(wv.index_to_key)} is {word}")
```

**Résultat :**

```
word #0/3000000 is </s>
word #1/3000000 is in
word #2/3000000 is for
word #3/3000000 is that
word #4/3000000 is is
```

Les méthodes proposées par Gensim utilisent directement la représentation vectorielle des mots. Pour cela, il faut convertir les mots.

```
# Conversion du mot en vecteur
vec_king = wv['king']
```

Le vecteur étant assez volumineux, il n'est pas important de regarder son contenu.

L'outil le simple est l'évaluation de la similarité entre les mots. Pour cela, on utilise la fonction `similarity()`.

```
# Similarité entre des paires de mots
pairs = [
    ('wood', 'pine'),
    ('wood', 'leaf'),
    ('wood', 'plank')
]
for w1, w2 in pairs:
    print('%r\t%r\tSimilarité : %.2f' % (w1,
w2, wv.similarity(w1, w2)))
```

**Résultat :**

```
'wood' 'pine' Similarité : 0.59
'wood' 'leaf' Similarité : 0.30
'wood' 'plank' Similarité : 0.26
```

Ou encore les mots les plus proches d'un mot cible avec `most_similar()`.

```
# N mots les plus proches du mot cible
print(wv.most_similar(positive=['wood'],
topn=3))
print(wv.most_similar(positive=['bois'],
topn=3))
```

**Résultat :**

```
[('lumber', 0.678), ('timber', 0.662), ('softwoods', 0.649)]
[('fleur', 0.682), ('jardin', 0.661), ("c'est_le", 0.651)]
```

La limite est alors d'une part dans le corpus de mots utilisé pour l'apprentissage du modèle et d'autre part la langue d'apprentissage. Le résultat pour les mots proches de 'bois' donne l'idée que le modèle peut fonctionner pour une autre langue mais connaissant les mots proches de 'bois', on se rend compte qu'il n'est pas très précis.

L'outil sur les similarités peut être poussé à l'utilisation pour trouver un mot intru dans un ensemble de mots avec `doesnt_match()`.

```
print(wv.doesnt_match(['wood', 'oak', 'tree',
'iron', 'leaf']))
```

**Résultat :**

```
Iron
```

**Question 3 :**

En utilisant la conversion de mots en vecteurs et la fonction de similarité `most_similar()`, proposer un code permettant de réaliser l'opération de l'introduction : `papa – homme + femme = maman`.

**Réponse 3 :**

```
# Opérations sur les mots
vec_father = wv['father']
vec_man = wv['man']
vec_woman = wv['woman']

result = wv.most_similar(positive=(vec_father
- vec_man + vec_woman), topn=1)
print(result)
```

**Résultat :**

```
[('mother', 0.8671472072601318)]
```

Il existe également des petits jeux sur le web intégrant le word embedding tels que [semantle.com](http://semantle.com) ou [word2vec.danielfrg.com](http://word2vec.danielfrg.com).

**V/ Conclusion**

Nous avons exploré différentes méthodes simples pour effectuer des plongements de mots. Il en existe bien sûr des plus complexes, souvent à base de deep learning comme BERT qui est souvent utilisé pour cet usage.

Le word embedding est souvent la première brique nécessaire pour le Natural Language Processing (NLP) ou Traitement Automatique du Language (TAL) en français. C'est une étape de préprocessing nécessaire et importante car elle pose les fondations sur lesquelles on va venir construire nos algorithmes.

Les applications du Word Embedding et du NLP sont nombreuses comme la traduction automatique, la détection d'émotion, la génération de texte, la réponse aux questions, les chatbots et bien d'autres.

Comme toutes les applications à grande échelles et surtout en machine learning, il faut cependant faire attention. On travaille souvent avec des données qui peuvent contenir des biais. Par exemple, après la sortie de Word2Vec on s'est rendu compte que l'algorithme reproduisait un biais sexiste qu'il avait appris dans les données. Si on lui pose la question « médecin – homme + femme » il nous réponds « infirmière ». Heureusement, une partie importante du machine learning aujourd'hui s'intéresse à l'équité et l'explicabilité des algorithmes pour essayer d'améliorer la situation plutôt que de reproduire des biais appris.

**Bibliographie**

- [1] Valentin Noël, Séries temporelles et réseaux de neurones récurrents  
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/14762/14762-series-temporelles-et-reseaux-de-neurones-recurrents-ensps.pdf>
- [2] Olivier Tourvieille, Apprentissage supervisé – Comportement aérien d’un drone  
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/14545/14545-apprentissage-supervise-comportement-aerien-dun-drone-ensps.pdf>
- [3] Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. arXiv <https://arxiv.org/abs/1301.3781>
- [4] Mikolov, T., Sutskever, I., Chen, K., Corrado, G., and Dean, J., “Distributed Representations of Words and Phrases and their Compositionality”. arXiv <https://arxiv.org/abs/1310.4546>
- [5] Radim Řehůřek, Word2vec embeddings  
<https://radimrehurek.com/gensim/models/word2vec.html>

*Les différents programmes sont disponibles sur le dépôt Git :*

[https://gitea.auro.re/otthorn/TP\\_WordEmbedding](https://gitea.auro.re/otthorn/TP_WordEmbedding)





## Appel à communication

La 5<sup>ème</sup> édition du Symposium de Génie Électrique SGE 2023 sera organisée par le Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (L2EP) sur le Campus de la cité Scientifique de Villeneuve d'Ascq. Comme lors des précédentes éditions (Cachan - 2014, Grenoble -2016, Nancy - 2018 et Nantes -2021), SGE2023 sera l'occasion de réunir les spécialistes francophones, universitaires et industriels, du génie électrique afin de présenter leurs derniers travaux et de discuter des récentes avancées dans le domaine de la conversion et du traitement de l'énergie, du matériau au système en passant par les composants. Aux habituelles sessions dédiées aux divers progrès des développements expérimentaux et des méthodes de modélisation seront associées des séances consacrées aux applications industrielles avancées.

## Thèmes Développés

- Matériaux magnétiques
- Matériaux actifs et phénomènes couplés
- Matériaux isolants, diélectriques, conducteurs et supraconducteurs
- Composants de l'électronique de puissance
- Intégration de puissance, assemblage et packaging
- Architectures de convertisseurs statiques
- Dispositifs électromagnétiques et actionneurs spéciaux
- Système de conversion de l'énergie (architecture et commande)
- Gestion et stockage de l'énergie
- Réseaux électriques (production, transport, distribution, protection ...)
- Micro-réseaux, multi-sources, multi-énergies
- Sûreté de fonctionnement : fiabilité, vieillissement, diagnostic et systèmes tolérants
- Méthodes et méthodologies en génie électrique
- Systèmes de pile à combustible et électrolyseurs
- E-Mobilité
- Eco-conception, recyclabilité et économie circulaire en génie électrique

## Exhibitions

Les organisateurs prévoient des démonstrations de matériels, d'équipements et de logiciels. De plus amples informations seront disponibles sur le site du symposium.

## Dates et Soumissions

Les contributions écrites, les présentations et les discussions s'effectueront préférentiellement en français. Néanmoins, l'anglais sera également accepté. Les résumés, en accord avec les thèmes du symposium, doivent mettre en avant l'originalité, les nouveaux résultats scientifiques, méthodologiques ou technologiques des travaux sans excéder 2 pages – 2 colonnes (texte, équations et figures). Ils seront à soumettre au format PDF sur le site du symposium.

Les auteurs des résumés acceptés seront invités à soumettre des versions étendues de leurs communications, de 4 à 6 pages au même format. Les résumés comme les versions étendues seront évalués par des pairs.

Les formats seront disponibles sur le site du symposium.

- 7 novembre 2022 : ouverture des soumissions
- 15 janvier 2023 : clôture des soumissions
- 20 mars 2023 : réponse aux auteurs
- 2 mai 2023 : ouverture des inscriptions
- 21 mai 2023: dépôt des versions étendues

## Actes

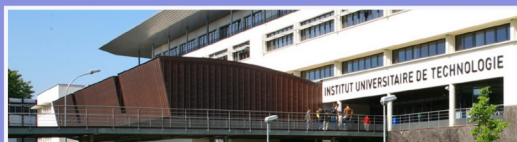
Les actes du symposium avec l'ensemble des versions étendues des communications seront disponibles à tous les participants.

## Contact

Laboratoire L2EP - ULR 2697  
Université de Lille, Bâtiment ESPRIT  
Avenue Henri Poincaré, 59655 Villeneuve d'Ascq  
Courriel : [sge2023@sciencesconf.org](mailto:sge2023@sciencesconf.org)

[sge2023.sciencesconf.org](http://sge2023.sciencesconf.org)

Université de LILLE  
Cité Scientifique  
Villeneuve d'Ascq



# Abonnez-vous à la

La REE est une publication trimestrielle de la SEE

# REE

REVUE DE  
L'ÉLECTRICITÉ  
ET DE  
L'ÉLECTRONIQUE

## Choisissez votre formule d'abonnement pour 2022:



### Version papier

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

France & UE	Hors UE
<input type="checkbox"/> 125 € TTC	<input type="checkbox"/> 142,43 € HT*



### Version numérique

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

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"/> 171,81 € HT*

### Votre adhésion à la SEE

<input type="checkbox"/> Standard	<input type="checkbox"/> Retraité	<input type="checkbox"/> Enseignant	<input type="checkbox"/> Jeune actif (< 35 ans)	<input type="checkbox"/> Etudiant	<input type="checkbox"/> En recherche d'emploi
125 € TTC			65 € TTC		15 € TTC

### + Votre abonnement REE (Tarif réservé aux adhérents, version papier)

France & UE : 63 € TTC       Hors UE : 81,70 € HT\*

TVA de la revue REE : 2,1 %. Adhésion collective possible via des conventions de partenariat - Contactez-nous à : [sg@see.asso.fr](mailto:sg@see.asso.fr)  
\* Prix final incluant des frais de transports de 20 €

### Adresse de livraison

Nom\* :

Prénom\* :

Adresse\* :

Code postal\* :  Pays\* :

Ville\* :

Tél.\* :

e-mail\* :

\*Obligatoire

### Adresse de facturation (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

### Votre règlement

Je règle la somme de  €

par  Chèque à l'ordre de la SEE

Virement après réception de la facture

Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard)

N° Carte

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

e-mail\* :

Date\*  Signature\* et cachet si il y a lieu :

\*Obligatoire

BULLETIN À COMPLÉTER ET RENVOYER À : SEE - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75116 Paris - France  
Tél. +33(0)1 56 90 37 17 - [abo@see.asso.fr](mailto:abo@see.asso.fr)

**ABONNEMENT PLUS RAPIDE: [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)**

Je consens à recevoir les autres diffusions de la SEE & de ses activités (congrès, soirées débats, revues, etc.) qui sont extérieures aux diffusions liées 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 75116 Paris ou par le formulaire de contact du site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr). Offre valable du 01/10/2021 au 30/09/2022 dans la limite des quantités disponibles.



