

# La Revue



# SEEI

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



*Numéro spécial :  
Le génie électrique,  
moteur  
d'innovation pour  
les Forces Armées  
et leurs hommes*



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





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

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16

Tél : 01 56 90 37 09

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 75783 PARIS Cedex 16</p> <p><b>Directeur de la publication</b> François GERIN Président de la SEE</p> <p><b>Rédacteur en Chef</b> Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : <a href="mailto:revue3ei@gmail.com">revue3ei@gmail.com</a> ou sur le site <a href="https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique">https://www.see.asso.fr/3ei_rubrique</a> "soumettre un article"</p> <p><b>Communication</b> M. Jacques HORVILLEUR <a href="mailto:communication@see.asso.fr">communication@see.asso.fr</a> 01 56 90 37 09</p> <p><b>Promotion et Abonnements</b> (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2018. Tél : 01 56 90 37 09 <a href="mailto:abo@see.asso.fr">abo@see.asso.fr</a></p> <p>tarifs TTC : (revue papier + num)</p> <p><b>Individuel :</b> France et UE ..... 42 € Pays hors UE..... 53 €</p> <p><b>Institutionnel :</b> France et UE ..... 60 € Pays hors UE..... 75 €</p> <p><b>Au numéro :</b> France et UE ..... 12 €</p> <p><b>Impression :</b> JOUVE 53100 Mayenne 11 bd de Sébastopol - 75027 Paris Cédex 1 - Tel : 01 44 76 54 40 Couv. : O.P. : All. – TFR : 0 – C. : PEFC Corp. : O.P. : Esp. – TFR : 0 – C. : PEFC</p> <p><b>Dépôt Légal : Octobre 2018</b></p> <p>Commission Paritaire 1222 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p><b>Sommaire du n° 94</b></p> <p><b>Numéro spécial : Le Génie Electrique, moteur d'innovation pour les Forces Armées et leur hommes</b></p> <p>p. 2 Editoriaux,</p> <p>p.8 Gestion de L'Energie Electrique Embarquée (G3E) sur les plateformes militaires terrestres (PMT) Jose Domingo SALVANY      Responsable R&amp;T - NEXTER Electronics</p> <p>p.10 Electrification des Aéronefs Les Technologies Clés      Serge ROQUES<sup>1</sup> - Olivier GOSSSELIN<sup>2</sup> Expert Emérite : SAFRAN ELECTRICAL &amp; POWER Expert Emérite : SAFRAN R&amp;T et INNOVATION</p> <p>p.12 Les racks compacts et modulaires, futur de l'avionique embarquée Bastien PUERTOLAS      Latécoère</p> <p>p.16 Vers un tracteur agricole tout électrique. Présentation et dimensionnement énergétique du « tracteur vert » Daniel MATT<sup>1</sup>, Nadhem BOUBAKER<sup>2</sup>, Patrice RIOU<sup>3</sup> (1). Institut d'Electronique et des Système, UMR CNRS 5214, Université de Montpellier. (2). Safran Electrical &amp; Power UK, Pitstone. (3). Institut Mines-Télécom, Alès.</p> <p>p.18 Le moteur de propulsion électrique du futur Aymen AMMAR      JEUMONT Electric, Jeumont</p> <p>p.20 Développement d'une machine asynchrone double alimentation de rapport 1 : présentation des travaux et discussions autour de cette architecture. Sylvain GUEMARD, Laurent CASSIN      EN MOTEURS, Couëron, France</p> <p>p.22 Etat de l'art de l'hybridation du système de propulsion des hélicoptères Marc GAZZINO      Airbus Helicopters</p> <p>p.25 Applications duales des actionneurs piézoélectriques amplifiés Frank CLAEYSSSEN et son équipe      Cedrat Technologies S.A</p> <p>p.28 Actionneur en environnement haute température Régis MEURET<sup>1</sup>, Laurent GUILBAUD<sup>2</sup>, Bruno ALLARD<sup>3</sup>, Daniel ROGER<sup>4</sup> 1 Safran 2 THALES CAP Bretagne 3 Laboratoire Ampere 4 LSEE – FSA BETHUNE</p> <p>p.31 Propulsion MagnétoHydroDynamique (MHD) en eau de mer Jean-Paul THIBAULT      Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP</p> <p>p.34 Moteurs et générateurs supraconducteurs Jean LEVEQUE, Kévin BERGER, Thierry LUBIN et Bruno DOUINE      GREEN</p> <p>p.36 La roue de Grenoble, un instrument unique pour une technologie originale : le moteur linéaire Gerard COQUERY      TACV, Sao-Paulo, Brésil ; IFSTTAR, France</p> <p>p.39 Micro-hybridation de turboréacteur : la solution à réductance variable Alexandre GIRAUD, Ioav RAMOS, Bertrand NOGAREDE      NOVATEM SAS</p> <p>p.41 Les lanceurs à rail pour applications de défense Philippe DELMOTE, François BIETH, Markus SCHNEIDER      ISL, France</p> <p>p.43 Générateur XRAM à 1MJ en tant qu'alimentation impulsionnelle des lanceurs à rails Oliver LIEBFRIED, Volker BROMMER      ISL, France</p>
---	--

p.45	<i>HySPàC : la structure de recherche du CNRS sur l'hydrogène-énergie</i> Christophe COUTANCEAU <sup>1</sup> , Fermin CUEVAS <sup>2</sup> , Daniel HISSEL <sup>3</sup> , Christophe TURPIN <sup>4</sup> , Olivier JOUBERT <sup>5</sup> 1 IC2MP, Poitiers 2 Université Paris Est 3 Institut FEMTO-ST 4 LAPLACE 5 Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), Université de Nantes	
p.48	<i>De l'hydrogène-énergie pour la mobilité lourde</i> Application au banc d'essais mobile ECCE et à la traction ferroviaire Daniel HISSEL*, Michel AMIET** * Univ. Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST ** DGA	
p.51	<i>La pile à combustible : une alternative aux systèmes d'énergie embarqués actuels, fiable et écologique</i>	SAFRAN
p.53	<i>Les piles à combustibles pour la mobilité terrestre</i> Joel DANROC	Deputy Manager CEA DRT
p.55	<i>La révolution dans les accumulateurs</i> M. MORCRETTE <sup>1,2,3</sup> <sup>1</sup> LRCS CNRS UMR7314 <sup>2</sup> RS2E CNRS <sup>3</sup> ALISTORE-ERI CNRS	
p.57	<i>STELLA – Système énergétique innovant pour la recharge des véhicules électriques</i> Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMENT, hongwei WU	UTC
p.59	<i>L'électronique de puissance clef du développement de l'Industrie du futur</i> Olivier COULON	DECISION Etudes & Conseil
p.61	<i>Amortissement actif d'un convertisseur à découpage DC/DC</i> Fabien ROCHER, Bruno CARVES-BIDEAUX	MBDA, Le Plessis Robinson
p.63	<i>Les MOSFET SiC dans les applications de puissance en 2018</i> Stéphane de La FOURNIERE	CIRTEM
p.66	<i>Bilan et perspectives des composants de puissance à grand gap</i> Dominique PLANSON, Hervé MOREL et Michel AMIET,	Laboratoire Ampère
p.68	<i>Le diamant : matériau pour l'électronique du futur</i> Jocelyn ACHARD <sup>1</sup> , David EON <sup>2</sup> , Karine ISOIRD <sup>3</sup> (1) LSPM, Université Paris 13 (2) Institut Néel, Grenoble (3) LAAS-CNRS, Toulouse	
p.70	<i>PRIMA (PRIses Magnétiques)</i> CONSORTIUM PRIMA (comité de pilotage) – GELIBERT Stéphane, COGNARD Lise	Saint-Egrève, France
p.72	<i>Les fluides magnétorhéologiques et leurs applications</i> G. BOSSIS	Institut de Physique de Nice
p.74	<i>La supraconductivité en 2018</i> Pascal TIXADOR* Univ.	G2ELab, I. Néel, F-38000 Grenoble, France
p.76	<i>Systèmes magnétiques supraconducteurs</i> Frédéric FOREST	SIGMAPHI Vannes, France
p.78	<i>Les aimants permanents : les ressources en « terres rares » et en Néodyme dans le monde</i> Jean-Paul YONNET	G2E Lab, Grenoble
p.80	<i>PLER – Production locale d'électricité renouvelable</i> Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMENT, hongwei WU	UTC

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).

**PRESENTATION : Michel AMIET**

**Président des Journées Jeunes Chercheurs en Génie Electrique**

La Revue « 3 EI » présente un numéro spécial dédié à l'évolution du génie électrique. Ce numéro est composé de plus d'une trentaine d'articles couvrant toutes les disciplines des matériaux aux Systèmes.

Pour assurer sa position internationale et satisfaire aux besoins il est certain qu'il faut pouvoir disposer d'un potentiel humain couvrant tous les niveaux, du chercheur qui innove à l'ingénieur qui conçoit, dans tous les secteurs du génie électrique. Ce potentiel repose essentiellement sur l'intéressement de nos jeunes à cette discipline vivante mais complexe. Aussi pour ce numéro spécial « 3 EI » la parole a été donnée à des personnalités de quelques organismes : Inspection Générale de l'Education Nationale, CNRS, Universités, Ecoles d'ingénieurs, et à la Profession par le Groupement des Industriels de l'Equipement Electrique.

- **Samuel VIOLLIN**
- **Antoine de FLEURIEU**
- **Demba DIALLO**
- **François COSTA**
- **Jean-François ROUCHON**
- **Guy FRIEDRICH**

- IGEN**
- GIMELEC**
- CNRS/GdR SEEDS**
- Université Paris- Est Créteil**
- ENSEEIH**
- UTC**

**La Revue 3EI**

**Comité de publication**

- Morgan ALMANZA
- Hamid BEN AHMED
- Arnaud BRUGIER
- Jacques COURAULT
- Jean FAUCHER
- Gilles FELD
- Jean Michel GAY
- Jean-Philippe ILARY
- 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

**EDITORIAL**  
**LES FACES CACHEES DU GENIE ELECTRIQUE**

*Le vocable « Génie Electrique » est né de la Mission Interministérielle Génie Electrique initiée par le Ministre Hubert Curien, Ministre de la Recherche et de la Technologie, à laquelle participaient 4 autres Ministères et 120 experts. Monsieur Hubert CURRIEN, au travers d'une Lettre de Mission, a confié la Présidence de cette Mission à la Direction Générale de l'Armement (DGA).*

*C'est alors que le Génie Electrique est devenu un ensemble multidisciplinaire de connaissances et de techniques complémentaires où se sont associées l'électrotechnique, l'électronique de puissance et l'électrochimie, conduisant à la conception d'un SYSTEME. Cet aspect système a conduit la DGA à initier une théorie où la gestion d'un système doit prendre en compte les besoins, non plus en puissance, mais en énergie en distinguant les énergies : Permanente, Transitoire et Impulsionnelle, dite « Théorie des 3 E ». Il s'agit alors pour chacun de ces besoins d'y associer une source « ad hoc », répondant ainsi aux concepts innovants et applications nouvelles, civiles comme militaires.*

*Le génie électrique s'intègre pleinement aux axes d'actualité comme : Transition énergétique -Transports électriques et intelligents - Smart Grid - Energie de fusion - L'Homme « réparé et augmenté » - cobotique .... Ces aspects seront évoqués par des articles de ce numéro spécial « 3 EI ».*

*Dans ce cadre, le rôle de la DGA consiste à répondre aux besoins à moyen et long terme des Armées, notamment en s'assurant de la disponibilité des technologies nécessaires pour réaliser les futurs systèmes ; pour ce faire, elle soutient des travaux de R&D dans tous les domaines scientifiques et techniques dont celui du génie électrique, réalisés par des Centres de Recherche, des Laboratoires universitaires, industriels et étatiques et des industriels (PME, ETI, grands groupes), en cohérence avec les travaux réalisés par ailleurs au titre de la recherche civile et les innovations de l'industrie.*

*Les 34 articles qui suivent, rédigés par des Centres de recherche, des Laboratoires et des industriels, illustrent l'activité de la DGA dans chacun de ces grands secteurs : matériaux, électrotechnique, électronique de puissance, stockage de l'énergie électrique, électrochimie, systèmes, couvrant ainsi les besoins Air – Terre – Mer – Espace et Santé.*

*Mais, si le génie électrique est scientifiquement multidisciplinaire, c'est également un domaine qui intéresse de nombreux organismes civils et est traité par de nombreux acteurs du monde de la recherche. C'est ainsi que la DGA coopère étroitement avec les instances et organismes civils comme la DGE, la DGAC, l'ANR ; le CNRS, le CEA, les organismes représentant la profession dont le GIMELEC, l'IFSTTAR, l'ADEME et les pôles de compétitivité, mais aussi avec les organismes sous tutelle de la DGA dont l'ISL et l'ONERA.*

*Ces Centres de recherche, Instituts, Laboratoires et industriels doivent contribuer à faire face désormais à un environnement international nouveau, devenu très concurrentiel et diversifié. La place de la France sur l'échiquier reste néanmoins parmi les 5 premières nations, position qu'il est indispensable de maintenir : notre industrie française présente une balance commerciale positive et chaque année, les laboratoires universitaires accueillent un grand nombre de jeunes étrangers des 5 continents, intéressés par la formation que proposent ces laboratoires. La DGA contribue à cette formation, par le soutien de plus d'une dizaine de thèses en génie électrique et, après avoir initié, il y a 27 ans, les Journées Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE), continue à présider cette manifestation internationale, de même qu'elle préside le congrès DECIELEC qui traite des avancées remarquables en génie électrique en France. Le GIMELEC, organisateur des manifestations internationales « ELEC », lui a confié la responsabilité de « l'Espace Innovation » à Villepinte (800 m2).*

*Ce numéro décrit, au travers d'une trentaine d'articles, la participation de la DGA au développement d'une discipline prioritaire pour notre industrie. La DGA tient à remercier les auteurs de ces articles mais aussi le Comité de rédaction de la revue « 3 EI » de lui avoir accordée un numéro spécial pour pouvoir s'exprimer sur ses activités, tout en conservant l'esprit de la revue d'informer les jeunes au travers de leurs enseignants. Ce tour d'horizon sur le génie électrique du futur ne se veut ni exhaustif ni, contrairement aux numéros habituels de cette Revue, d'un niveau scientifique élevé mais revendique plutôt un rôle d'information sous forme didactique.*

- **ICA-R Michel AMIET Expert génie électrique**      **DGA Ingénierie de Projets**
- **IC Jean-Marie ARMATA .....**      **DGA Techniques Navales**
- **IC Nicolas ECHE .....**      **DGA Techniques Aéronautiques**
- **IEF Laurent GILLET .....** **DGA Ingénierie des Projets/Architecture des Systèmes Terrestres**

## **L'enseignement du génie électrique dans les établissements d'enseignement secondaire** **Samuel VIOLLIN IGEN, doyen du groupe STI**

En France, l'enseignement du génie électrique dans les lycées et plus précisément celui qui touche à l'électrotechnique, se déploie pour l'essentiel dans la voie technologique et professionnelle. Cet enseignement comme spécialité en vue d'une insertion professionnelle s'adresse aux élèves du baccalauréat professionnel MELEC (Métiers de l'Électricité et de ses Environnements connectés) et à ceux du BTS Électrotechnique. Ces formations visent à développer des compétences qui permettront aux sortants d'être employés dans le secteur du génie électrique et, bien au-delà, dans pratiquement tous les secteurs de l'industrie dès lors que les outils de production mobilisent de l'énergie électrique.

Dans la voie technologique, les élèves préparant un baccalauréat STI2D (Sciences et Techniques Industrielles et du Développement Durable) reçoivent un enseignement de génie électrique dans le tronc commun de la première et de la terminale, qui est approfondi par les élèves qui choisissent la spécialité Énergie et Environnement.

Enfin, dans les enseignements de l'option SI (Sciences de l'ingénieur) du baccalauréat S de la série générale des lycées et dans les enseignements de SI en CPGE, des contenus liés à l'énergie électrique sont abordés. Toutefois, il ne s'agit pas d'étudier les systèmes du génie électrique, mais d'avoir une approche globale en sciences de l'ingénieur qui s'intéresse aux lois et aux phénomènes. On ne peut donc pas évoquer ici une formation aux règles de l'art du génie électrique, elle se fera plus tard au cycle terminal des études d'ingénieur.

### **La formation en baccalauréat MELEC.**

Cette formation présente 16 000 candidats à l'examen du baccalauréat professionnel, avec un taux de réussite de l'ordre de 77 %<sup>1</sup>. La formation est organisée selon cinq grands domaines d'activité : préparation des opérations de réalisation, réalisation, mise en service, maintenance, communication. Ces activités se déploient dans cinq grands secteurs industriels qui sont les réseaux (production, stockage, connexion des réseaux, transport, distribution, gestion de l'énergie électrique), les infrastructures (aménagement routiers, urbains, des transports, réseaux de communications, ...), les bâtiments résidentiels, tertiaires, industriels (domotique, VDI, automatismes, équipements techniques, ...), l'industrie (distribution et gestion de l'énergie liées au procédés, équipements industriels, industries connectées et cyber-sécurisées), les quartiers, les zones d'activité, les éco-quartiers connectés et enfin les systèmes énergétiques autonomes et embarqués. À la sortie de la formation du bac pro MELEC, environ 25 % d'entre eux poursuivent en BTS Electrotechnique. Les élèves qui choisissent une intégration professionnelle au niveau 4 sont en situation d'emplois durables pour 36,1% d'entre eux sept mois après la sortie du lycée suivi en modalités scolaire.

### **La formation en STI2D**

Cette formation accueille environ 72 400 élèves au cycle terminal du lycée dont environ 15 000 en spécialité énergie et environnement (EE). Le taux de réussite au baccalauréat technologique est d'environ 90 %. Tous les élèves de STI2D reçoivent un enseignement de génie électrique en première et en terminale dans l'enseignement technologique transversal. Celui-ci analyse les systèmes, s'intéresse à la typologie des solutions constructives de l'énergie (système énergétique mono-source, système énergétique multi-source et hybride). Cet enseignement aborde l'étude des convertisseurs d'énergie, des transformateurs électriques, des moteurs électriques et des modulateurs, des solutions d'éclairages, des solutions de stockage. L'enseignement de spécialité a pour objectif de développer une culture des solutions technologiques de transport, de distribution et de conversion d'énergie. Cet enseignement approfondit une démarche de conception des systèmes, qui trouve son aboutissement en classe terminale avec le projet de spécialité. Les élèves de STI2D option EE poursuivent leurs études vers l'enseignement supérieur, en CPGE TSI, à l'université et pour environ 30 % d'entre eux en BTS électrotechnique.

### **La formation en BTS électrotechnique**

Environ 5 000 candidats présentent l'examen du BTS dans la spécialité électrotechnique. Le taux de réussite à l'examen est de 86% pour les candidats bacheliers de la voie générale ou technologique, il est de 66% pour les élèves issues de la voie professionnelle<sup>2</sup>. Les enseignements comportent des sciences physiques qui sont des sciences appliquées à l'électrotechnique. Dans l'enseignement de spécialité, les solutions constructives et leur dimensionnement sont étudiées pour les applications de conversion, de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. L'étude des systèmes s'applique également aux infrastructures, à l'habitat, aux bâtiments industriels et tertiaires. Les équipements sont largement communicants. Un enseignement d'organisation de chantier installe des compétences de pré-encadrement. Les étudiants qui choisissent une intégration professionnelle au niveau 3 sont en situation d'emplois durables pour 55,8% d'entre eux sept mois après la sortie du lycée suivi en modalités scolaire. Ces étudiants trouvent de l'emploi dans de très nombreux secteurs d'activités que sont les équipements et le contrôle industriel, la production et la transformation de l'énergie, les automatismes et la gestion technique du bâtiment, les automatismes de production industrielle, la distribution de l'énergie électrique, les installations électriques des secteurs tertiaires, les équipements publics, le froid industriel, l'agroalimentaire et la grande distribution, les services techniques, les transports (véhicules et infrastructures). Les étudiants de BTS peuvent poursuivre leurs études vers les licences, les licences professionnelles ou en CPGE ATS (Adaptation Technicien Supérieur), ou vers les écoles d'ingénieurs à partir d'un recrutement sur dossier.

<sup>1</sup> Source Banque Centrale de pilotage - inscrits au bac pro MELEC session 2017

<sup>2</sup> Source Banque Centrale de pilotage - inscrits au BTS électrotechnique session 2017

## **Les métiers du génie électrique sont en pleine transformation**

**Antoine de FLEURIEU** Délégué Général du GIMELEC

*En tant qu'organisation professionnelle, le Gimélec bénéficie d'un poste d'observation privilégié pour embrasser l'ensemble des offres et innovations apportées par ses adhérents sur tous les marchés qu'ils adressent et, dans le même temps, percevoir les évolutions et grandes tendances de fonds qui traversent la société. Les 200 entreprises adhérentes du Gimélec sont des acteurs implantés dans le monde entier qui contribuent positivement à la balance commerciale française. Elles emploient 67 000 personnes en France et ont réalisé un chiffre d'affaires consolidé de 42 milliards € en 2017.*

*L'ensemble des « murs » qui pouvaient exister entre les électrotechnologies et le numérique sont tombés et le pilotage intelligent des systèmes devient ainsi le nouveau paradigme de toutes les solutions au service de l'efficacité énergétique comme de l'efficacité industrielle. Le mot « solution » recouvre désormais un ensemble physique, logique et virtuel complet et cohérent pour répondre à toutes les nouvelles attentes vis-à-vis de l'énergie électrique, de sa production à sa consommation en passant par sa distribution et son stockage.*

*Les nouvelles possibilités ainsi offertes sont immenses. Il convient cependant pour les exploiter de positionner l'humain, et ses compétences renouvelées, au cœur de cet ensemble, à tous les niveaux et dans toutes ses activités. La question de savoir « Qui est responsable de quoi lorsque l'alliance du numérique et de l'électrique débouche sur une multiplication rapide des équipements autonomes ? » doit ainsi pouvoir trouver sa réponse.*

## **Le triptyque recherche-innovation-formation dans le génie électrique**

**François COSTA**

**Professeur à l'université Paris Est Créteil**

**Responsable du pôle CSEE au laboratoire SATIE UMR 8029**

*On pourrait penser que la recherche en génie électrique a atteint une asymptote au vu des progrès considérables des dernières décennies dans le traitement de l'énergie électrique toujours plus souple, efficace et en progression continue dans les domaines des transports, de l'industrie, des bâtiments ou des applications grand-public. Or il n'en est rien car nous sommes confrontés à des défis sociétaux et environnementaux de plus en plus complexes. Ils imposent d'innover dans les transformations énergétiques à moindres impacts en intégrant mieux les comportements et les attentes de l'utilisateur : électromobilité, sources d'énergies renouvelables variables, bâtiments à énergie positive, autoconsommation, santé, etc.. sont des évolutions dans lesquelles nous sommes déjà engagés. Ainsi, la gestion intelligente de l'énergie électrique via les smart-grids, l'éco-conception des équipements et des services, les couplages électromobilité-information, l'usage de matériaux actifs ou « intelligents », l'émergence de nouveaux matériaux comme les semi-conducteurs à grand gap (SiC, GaN) en substitution au silicium constituent des changements de paradigmes que la recherche en génie électrique intègre parfaitement. Par ailleurs, l'usage des techniques numériques est sans cesse plus prégnant tant pour la modélisation/conception/optimisation que pour le contrôle (la gestion de l'énergie électrique fait appel à toujours plus d'intelligence).*

*Les grands laboratoires de génie électrique nationaux ont ainsi fait évoluer leurs thèmes de recherche et leur organisation dans ces directions, souvent en couplant des compétences autrefois séparées dans un contexte où nos partenaires socio-économiques ont également beaucoup évolué, passant de producteurs de composants/équipements à celui d'assembleurs vendant plus de service dans un environnement globalisé. Il résulte de ces évolutions que la formation d'un chercheur en génie électrique doit être fondée sur des connaissances initiales solides en physique et en technologie mais aussi en sciences du numérique, en cultivant d'importantes capacités d'adaptation, de veille et d'autoformation afin d'être partie prenante des ruptures technologiques en cours et à venir.*

*Ainsi, la recherche en génie électrique mène à l'innovation via le transfert aux entreprises des connaissances produites dans les laboratoires ; elle s'appuie sur une formation supérieure en constante évolution, elle-même nourrie par la recherche. Ainsi, les scientifiques du génie électrique entretiennent un cercle vertueux où recherche, formation et innovation interagissent et s'enrichissent.*

**Professeur Jean-François ROUCHON** Directeur Toulouse INPT / ENSEIHT

*Engagée depuis 2015 dans une réforme d'envergure visant à restructurer l'école autour de trois pôles (Numérique, Electronique Energie électrique & Automatique, Mécanique des Fluides, Energétique et Environnement), l'objectif de l'N7 est de former des élèves en capacité de relever les deux défis majeurs que constituent la révolution numérique et la transition énergétique, positionnant ainsi clairement l'INP-ENSEIHT comme l'école du numérique, de l'énergie et de l'environnement.*

*Dans ce contexte, le domaine de l'EEEA dispensé à l'N7 adossé à des laboratoires de renommée internationale, le LAPLACE et le LAAS, a fortement évolué depuis plusieurs décennies se nourrissant de l'incontournable apport du numérique, des soft skills, des innovations technologiques issues des retombées de nos recherches et des besoins identifiés par nos industriels partenaires de secteurs comme le transport, les systèmes embarqués, l'aéronautique et le spatiale, mais aussi de l'énergie... Ainsi, la formation couvre un large spectre allant des circuits intégrés à la problématique du transport de l'énergie électrique, en passant par les systèmes communicants électromagnétiques, le traitement du signal et des images, l'électronique de puissance, la mécatronique, les nouvelles énergies et leur hybridation, répondant ainsi aux besoins de l'embarqué comme du stationnaire, des systèmes intégrés comme des composants de puissance...des formations, donc, à caractère fortement pluridisciplinaires garantissant l'agilité à laquelle devront répondre nos futurs diplômés.*



**Guy Friedrich**  
**Professeur des Universités**  
**Directeur du Laboratoire Electromécanique de Compiègne (LEC)**

*L'université de technologie de Compiègne (UTC) a été créée il y a maintenant plus de 40 ans avec la volonté d'associer les mondes de « l'université » et des « grandes écoles » dans le but de former des ingénieurs et des docteurs autour de la « technologie ».*

*Le terme Génie Electrique actuel est sensiblement apparu à la même époque. Il est lié à une évolution des technologies numériques au niveau « simulation » et « contrôle » (éléments finis et microprocesseurs) et également à l'apparition des composants électroniques en commutation. Ces technologies ont bouleversé l'enseignement, ouvert de nouveaux champs de recherches et élargi considérablement les domaines d'applications du microWatt au gigaWatt.*

*L'UTC a contribué à cette révolution en créant, dès son origine, une équipe de recherches et une filière de formation d'ingénieurs. L'ingénieur en Génie Electrique est devenu un systémier aux larges compétences technologiques s'appuyant obligatoirement sur une solide formation scientifique dans les domaines de l'EEA.*

*Les enjeux sociétaux liés à l'apparition de production d'énergie décentralisée et aux transports plus propres constituent aujourd'hui les principaux domaines sur lesquels l'établissement a choisi de former des ingénieurs et des docteurs technologues nécessaires à maintenir le niveau de compétitivité nationale dans une concurrence devenue mondiale.*

*L'UTC a fait le choix d'intégrer la formation de Génie électrique au sein d'une formation en ingénierie mécanique formant ainsi des ingénieurs dotés d'une double compétence leur permettant d'aborder des projets variés associant mécanique et électricité tant au niveau système que composants. L'électrification croissante des véhicules (voitures, avions,...) a ouvert de nouveaux gisements d'emplois et perspectives de carrières. Nos étudiants ne s'y trompent pas : l'effectifs des étudiants de cette filière de formation a doublé au cours des cinq dernières années.*

# Gestion de L'Énergie Électrique Embarquée (G3E) sur les plateformes militaires terrestres (PMT)

## Solutions actuelles et orientations à moyen terme

**JOSE DOMINGO SALVANY**

Responsable R&T - NEXTER Electronics

### 1. Introduction

NEXTER Electronics est une filiale équipementière du groupe NEXTER, implantée à Toulouse ; elle fournit au groupe, des technologies éprouvées par le combat, mais aussi à des sous-systémiers du secteur civil, principalement pour les secteurs ferroviaire et aéronautique.

La technologie développée par NEXTER Electronics est valorisée dans le secteur civil via des produits, principalement autour de la gestion et la distribution de l'énergie électrique embarquée et le control commande sécuritaire.

### 2. La G3E sur les PMT

#### 2.1. Technologies utilisées sur les Packs Énergie

Le pack d'énergie électrique mis en œuvre dans les véhicules militaires terrestres, est très dépendant du type de véhicule (cavalerie (LECLERC), artillerie (CAESAR), infanterie (VBCI)).

Pour chaque véhicule, le pack énergie et le réseau électrique sont optimisés pour prendre en compte les profils de mission : Fonctionnement en veille des batteries, démarrage du moteur, mode de fonctionnement nominal, mode de fonctionnement réduit.

L'architecture électrique du char Leclerc, créée en 1990, fut optimisée pour fonctionner en mode puissance. Deux génératrices, délivrent 29 kW en continu sous 28VDC.

Un tampon batteries est présent pour le démarrage du moteur. En mode veille sous batteries, la gestion de l'énergie est assurée pour ne pas compromettre le redémarrage du moteur. La gestion de l'énergie est implémentée sur des ordinateurs dédiés reliés par un bus série déterministe et des liaisons filaires.



Figure 1 : Char LECLERC

L'énergie de la tourelle principale, est fournie par un convertisseur de puissance DC/DC isolé non réversible d'une puissance de 1,2 kW, générant du 270VDC à partir du réseau 28VDC. Ce convertisseur utilise des transistors bipolaires et a un rendement de 80%.

Un autre exemple significatif de l'évolution technologique est le DPE6x6 pour « Démonstrateur à Propulsion Électrique ». Ce démonstrateur, a été développé et testé dans la période 2003-2008, dans le cadre d'un PEA (Projet d'Étude Amont) financé à 50% par la DGA.

Le DPE est une plateforme hybride série de 18 tonnes à propulsion électrique, pouvant se déplacer jusqu'à 105 km/h. Le train de propulsion se décompose en : moteur roue intégrant une boîte de réduction, et des freins à disque intégrés dans les roues.

Grâce à la mobilité électrique on voit apparaître de nouvelles fonctions : fort couple à basse vitesse qui permet l'esquive, mode furtif optimisant la signature acoustique et IR. Le réseau de puissance 750VDC est utilisé pour certaines servitudes (ventilation, pompes de refroidissement) et peut être utilisé pour l'alimentation de fonctions externes. Les convertisseurs de puissance réversibles, des moteurs font 50 kW chacun.



Figure 2 : DPE 6x6

## 2.2. Verrous levés depuis 10 ans

L'utilisation d'un même tampon d'énergie pour les fonctions mobilité et protection, est un des sujets prioritaire afin d'optimiser la performance de la plateforme

Le projet SUPERNOMA sponsorisé par DGA, via un RAPID en 2014, a été porté par la société E4V. Un nouveau concept d'hybridation du pack énergie, évolutif et utilisable sur les réseaux d'alimentation unipolaire ou bipolaire a été le cœur de ce projet.

Les principales fonctions abordées sont les auxiliaires électriques, l'assistance à la mobilité et la mobilité électrique. Les nouvelles fonctions de protection nécessitent des tensions d'activation de plusieurs kV, pour cela sont utilisés des convertisseurs DC/DC isolés élevant la tension depuis les réseaux de bord HVDC (+/-270VDC) des batteries.

Au niveau de la distribution d'énergie embarquée sur les PMT, l'utilisation de switch électroniques intelligents (SSPC : Solid State Power Controller), permet d'améliorer la flexibilité de la plate-forme, et facilite la mise en œuvre des fonctions de gestion de l'alimentation. Ils remplacent avantageusement : fusibles, contacteurs et capteurs de courant.

La technologie SSPC est implémentée de plus en plus dans les plates-formes militaires nouvelles ou rénovées. Cette technologie a été mise en œuvre depuis 1990 sur le char Leclerc. Les derniers modules SSPC fabriqués par NEXTER Electronics fonctionnent jusqu'à 1 kV et ont les capacités en courant jusqu'à 400A. Cette technologie devient une nécessité pour répondre aux dernières exigences de l'OTAN autour des nouvelles architectures vétronique.

## 2.3. Les verrous spécifiques défense

### 2.3.1. L'hybridation des sources

A ce jour l'hybridation sur les plates-formes militaires est envisagée sur la mobilité électrique, les armes électriques et les fonctions auxiliaires.

La gestion de l'énergie dans les technologies de stockage, principalement en termes d'état fonctionnel, est critique. Des nouvelles technologies de batteries sûres de fonctionnement et à haute densité de puissance / énergie sont attendues, en provenance du secteur civil. Pour améliorer l'efficacité des convertisseurs de puissance, les semi-conducteurs grands gaps sont en cours d'implantation.

En revanche, dans le domaine des armes électriques, la gestion des transitoires, répétitifs ou non, est spécifique au domaine militaire et nécessite la mise en œuvre de générateurs de puissance spécifiques et de convertisseurs de puissance fonctionnant à haute tension.

Trois grands secteurs sont identifiés:

- Hybridation à faible énergie, dont la mise en œuvre s'effectue en utilisant des COTS du domaine civil

- L'hybridation moyenne énergie, qui utilise une technologie civile adaptée pour le secteur militaire
- L'hybridation haute énergie, qui peut utiliser des technologies adaptées en provenance du secteur ferroviaires. Mais dans la plupart des cas, la technologie mise en œuvre est spécifique au domaine militaire.

### 2.3.2. Energies impulsionnelles

La gestion des énergies impulsionnelles pour les applications militaires doivent commuter des tensions entre 10 kV et 22 kV et doivent être embarquées sur des plates-formes mobiles où la taille et le poids est un verrou. Des densités de courant de plus de 2000 A / cm<sup>2</sup> sont attendues sur la base d'un dispositif 100 kA Silicium et des températures de travail supérieures à 200 ° C sont prévues.



Les composants SiC vont permettre d'optimiser les futurs systèmes pour être plus légers, plus petits et plus rapides. Ces composants sont nécessaires à des fins de défense en termes de suprématie technologique.

## 3. Synthèse

NEXTER Electronics, agit dans le contexte national et européen, pour fournir des technologies aéroterrestres duales compétitives et pérennes.

Le plan de route suivi pour le développement de ces technologies est cadré par la gestion de l'énergie électrique embarquée, ce qui nécessite des convertisseurs de puissance de plus en plus performants pour éviter les pertes et ainsi optimiser la densité de puissance.

L'intégration des switchs de puissance à grand gap, au niveau des convertisseurs, permet d'aller dans ce sens, car ils supportent des hautes tensions et travaillent à des températures de jonction élevées.

# ELECTRIFICATION des AERONEFS LES TECHNOLOGIES CLES

**SERGE ROQUES<sup>1</sup> - OLIVIER GOSSELIN<sup>2</sup>**

1) Expert Emérite : SAFRAN ELECTRICAL & POWER

2) Expert Emérite : SAFRAN R&T et INNOVATION

**Résumé :** Les avions nouveaux deviennent de plus en plus électriques pour 2 principales raisons :

1. les systèmes de l'avion font principalement appel à l'énergie hydraulique sujette à fuites très corrosives avec un produit très nocif (ester-phosphate) qui est plus énergétique que le kérosène lorsqu'il prend feu à haute température. D'autre part les circuits hydrauliques ne sont pas commutables en cas de fuite car cela entraînerait une fuite sur le circuit commuté et donc sa perte ! La connexion hydraulique manque de souplesse car elle nécessite un remplissage difficile du circuit puis sa purge par du personnel spécialisé donc des risques. A l'opposé, les circuits électriques sont très écologiques, commutables immédiatement en cas de pannes et directement connectables sur l'équipement à alimenter.

2. la propulsion thermique évolue vers une propulsion électrique ou hybride pour des raisons environnementales, de rendement, de nouvelles géométries ou de performances augmentées selon les types d'aéronefs et de missions.

**Abstract:** New airplanes become more electric due to 2 main reasons:

1. Systems are mainly hydraulic and subject to corrosive leakages using a very harmful product (ester-phosphate) more energetic than the kerosene when burning at high temperature. Moreover hydraulic circuits are not interconnectable since a leakage should be connected to the new selected one and therefore its loss.

Hydraulic refilling is not flexible with difficulty to introduce hydraulic liquid within pipes and operate purge by qualified personnel to limit risks.

2. On the other hand, electric circuits are more eco-friendly, flexible in case of failure and immediately usable at equipment level.

## 1. Introduction

Sur la plupart des avions fabriqués depuis la seconde guerre mondiale, les commandes de vol sont assistées en puissance par 2 ou 3 circuits hydrauliques indépendants généralement avec une pression de l'ordre de 3 000 PSI (environ 210 Bars) et les ordres de commande aboutissant sur les vérins hydrauliques de commande arrivaient du pilote par le biais de câbles souples mécaniques actionnés par les organes de commande du cockpit (volant de manche, manche et palonnier). Sur Concorde d'abord puis sur A320 avec le Mini-manche pour la première fois, les ordres de commande arrivent sur les vérins hydrauliques par des câbles électriques d'où le nouveau nom donné à ces commandes de vol : FLY BY WIRE

Sur A380 pour la première fois, deux circuits hydrauliques seulement ont été installés au lieu de 4 circuits indépendants qui étaient demandés par les Services Officiels FAA et EASA.

Pour obtenir les 4 circuits indépendants de commande de vol, il a été introduit une nouvelle technologie d'actionneur,

EHA (Electro Hydrostatic Actuator), utilisant l'énergie électrique pour alimenter un ensemble motopompe qui fournit localement l'énergie hydraulique à un vérin.

Au total, l'avion possède donc 2 circuits hydrauliques alimentant les actionneurs hydrauliques et 2 circuits électriques alimentant les actionneurs electrohydrostatiques.

## 2. Evolutions électriques récentes

Sur le BOEING 787, 3 autres systèmes ont bénéficié d'une électrification.

Le système de conditionnement d'air est alimenté par 4 gros compresseurs électriques au lieu d'un prélèvement d'air sur les compresseurs du moteur de propulsion.

Le dégivrage des ailes est effectué électriquement au lieu d'être réalisé par air chaud prélevé sur le moteur de propulsion.

Le freinage des roues est effectué à l'aide d'actionneurs électriques en remplacement des actionneurs hydrauliques.

Par ailleurs, SAFRAN propose pour un Airbus A320 un système électrique de roulage au sol permettant de se dispenser de la poussée des réacteurs



Ce projet entre dans les actions écologiques de réduction de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>.

### 3. Hybridation de la propulsion

Les objectifs ACARE (Advisory Council for Aviation Research and innovation in Europe) visent une réduction d'ici 2050 (base 2000) de 75% pour le CO<sub>2</sub>, de 90% pour le NO<sub>x</sub> et de 65% pour le bruit perçu.

Ces objectifs ne pourront pas être atteints sans une rupture dans la conception des avions, de leur système de propulsion et des technologies associées. Parmi les initiatives en cours, on peut citer en Europe, Airbus qui s'apprête à expérimenter l'usage d'un moteur électrique de 2 MW alimenté par un turbogénérateur et une batterie, en lieu et place de l'un des 4 moteurs thermiques du BAe 146.

Aux USA, la NASA s'apprête à faire voler le X 57 dont la voilure devrait avoir une amélioration



aérodynamique de 40% avec une aile soufflée par des propulseurs électriques utilisant des moteurs électriques à haut rendement > 95% à comparer aux 30 à 40% de rendement des moteurs thermiques. Cette association de nouveautés : architecture aérodynamique, système de propulsion et technologies électriques, offre une réelle rupture sur l'efficacité globale, mais

L'utilisation de moteurs électriques de rendement > 95% comparé aux 40% de rendement des moteurs thermiques amène un gain significatif mais cet avantage doit être évalué au regard de la quantité et de la masse des batteries à embarquer.

### 4. Limitations des batteries

A ce jour les batteries Li-Ion ne fournissent qu'environ 150Wh /kg de batterie (ref TESLA, package compris) le kérosène fournit environ 11 000 Wh/kg soit 70 fois plus d'énergie pour même masse. De nouvelles technologies, comme le lithium-souffre ou le lithium-air permettront d'atteindre ou de dépasser

respectivement 500 et 1000 Wh/kg. Cette pénalité par rapport au kérosène peut s'estomper pour des vols de courte durée et rendre la propulsion électrique alimentée par batterie réaliste mais n'est pas acceptable pour des vols long-courriers où la solution se trouve dans l'hybridation.

### 5. Les tendances futures

De nombreuses études portent sur diverses architectures d'hybridation. Ce peut être une hybridation de sources électriques (générateur, batterie, pile à combustible,..) au profit d'une propulsion électrique et/ou une hybridation de propulsion thermique et électrique. Les solutions sont nombreuses et chacune répond à un cas particulier (drônes, taxis volants, avions d'affaires ou long-courriers)

Il ne faut pas oublier l'hydrogène qui permettra de valoriser l'utilisation des piles à combustible qui commencent à être disponibles ou encore alimenter les moteurs thermiques. Les progrès à faire dans ce domaine portent principalement sur le mode de stockage dans l'avion qui peut être sous haute pression ou liquide et aussi dans le mode de production, de distribution et de stockage au sol.

Enfin, la montée en puissance des systèmes électriques embarqués au-delà du MW nécessitera de monter la tension des réseaux vers quelques kV à l'image du ferroviaire et du naval tout en utilisant des technologies permettant encore d'augmenter les rendements et réduire la masse ( ex : composants semi-conducteurs SiC et GaN)

Plus tard, l'application de la supraconductivité pour les câbles et les machines permettra de faire un pas supplémentaire vers des avions commerciaux à propulsion électrique.

### 6. Conclusions et perspectives

Les technologies électriques disponibles aujourd'hui permettent déjà d'envisager leur déploiement dans l'aviation légère. Prochainement, des architectures innovantes, comme la propulsion distribuée permettront de faire voler à moyen terme des avions de petite ou moyenne capacité. Enfin, le développement de turbomachines de propulsion hybridées, de turbogénérateurs haute vitesse, de batteries haute énergie, de propulseurs électriques et la maîtrise de l'hydrogène permettra d'ici 2050 de développer des avions commerciaux long-courriers répondant aux objectifs environnementaux ACARE.

# Les racks compacts et modulaires, futur de l'avionique embarquée

**BASTIEN PUERTOLAS**

Ingénieur responsable technique innovation chez Latécoère

*Une équipe pluridisciplinaire : Les services Innovation des branches Aérostructures et Systèmes d'Interconnexion de Latécoère ont travaillé conjointement et démontré leur complémentarité, depuis la définition jusqu'à la fabrication des racks de nouvelle génération. De nombreux métiers et profils se sont impliqués : ingénieurs, techniciens, dessinateurs, calculateurs, experts électronique ou matériaux, architectes produit, etc. Le Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile (CORAC) regroupe, sous l'impulsion de la DGAC et du GIFAS, l'ensemble des acteurs français du secteur du transport aérien. Il a pour objectif la mise en cohérence des efforts de recherche et d'innovation dans le domaine aéronautique, notamment pour la préservation de l'environnement et le développement durable. C'est dans ce contexte qu'une plateforme de travail a été définie pour développer les technologies liées à l'avionique modulaire étendue (AME) : CORAC-AME. Les axes d'études sont liés au développement de nouveaux réseaux de calculateurs embarqués, permettant des communications haut débit et protégées contre les attaques informatiques du bord comme du sol. Les gains estimés sont une réduction de 50% du volume et de 30% de la masse des équipements et calculateurs, dont pourront bénéficier les avions de demain (horizon 2025). À l'issue de travaux menés avec les avionneurs et équipementiers partenaires du projet CORAC-AME, une nouvelle génération de rack compact et modulaire a été présentée par Latécoère.*

## 1. Introduction

Les architectures et infrastructures avioniques des avions actuels ne permettront pas d'accueillir de manière optimale les technologies répondant aux futurs besoins : connectivité généralisée, allègement du poids et sécurité renforcée. Jusqu'à présent, les évolutions connues sont le déploiement de l'avionique modulaire intégrée (IMA), par exemple sur les Airbus A380 et A350, et l'étape suivante sera l'évolution vers la 2<sup>ème</sup> génération (IMA2G) ouvrant l'avionique à d'autres domaines tels que les services pour le personnel à bord ou les terminaux des passagers. Cette évolution est associée à une rupture de l'architecture centralisée et ses traditionnelles baies avioniques massives en pointe avant de l'avion, pour aller vers une architecture de plus en plus distribuée associée à des racks de nouvelle génération localisés dans différentes zones de l'avion.

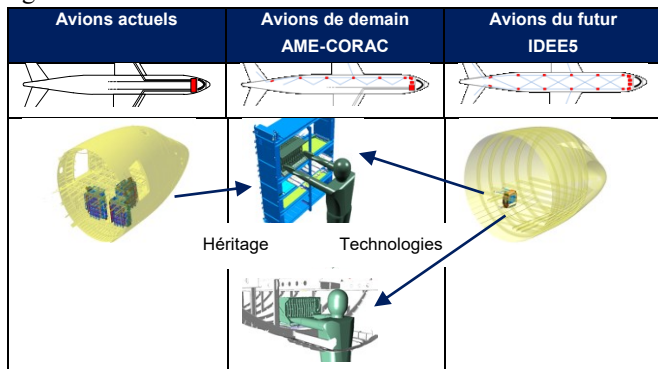


Figure 1 : Evolution des architectures et infrastructures avioniques

## 2. Travaux de recherche

Au sein du projet CORAC-AME, Latécoère a été responsable des études pour la définition et la

réalisation des racks avioniques et les boîtiers des modules associés. Ces modules, nommés blades, sont prévus pour intégrer les différentes ressources respectivement développées par chaque équipementier, lesquelles fournissent les fonctions spécifiques à l'IMA et IMA2G (blade d'alimentation, calcul, switch réseau, etc.).

L'objectif de Latécoère a été de développer une solution permettant de s'installer dans différentes configurations : emplacement dans l'avion et différents types d'avion ; et compatible avec les requis et contraintes imposées par les modules.

Les éléments dimensionnants pris en compte dès les premières étapes du projet étaient :

- La thermique et la mécanique, pour assurer le bon refroidissement et maintien des modules dans l'environnement de l'avion,
- la connectique, pour retenir la solution technologique qui permettra d'optimiser la communauté entre les différents formats de modules et réduire les coûts sur l'ensemble des différents aéronefs équipés, tout en offrant suffisamment de capacité à évoluer avec les technologies actuelles et à venir, notamment les liaisons optiques.

Un effort particulier a été porté sur la recherche de solutions permettant d'adapter le rack aux différents besoins, et ce, sans impact notable sur la masse ou le coût du produit final. Les solutions les plus modulaires imposent des interfaces nombreuses et tendent à rendre le produit complexe. Ainsi, Latécoère a imaginé un rack réduisant le plus possible le nombre et la complexité des interfaces, aussi bien dans le domaine de sa construction mécanique, que sur son système d'interconnexion électrique et principe de refroidissement.

Les travaux menés ont permis de développer une infrastructure nouvelle dont les points clés sont :

- Capacité d'installation dans différents types d'avions et environnements
- Format des modules compatible 6U et assimilés, largeur adaptable
- Liaisons électriques et optiques, directement du câblage de l'avion sur l'arrière des modules
- Modules remplaçables sans toucher au câblage avion
- Liaisons indirectes entre modules du rack par l'intermédiaire d'un backplane : carte fond de panier
- Mécanique de remplacement et verrouillage des modules sans outils, rapide et sûr
- Face avant des modules 100% disponible pour ajout de fonctions ou connecteurs (liaisons pour maintenance, modules mémoire extractible, affichage et indicateurs...)
- Solutions de refroidissement sur circuit d'air avion ou autonome par ventilateurs avec système de secours
- Capacité d'évolution pour refroidissement par paroi froide ou flux liquide
- Fabrication simple et à bas coût des boîtiers de modules

### 3. Résultats

A l'issue du projet de recherche, des démonstrateurs physiques ont été réalisés. Ces démonstrateurs sont représentatifs des futurs produits tels que nous pourrions les voir sur avion. Les démonstrateurs réalisés intègrent douze modules. La structure du rack étant totalement modulable, le nombre de modules peut être ajusté en fonction des besoins avionneurs : par exemple de 6 à 24.



Figure 2 : Démonstrateur physique de rack

#### Architecture mécanique

Les démonstrateurs ont été conçus afin de pouvoir s'adapter sur tout type d'avion. Ils présentent une base commune à tous les porteurs, la structure « cabinet », et des éléments optionnels en fonction de la configuration avion souhaitée : le module de ventilation et son diffuseur, la structure d'accueil et ses moyens de fixation à l'avion.



Le rack est équipé de la façon suivante :

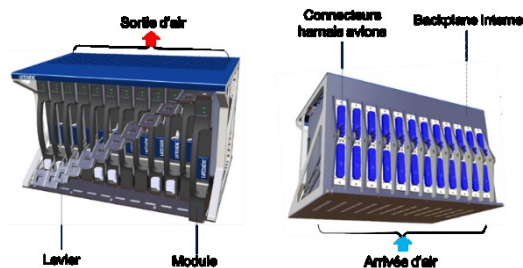


Figure 3 : Architecture mécanique

#### Modules électroniques

Les modules s'installent dans des emplacements dédiés, et peuvent supporter différentes fonctions telles que des alimentations, processeurs, switch réseau, etc. Latécoère fournit l'infrastructure de ces fonctions en proposant un boîtier permettant l'intégration des composants électroniques. Ce boîtier a été pensé pour être compatible des besoins actuels et futurs :

- Module au format non propriétaire, interfaces et spécifications partagées.
- Boîtier pour accueil de circuit imprimé au format « 6U+ » :
- Carte 6U : 233.35 x 160mm, hauteur pour composants : 21,6mm
- Jusqu'à +50 mm d'extension en face avant du module
- Connectique directe vers harnais : modulaire et haute densité
- Liaison fond de panier par contacts à ressort : backplane léger sans connecteurs
- Boîtier simplifié sans mécanisme d'insertion, extraction ou verrouillage
- Semelle de calibration pour ventilation
- Face avant 100% personnalisable



Figure 4 : Modules génériques CORAC-AME

#### Maintenance

La maintenance opérationnelle est un facteur clé, et le rack Latécoère a été conçu de façon à optimiser les interventions en termes de coût, délai et sécurité. Ainsi, un système d'insertion / extraction des modules est intégré au rack :

**Manipulation :** Manipulation à 1 main, Faible effort et rapide et Sans outils

**Verrouillage :** Auto-verrouillant, Déverrouillage manuel et Contrôle visuel rapide

**Simplicité :** Conception des modules simple et Réalisation d'un châssis allégé et simplifié

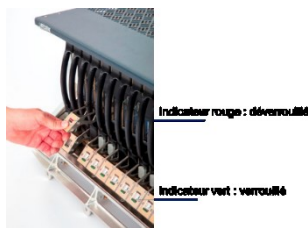


Figure 5 : Système d'insertion / extraction et verrouillage ergonomique du rack CORAC-AME

### Interconnexion

Les liaisons électriques et communications internes et externes au rack sont réalisées de la manière suivante :

Un backplane (circuit imprimé multicouche en fond de panier), assure les liaisons inter-modules au sein du rack. Il permet de véhiculer sur un même support différents types de liaisons : Discrets, Haute vitesse, Puissance.

Les liaisons externes sont assurées par de la connectique très haute densité, montée à l'arrière du rack, permettant l'interface électrique et optique avec le câblage de l'avion.

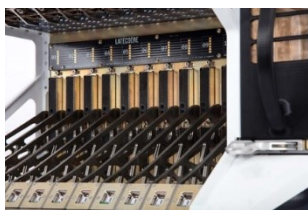


Figure 6 : Vue interne du rack, muni d'un backplane en partie haute, et connecteurs dédiés à chaque module.

### Refroidissement

Le système de ventilation assure le refroidissement des modules. Il peut à la fois être compatible du système de ventilation avion existant, ou bien autonome lorsque l'avion ne dispose pas d'un tel système.

Dans le cas d'un montage dans une baie avionique, le rack est compatible avec le système de refroidissement avion existant :

- Air frais soufflé par étagère inférieure
- Air chaud évacué par étagère supérieure
- Installation possible avec équipements voisins de chaque côté
- Réalisation démonstrateur : dissipation 600 W (50W par module)
- Répartition homogène de la ventilation entre les modules

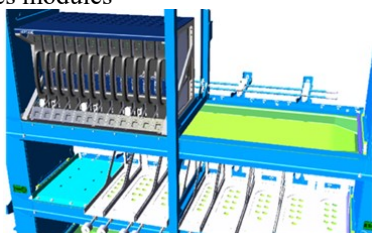


Figure 7 : Installation et simulation. Dans le cas d'une installation sans accès au circuit de refroidissement avion (ATA21), le système de ventilation est autonome.

Le démonstrateur disposant d'un module de refroidissement associant des ventilateurs en série, cette solution est compatible de la perte d'un ventilateur avec les avantages suivants :

- Pas de clapet anti-retour, plus de phénomène de back-flow en cas de panne de ventilateurs en parallèle.
- Pas de perturbation sur la répartition du flux entre modules, l'écoulement n'est pas déséquilibré par la perte d'un ventilateur gauche ou droit par exemple dans le cas de ventilateurs en parallèle.
- Pilotage PWM des ventilateurs, avec mesure du régime en temps réel : baisse du bruit et consommation, capacité de future gestion thermique dynamique selon les modes de fonctionnement des modules.

Pour diffuser le flux d'air de manière homogène entre chaque module du rack, nous avons conçu un plenum compact et léger. S'agissant d'une pièce guidant le flux d'air sous le rack, nous avons démontré 2 possibilités :

- en ULTEM (procédé ALM), permettant la réalisation de la pièce idéale d'un point de vue fluide et maîtrise de la masse.
- en polycarbonate (par thermoformage), permettant la réalisation de la pièce optimisée pour une production en série et à faible coût récurrent.

La modularité du système est réalisée par l'apport d'un bloc de ventilation optimisé selon les besoins de chaque configuration :

le bloc est interchangeable sans outil afin de permettre une maintenance simple et rapide (plus besoin d'intervention délicate dans l'avion pour remplacer régulièrement chaque ventilateur et filtre, les blocs de ventilation sont reconditionnés en atelier)



Figure 8 : Bloc interchangeable

## 4. Conclusion et perspectives



Le futur de l'avionique embarquée doit être supporté par une nouvelle génération de racks répondant aux besoins des avionneurs en termes de coûts, de modularité et de performance. C'est pourquoi les racks avionique Latécoère de nouvelle génération ont été conçus pour répondre à ces besoins, en apportant une solution compacte et modulable présentant une plateforme commune à tous les porteurs (short range, long range, régional, business jet et hélicoptères).

La communication inter modules des racks Latécoère permet un brassage des données de façon à mixer sur une même plateforme les courants forts et les courants faibles (signaux discrets, puissance et haute vitesse) et bénéficie d'une connectique haute densité pour répondre aux besoins croissants des avionneurs en termes de fonctions (calcul, I/O...).

La maintenance opérationnelle est également un facteur clé dans la conception de ces racks. Ainsi les racks Latécoère sont dotés d'une fonction d'insertion et d'extraction des modules de calcul qui ne nécessitent aucun outil et permettent ainsi une maintenance simplifiée. Les futures générations de racks pourront être installées directement sur la structure primaire des avions, permettant un gain de masse considérable en supprimant toute sous-structure dédiée.



## 5. Remerciements

Le groupe Latécoère remercie ses partenaires Airbus, Dassault Aviation, Radiall, Safran et Thales, qui ont collaboré à la plateforme de travail avionique modulaire étendue, soutenus dans leur démarche par le CORAC, le GIFAS, la DGA et la DGAC.

# Vers un tracteur agricole tout électrique. Présentation et dimensionnement énergétique du « tracteur vert »

DANIEL MATT<sup>1</sup>, NADHEM BOUBAKER<sup>2</sup>, PATRICE RIOU<sup>3</sup>

(1). Institut d'Electronique et des Systèmes, UMR CNRS 5214, Université de Montpellier.

(2). Safran Electrical & Power UK, Pitstone.

(3). Institut Mines-Télécom, Alès.

**Résumé :** Les En agriculture « bio », les traitements chimiques sont remplacés par le travail mécanique de tracteurs à motorisation thermique. C'est notamment le cas pour le désherbage qui nécessite de longs passages d'outils de sol, engendrant des émissions polluantes en contradiction avec le concept de développement durable. Compte tenu du développement intense (+5% par an environ en France) des filières « bio », il est devenu urgent d'étudier l'électrification des engins agricoles. Nous présentons ici le résultat de notre étude de faisabilité, avec la réalisation d'un démonstrateur, fruit d'une collaboration entre différentes institutions publiques et fédérations de vignerons. Le tracteur que nous présentons est le premier réalisé dans le format vigneron interligne.

**Abstract:** In organic farming, chemical treatments are being replaced by the mechanical work of diesel engine tractors. This is particularly the case for weeding, which requires long passages of soil tools, generating pollutant emissions in contradiction with the concept of sustainable development. Given the intense development of organic sectors, it has become urgent to study the electrification of agricultural machinery. We present here the result of our feasibility study, which led to the realization of a demonstrator, result of collaboration between various public institutions and federations of winegrowers. The tractor that we present here is the first to be made in the interline vineyard format.

**Mots clés :** véhicule électrique, tracteur vigneron, dimensionnement énergétique d'un véhicule électrique.

## 1. Introduction

L'article décrit les grandes lignes du dimensionnement énergétique et de la réalisation d'un démonstrateur de tracteur vigneron électrique interligne [1]. Cette réalisation, fruit d'une collaboration entre organismes publics et fédérations professionnelles, a pour but de montrer la faisabilité d'un engin tout électrique apte à remplacer son homologue thermique dans une démarche cohérente d'agriculture « bio ». Dans ce contexte, une des principales utilisations du tracteur réside dans de nombreux labours destinés au désherbage. Nous nous sommes basés sur cette tâche pour le dimensionnement ; pour le compléter, nous montrerons que d'autres outils conventionnels, très énergivores, doivent être repensés pour pouvoir être utilisés en électrique.

## 2. Energie embarquée

Une étude effectuée par l'Institut Français de la Vigne et du vin, avec un tracteur équipé d'un débitmètre, a permis de quantifier le besoin énergétique d'un tracteur vigneron en fonction du matériel attelé. Pour la plupart de ceux-ci, et notamment le cadre de travail du sol qui nous intéresse, la consommation de gasoil est de l'ordre de 8l/h. Ceci équivaut à une puissance moyenne restituée aux roues de 17 kW



Figure 1 : aperçu général du tracteur vert

Dans sa version de base, le tracteur conçu est entièrement électrique. Pour le dimensionnement de la batterie d'accumulateur, nous avons estimé qu'il était inutile d'embarquer l'équivalent énergétique d'une journée de travail, le choix a donc été fait d'installer deux racks-tiroirs, facilement extractibles, stockant chacun 40 kWh, permettant quatre heures de labours. Pour terminer une tâche, il convient de remplacer les racks par des racks chargés ou par un « prolongateur d'autonomie » (groupe électrogène), ou d'effectuer une charge rapide (une heure avec un chargeur de 80 kW).

Le choix de la tension de fonctionnement est aussi crucial. A l'opposé de ce qui se pratique dans l'automobile, nous avons opté pour un dimensionnement à très basse tension, soit 75V (limite de la directive européenne « basse tension »), facilitant l'homologation, l'intervention sur le véhicule et le choix des convertisseurs d'alimentation des moteurs.

Les batteries sont réalisées à partir de cellules prismatiques (250) aux caractéristiques suivantes :

Technologie	lithium-fer-phosphate
Capacité	100 Ah
Energie	320 Wh
Energie massique	90 Wh/kg
Courant décharge standard	50 A
Courant décharge maximal	300 A pendant 30 s
Tension nominale	3,2 V
Résistance	< 1 mΩ

Dans sa version finale le tracteur embarquera 900 kg d'accumulateurs, des solutions plus légères existent mais sont inutiles car la motricité requise nécessite un poids plancher de l'engin. La puissance crête disponible étant égale à 240 kW, la batterie seule est suffisante pour répondre à toutes les sollicitations. Enfin, pour optimiser la durée de vie des cellules, la puissance totale est limitée à 60 kW par le système de gestion électronique de la batterie (BMS).

### 3. La motorisation

Le système de traction est constitué de quatre roues motorisées, totalement indépendantes, de dimensions identiques (320/70 R 20), équipées d'un réducteur à rapport fixe. Pour une puissance moyenne de 17 kW, le couple total aux roues, à la vitesse de travail (5 km/h), est égal à 6000 Nm. Afin de satisfaire au besoin en couple transitoire (franchissement d'obstacle), le rapport de réduction est fixé à 1/40, le couple moteur à 100 Nm, soit un couple aux roues de 16 000 Nm (jusqu'à la vitesse de 7 km/h). La force théorique de traction qui en découle est égale à 32 kN, en pratique elle sera limitée par l'adhérence des pneumatiques et le poids de l'engin (environ 20 kN). La vitesse maximale du tracteur est limitée par le réducteur à 20 km/h.

Le moteur a été conçu et fabriqué par nos soins. Il s'agit d'une structure synchrone classique à aimants, fonctionnant à haute fréquence (16 pôles, 533 Hz à la vitesse maximale) avec un bobinage original, décrit dans [2], optimisé pour la très basse tension, utilisant des barres massives de cuivre (une par encoche), qui permet un rendement supérieur à 95% à la vitesse de travail du tracteur.

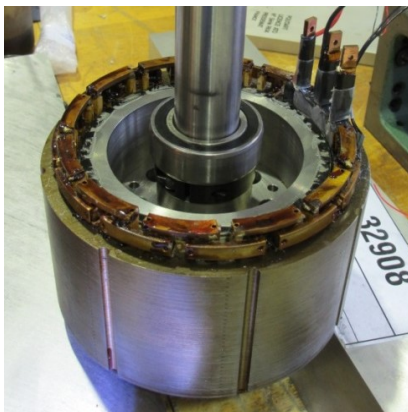


Figure 2 : moteur à bobinage TBT

### 4. L'outillage traditionnel en mode électrique.

De tous les outils traditionnellement utilisés en viticulture, seul le pulvérisateur (sulfatage) nécessite une puissance incompatible avec le mode électrique (supérieure à 30 kW), un tel outil devra alors embarquer sa propre énergie électrique (autant que pour le tracteur, soit presque 1 T d'accumulateurs), mais une solution plus rationnelle consisterait alors à faire évoluer drastiquement cet outil pour en optimiser le rendement. De telles études sont en cours, leur acceptabilité par la profession n'est pas évidente.

### 5. Remerciements

Ce travail résulte d'une collaboration entre l'Université de Montpellier, L'institut Mines-Télécom d'Alès, la Fédération des Vignerons indépendants et « Sud Vin Bio », avec le financement du CG du Gard et de l'agglomération Nîmes Métropole.

### 6. Références

- [1] D. Matt, Vers un tracteur tout électrique, congrès DéciElec, Toulouse, 2017.
- [2] N. Boubaker, Etude des pertes atypiques dans les machines synchrones à aimants à hautes performances. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, juillet 2016

# Le moteur de propulsion électrique du futur

AYMEN AMMAR

Ingénieur calcul machines électriques  
JEUMONT Electric, Jeumont  
[aymen.ammar@jeumontelectric.com](mailto:aymen.ammar@jeumontelectric.com)

**Résumé :** Avec l'apparition des convertisseurs statiques de puissance, le Moteur Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) tend à s'imposer dans le système de propulsion électrique et tout particulièrement pour les applications navales. Cependant, des contraintes économiques, environnementales et risques d'approvisionnement des matériaux terres rares (Nd, Sm, Cobalt, Dysprosium) poussent les industriels à développer différentes solutions pour minimiser les volumes des aimants. Différentes topologies ont été étudiées parmi celles-ci le Moteur Synchrone à Double Excitation (MSDE) qui généralement nécessite deux fois moins de terres rares et offre une grande souplesse pour l'optimisation du point de fonctionnement du système de propulsion d'une part et le Moteur Synchrone Supraconducteur qui en plus d'un rendement équivalent à celui d'un MSAP permet une réduction considérable du volume et de la masse d'autre part.

## 1. Introduction et problématique

Avant les années 80, la propulsion électrique navale était assurée par des Moteurs à Courant Continu (MCC). La simplicité de la structure et du principe de contrôle de la caractéristique couple / vitesse était le point fort de cette technologie. Cependant, la présence du collecteur réduit sensiblement le niveau de fiabilité du moteur. Les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et l'apparition des aimants à forte densité énergétique ont permis aux Machines Synchrones à Aimants Permanents de connaître durant ces dernières décennies un développement important. Tout d'abord, les machines synchrones à aimants permanents ont commencé à se répandre comme actionneurs dans les industries automatisées en remplacement des moteurs à courant continu. Ensuite, les MSAP ont commencé à être utilisées dans les applications de plus forte puissance comme la propulsion marine. L'utilisation d'aimants permanents confère aux MSAP, en plus d'un très bon rendement, des puissances et couples massiques élevés. La création du flux rotor par les aimants permanents évite l'utilisation de contacts glissants qui engendre donc une meilleure fiabilité et par conséquent moins d'entretien. Toutefois, l'utilisation d'aimants engendre un surcoût, un risque de désaimantation et enfin la nécessité de faire un compromis entre vitesse maximale de fonctionnement et facteur de puissance [1].

Les contraintes environnementales et économiques liées à l'utilisation des aimants permanents (utilisation de matériaux rares, difficulté de recyclage, marché instable, ...) incitent les industriels à développer des topologies innovantes combinant les avantages des MSAP tout en réduisant leurs inconvénients. Une première alternative pourrait être le Moteur Synchrone à Double Excitation [2] qui allie technologie à aimants permanents et technologie à rotor bobiné. Une deuxième solution pourrait être la machine supraconductrice.

Dans cet article nous présenterons le principe et l'intérêt de chaque solution.

## 2. Le Moteur Synchrone à Double Excitation

Le flux principal dans un moteur synchrone à double excitation (Fig.1) est la résultante de deux flux l'un constant généré par les aimants, l'autre variable généré par les enroulements d'excitation. La structure profite ainsi des avantages des deux technologies, à savoir un bon rendement, un bon couple massique et une simplicité du contrôle du flux.

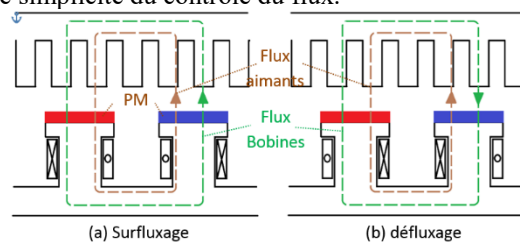


Figure 1 : Schéma de principe du MSDE.

Ainsi, comme le montre la Figure 1, le flux total est créé en partie par des aimants permanents, diminuant considérablement la quantité de terre rares utilisée comparé à un MSAP. Ce flux est par la suite augmenté ou diminué par action sur le courant traversant la bobine d'excitation.

Soit  $V_m$  la tension du moteur,  $L_s$  l'inductance statorique,  $I_s$  le courant statorique,  $\phi_{exc}$  le flux créé par l'inducteur et  $\psi$  l'angle interne entre le courant et la FEM. Dans les deux configurations, MSAP et MSDE, la vitesse peut être exprimée comme suit :

$$\Omega = \frac{1}{p} \frac{V_m}{\sqrt{L_s^2 I_s^2 + \Phi_{exc}^2 - 2\Phi_{exc} L_s I_s \sin \psi}} \quad (1)$$

Comme dans un MSAP  $\phi_{exc}$  est constant, la variation de vitesse au-delà de la vitesse de base (Tension maximale) ne peut être réalisée que par action sur l'angle  $\psi$ . Ceci a tendance à dégrader le facteur de puissance et ainsi le rendement.

Cependant dans un MSDE  $\phi_{exc}$  est variable car il est créé à la fois par un bobinage d'excitation et par des aimants permanents constituant ainsi un degré de liberté supplémentaire pour un contrôle optimal du flux.

La Figure 2 montre des courbes d'iso-rendement dans un plan couple vitesse d'un MSAP et d'un MSDE

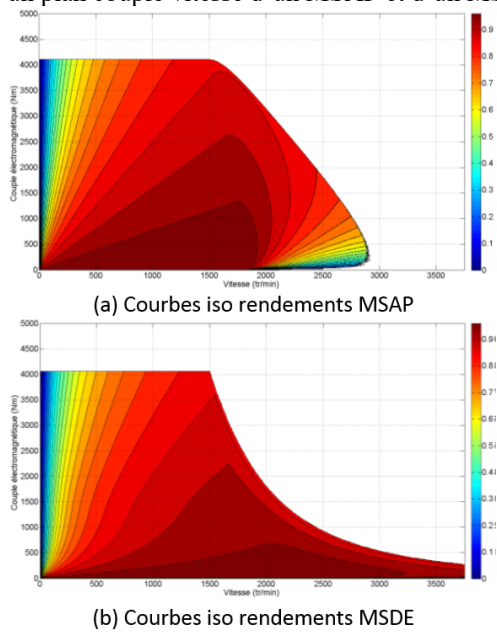


Figure 2 : Iso-rendements MSAP vs. MSDE.

Nous remarquons que le degré de liberté supplémentaire apporté par la double excitation permet un fonctionnement au-delà de la vitesse de synchronisme avec des rendements élevés améliorant ainsi l'efficacité énergétique sur un cycle de fonctionnement du moteur [3].

### 3. Le moteur Synchrone Supraconducteur

La supraconductivité est un phénomène physique qui apparaît dans certains matériaux à basse température (quelques Kelvin). Il est essentiellement caractérisé par l'absence complète de la résistivité électrique, ce qui fait de lui un conducteur parfait sans pertes par effet Joules

La découverte dans les années 80 des supraconducteurs à haute température critique (environ 160 Kelvin) a permis l'utilisation de ces matériaux dans des applications médicales et industrielles. Dans les machines électriques tournantes, les matériaux supraconducteurs sont utilisés pour former les bobines inductrices permettant un fonctionnement avec des densités de flux magnétique supérieures à 2 Tesla [4] (dans les machines conventionnelles l'induction d'entrefer est généralement de 0.8T).

Ces caractéristiques font de la propulsion navale un secteur d'application privilégié pour les moteurs supraconducteurs permettant d'atteindre des objectifs de compacité et de rendement inégalés. En effet le couple électromagnétique peut être exprimé comme suit :

$$C_{em} = k \times B_e \times A_s \times V \tag{2}$$

Où  $k$  est une constante (environ 1.4),  $B_e$  est l'induction d'entrefer (Tesla),  $A_s$  est la charge linéique (A/m) et  $V$  est le volume d'entrefer ( $m^3$ ).

A couple égal, l'augmentation de l'induction d'entrefer grâce à l'utilisation de matériaux

supraconducteurs engendre une diminution du volume de la machine.

Dans le tableau suivant nous avons réalisé une comparaison entre les caractéristiques d'un moteur synchrone à aimants permanents et un moteur synchrone à inducteur supraconducteur. La puissance et la vitesse considérées sont respectivement 10MW et 100tr/min.

	Moteur à aimants	Moteur supraconducteur
Induction entrefer	0.8 T	1.6 T
Charge linéique	60 kA/m	60 kA/m
Volume	14 m <sup>3</sup>	7 m <sup>3</sup>
Longueur fer	1 m	1 m
Diamètre alésage	4 m	3 m
Masse	47 t	32 t

Tableau 1 : Comparaison moteur à aimants et moteur supraconducteur

Les résultats obtenus montrent un gain important en compacité : couple volumique et couple massique. Le volume est divisé par 2 et la masse est réduite de 32%.

Il faut aussi noter que les entrefers importants de ce type de machine, nécessaires pour la mise en place de la cryogénie, engendrent un faible taux d'harmonique et des faibles ondulations de couple. On a donc des moteurs silencieux avec une discrétion acoustique remarquable.

Les moteurs supraconducteurs existent depuis les années 80 mais n'ont jamais connu l'essor escompté. Ceci était essentiellement dû à des problèmes de fiabilité et de coût de fabrication. Cependant, les bons résultats obtenus dans le cadre du projet ECOSWING [5] ne peuvent que présager un bel avenir pour cette technologie.

### 4. Conclusion

Dans cet article nous avons tout d'abord présenté les problématiques liées à l'utilisation de MSAP pour la propulsion électrique. Ensuite nous avons présenté une première technologie susceptible de remplacer le MSAP à savoir le MSDE qui utilise une technologie hybride pour la création du flux permettant ainsi une réduction de la quantité d'aimant tout en optimisant les performances énergétiques. Enfin nous avons présenté une deuxième technologie, le moteur supraconducteur, qui permet une réduction considérable du volume et de la masse sans affecter le rendement.

### 5. Bibliographie

[1] Y. Amara, « Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation », thèse de Doctorat, Université Paris XI, 2001.  
 [2] L. Vido, Y. Amara, M. Gabsi, « Machines synchrones à double excitation MSDE », Techniques de l'Ingénieur, D3525, Fév. 2011.  
 [3] A. Ammar, « Modélisation et Optimisation d'un Générateur Synchrone à Double Excitation de Forte Puissance », thèse de Doctorat, EC Lille, 2013.  
 [4] S. Bendali, « Dimensionnement d'un moteur supraconducteur HTc », thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012.  
 [5] Site internet ECOSWING <https://ecoswing.eu/>

# Développement d'une machine asynchrone double alimentation de rapport 1 : présentation des travaux et discussions autour de cette architecture.

**SYLVAIN GUEMARD, LAURENT CASSIN**  
EN MOTEURS (groupe ECA), Couëron, France

**Résumé :** une grande partie des Machines Asynchrones Double Alimentation (MADA) sont employées en mode génératrice dans les applications éoliennes. Cet article propose l'utilisation de la MADA dans un périmètre de fonctionnement plus large, notamment en mode moteur, avec un ratio de puissance égal à 1 entre le stator et le rotor, offrant ainsi un certain nombre d'avantages, notamment dans les applications de propulsion basse vitesse ou systèmes contrarotatifs.

## 1. Introduction

Les accélérateurs L'objectif de ces travaux était d'évaluer la chaîne propulsive dans son ensemble : composant de puissance SiC, convertisseur et machine MADA, celle-ci présentant un intérêt majeur pour la propulsion électrique en milieu militaire. Seuls les travaux sur le moteur sont ici présentés.

La machine MADA est constituée d'un stator et d'un rotor triphasé. Cette machine est très largement utilisée dans les domaines de la génération d'énergie électrique à vitesse variable grâce au pilotage qu'elle offre l'alimentation du rotor, permettant ainsi une stabilité de la tension (énergie éolienne, hydrolienne [1], [2]). Le ratio de puissance est de l'ordre de 1/3 entre rotor et stator. L'originalité de la structure étudiée ici réside dans la possibilité de pouvoir connecter deux convertisseurs statiques sur le même bus DC, de piloter de façon indépendante le stator et le rotor et de conserver un ratio de puissance entre les deux armatures le plus proche possible de 1.

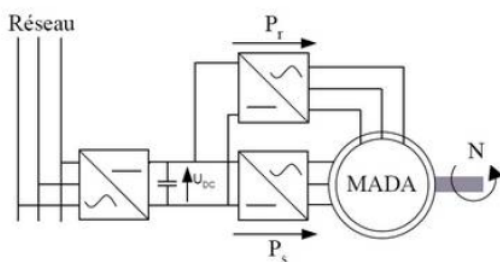


Figure 1 : Architecture de l'alimentation de la MADA

## 2. Mise en équation

De façon générale, la puissance électromagnétique de la MADA peut s'exprimer comme le produit du flux stator  $\phi_s$ , du flux rotor  $\phi_r$  et de l'angle  $\gamma$  entre ces deux flux.

$$P_{em} = K \cdot \Phi_S \cdot \Phi_R \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \sin \gamma$$

$$\omega = \omega_s - \omega_r$$

Avec K un facteur dépendant des paramètres géométriques et du bobinage,  $\omega_s/\omega_r$  la pulsation stator/rotor et  $\omega$  la pulsation mécanique.

Compte tenu du mode de fonctionnement, le modèle électrique de la machine est un circuit R, L, E (avec R la résistance, L l'inductance et E la force électromotrice (FEM)) [3]

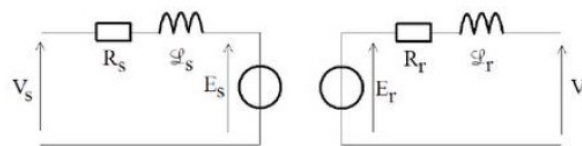
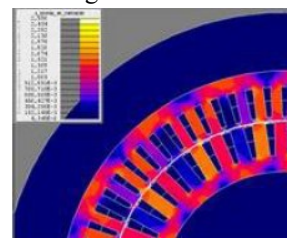


Figure 2 : Schéma équivalent monophasé

Suite au développement d'un logiciel de calcul en interne, une phase de validation par éléments finis a été conduite et a démontré la fiabilité du modèle analytique.

Figure 3 : Résultat simulation numérique 2D



## 3. Réalisation et résultats essais

Le projet a été décomposé en plusieurs étapes dont l'étude et la réalisation de deux prototypes : quelques dizaines de kW puis plusieurs centaines de kW.

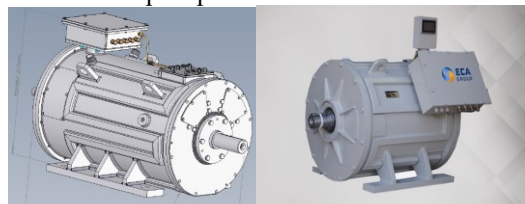


Figure 4 : photos des réalisations

L'étude détaillée de la première maquette a été réalisée suivant une géométrie à 6 pôles. Pour l'étude de la seconde machine (la plus puissante), une optimisation des dimensions du circuit magnétique a été menée en comparant les polarités de 6 à 24 pôles pour diminuer sa masse et rester proche de moteurs industriels (avec les mêmes performances électromécaniques). L'optimum masse/rendement retenu ici est de 16 pôles. Le ratio de puissance de 1 entre stator et rotor entraîne des pertes importantes au rotor et la mise en place d'une solution performante pour le refroidissement du

rotor. EN Moteurs a réalisé une architecture évoluée en développant et en réalisant un rotor cloche avec une double enveloppe. La conception multicouche retenue permet d'augmenter la puissance volumique.

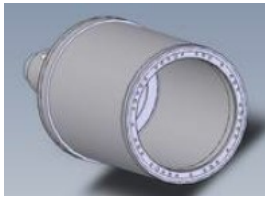


Figure 5 : Réalisation d'un rotor cloche

Les essais réalisés ont permis de montrer la possibilité de fournir 50% du couple par le stator et 50% du couple par le rotor et de valider le fonctionnement du moteur avec deux convertisseurs identiques pour 100% de la puissance.

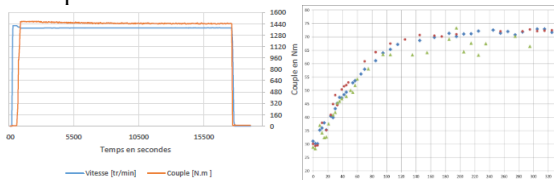


Figure 6 : Mesure du couple et de la température rotor.

La caractérisation de la température rotor a été possible grâce au développement spécifique d'un système d'acquisition sans fil basé sur la technologie wifi.

#### 4. Avantages et limites de la structure

Les avantages d'une telle architecture sont :

- un fonctionnement à basse vitesse avec des fréquences électriques élevées, ce qui limite la taille des circuits magnétiques et des convertisseurs.
- de pouvoir assurer un fort niveau de redondance en cas de défaillance.
- de limiter voire d'annuler des résistances de freinage sur le bus DC.
- de pouvoir travailler dans les quatre cadrans et de ce fait en mode générateur (fonctionnement actuel des éoliennes).
- de rester dans des masses similaires aux solutions asynchrones.
- de pouvoir augmenter la plage iso-couple pour les mêmes fréquences d'alimentation.

En revanche, ce type de moteur présente des contraintes à prendre en compte :

- la partie tournante doit accueillir une alimentation en eau et une alimentation électrique, ce qui complexifie l'intégration, la maintenance et impacte nécessairement la masse de l'ensemble.
- Par rapport aux structures conventionnelles, l'effet de double alimentation augmente le risque d'avoir des vibrations magnétiques plus importantes. Par ailleurs, les  $\cos \phi$  stator et rotor sont plus faibles. De ce fait, le rendement de ce type de machine est donc plus faible.
- Par nature, la géométrie ne peut pas être strictement identique entre le stator et le rotor ce qui entraîne une

non égalité parfaite sur les grandeurs électriques quel que soit la loi de commande associée.

#### 5. Conclusion et perspectives

Si les avantages avec ce type de MADA sont nombreux, il n'en reste pas moins que des solutions plus complexes doivent être mises en œuvre. Les contraintes se trouvent transférées sur la machine mais l'augmentation de la puissance et des polarités permet de limiter leurs impacts sur l'encombrement final de la machine. La MADA doit donc être vue dans son système complet pour pouvoir juger des gains réels. Cette machine peut ainsi être employée dans des applications basse vitesse (propulsion navire, énergies renouvelables) ou contrarotatives pour gagner sur les rendements hydrodynamiques (en libérant le stator). La suite des travaux consisterait à travailler sur une de ces applications ainsi que d'évaluer les performances acoustiques et vibratoires de façon à pouvoir l'implémenter ultérieurement dans un environnement militaire.

#### 6. Remerciements

Ce travail a été conduit par EN Moteurs (groupe ECA) dans le cadre d'un projet DGA, en collaboration avec le consortium regroupant CIRTEM, ECA, IBS, le laboratoire AMPERE et le laboratoire LAPLACE.

#### 7. Références

- [1] Seifeddine BENELGHALI, « Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone double alimentation. » 2012.
- [2] Frederic POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. » 2003.
- [3] Nicolas PATIN, « Modelling and Control of a Cascaded Doubly-Fed Induction Generator based on Dynamical Equivalent Circuits. » 2008.

# Etat de l'art de l'hybridation du système de propulsion des hélicoptères

**DR. MARC GAZZINO**

Senior expert Electrical systems – On board energy  
Airbus Helicopters  
Aéroport International Marseille Provence  
13725 Marignane Cedex  
France

**Résumé :** Comme dans l'industrie automobile, il peut être envisagé de remplacer partiellement ou complètement l'énergie thermique nécessaire pour la propulsion et la sustentation des hélicoptères par l'énergie électrique. L'amélioration des performances des technologies électriques permet de proposer des systèmes électriques avec des ratios masse puissance attractifs pour compléter l'énergie thermique utilisée pour la propulsion des hélicoptères. Les différences entre les fonctions réalisées par la propulsion hybride dans le domaine automobile et les possibilités offertes par l'hybridation du système de propulsion sur un hélicoptère seront expliquées. Les différentes architectures d'hybridation hélicoptère ou turbine seront revues et des exemples d'application possibles seront proposés pour un hélicoptère conventionnel. Les exigences de performances des composants des architectures électriques en vue d'applications en série sur les hélicoptères seront revues : machines électriques, électroniques de puissances, stockage d'énergie, refroidissement.

## 1. Introduction

Comme dans l'industrie automobile, il peut être envisagé de remplacer partiellement ou complètement l'énergie thermique nécessaire à la propulsion et la sustentation des hélicoptères par l'énergie électrique. L'amélioration des performances des technologies électriques permet de proposer des systèmes électriques avec des ratios masse puissance attractifs pour compléter l'énergie thermique utilisée pour la propulsion des hélicoptères.

## 2. Différents types d'hybridation

Ce qui est appelé "hybridation" est l'utilisation de l'énergie électrique en complément ou remplacement de l'énergie thermique pour le système de propulsion. Les puissances mises en jeu vont de quelques dizaines de kW pour aider directement la turbine, à plusieurs centaines de kW si on considère l'entraînement du rotor.

Par analogie avec les solutions existantes dans le domaine automobile, les nouvelles architectures de systèmes de propulsion hybrides pour hélicoptères peuvent être classées en plusieurs catégories suivant la puissance:

- micro hybridation: puissance limitée à quelques dizaines de kW et utilisée pour aider directement le générateur de gaz en phase d'accélération afin d'obtenir rapidement de la puissance supplémentaire par exemple.

- "Mild Hybrid" ou hybridation légère consistant à transmettre des puissances jusqu'à 300kW directement à la Boîte de Transmission Principale qui entraîne le

rotor. Exemples d'application : amélioration de l'autorotation des hélicoptères monomoteurs, dont une démonstration de faisabilité a été faite en 2011, ou électrification du rotor arrière.

- "Full Hybrid" permettant d'assurer une partie du vol avec uniquement l'énergie électrique, l'énergie thermique étant toujours utilisée dans certaines phases de vol. Une grande variété d'architecture peut être imaginée, avec la possibilité de stocker ou pas de l'énergie dans des batteries d'accumulateurs par exemple.

- "Full electric", dans ce cas il n'y a plus d'énergie thermique pour la totalité du vol, comme pour les drones de petites tailles, ou les démonstrateurs technologiques type CityAirbus, VAHANA, e-Volo.

Et l'organisation des sources de puissance:

- Architecture parallèle : la chaîne de puissance électrique fournit de l'énergie mécanique en parallèle de la chaîne thermique..

- Architecture série: le rotor est entraîné par un ou plusieurs moteurs électriques, alimentés par un générateur entraîné par un moteur thermique.

- Architecture "Power split": le moteur électrique est connecté au boîtier mécanique permettant la combinaison des deux énergies, soit en additionnant l'énergie électrique et mécanique, soit en soustrayant l'énergie électrique pour la recharge de batterie par exemple.

Ces architectures peuvent être appliquées à l'entraînement du rotor principal et du rotor arrière.



### 3. Différences entre l'hybridation automobile et l'hybridation sur hélicoptère

L'Hybridation sur hélicoptère diffère de l'hybridation des automobiles par l'utilisation et la puissance:

Sur hélicoptère, les profils de puissances sont beaucoup plus stables que sur automobile et en particulier, il n'y a pas de décélération de la turbine en vol permettant de récupérer de l'énergie.

Sur automobile les niveaux de puissances varient fortement en fonction de l'utilisation :

- forte puissance sur autoroute: utilisation du moteur thermique
- faible puissance en zone urbaine: utilisation du moteur électrique avec fort couple à basse vitesse permettant de fortes accélérations.
- Récupération de l'énergie au freinage en zone urbaine.

Néanmoins, les caractéristiques spécifiques de l'hélicoptère (multi moteurs, phase d'urgence, domaine de vol) peuvent justifier l'introduction de solutions d'hybridation du système de propulsion:

Les principaux bénéfices sont d'ouvrir de nouveaux degrés de liberté pour le système de propulsion afin de :

- Optimiser les moteurs thermiques qui sont dimensionnés pour certaines phases de vol limitées en durée comme le décollage ou la perte d'un moteur.
- réduire la complexité des systèmes mécaniques (systèmes complexes et onéreux sur un hélicoptère) en utilisant différentes combinaisons de moteurs thermiques qui entraînent des générateurs électriques fournissant la puissance aux moteurs électriques.
- réduire le bruit et améliorer les performances en élargissant le domaine de vitesse des rotors et découplant mécaniquement le rotor arrière du rotor principal.

Enfin, la contrainte de masse pour un hélicoptère est beaucoup plus importante que pour un véhicule automobile.

### 4. Exemples d'hybridation hélicoptère

Parmi les nombreuses architectures d'hybridation possibles, on peut citer :

#### 4.1. Microhybridation de la turbine pour amélioration des performances moteur:

La fourniture de puissance directement sur le générateur de gaz de la turbine permet une augmentation amplifiée de la puissance sur la turbine libre qui entraîne le rotor. Ce principe permet d'éviter le sur dimensionnement de la turbine pour les cas de fonctionnement d'urgence comme la perte d'un moteur pour un hélicoptère multi moteurs ou permet

d'améliorer les performances monomoteur d'un hélicoptère bimoteur existant.

Les technologies électriques existantes permettent la mise en œuvre de ce système avec un accroissement de masse additionnelle raisonnable.

#### 4.2. Motorisation électrique secours pour hélicoptère monomoteur (Engine Backup System - EBS):

Un système électrique de secours est utilisé pour améliorer la manœuvrabilité de l'hélicoptère durant la phase d'autorotation en cas de perte du moteur : dans ces conditions l'hélicoptère est capable d'assurer une descente et reste manœuvrable jusqu'à l'atterrissage grâce à la mise en œuvre de procédure pour laquelle le pilote est entraîné.

Le système fournit la puissance au rotor par l'intermédiaire d'un moteur électrique alimenté par un système de stockage d'énergie. Cet apport de puissance permet de maintenir le rotor dans une plage de vitesse en dessous de laquelle l'hélicoptère n'est plus contrôlable, ce qui apporte un meilleur contrôle de la phase d'autorotation : suite à l'arrêt du moteur, le système fournit transitoirement de la puissance afin de maintenir une vitesse minimale sur le rotor et ainsi d'aider le pilote à mettre place sa procédure d'autorotation, et lors de l'atterrissage, un nouvel apport de puissance permet d'aider le pilote à assurer un atterrissage dans de meilleures conditions de sécurité.

Les densités de puissances des moteurs électriques, contrôleurs, et systèmes de stockage d'énergie (accumulateurs, piles thermiques, ...) permettent d'envisager une masse du système de l'ordre de 50kg, inférieure à la masse d'un passager. (fig 1).

#### Some architecture examples:

##### Mild Hybrid applications

Engine Back-Up System (EBS) for Single Engine

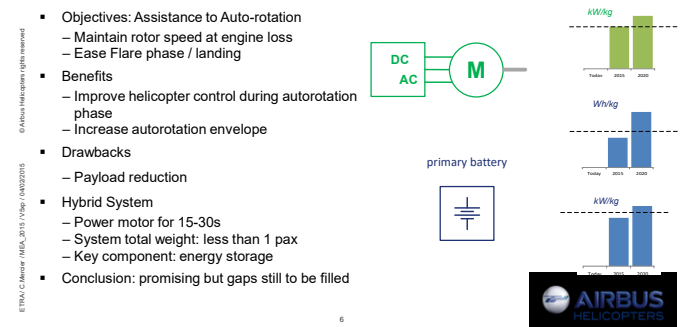


Figure 1 : exemples d'architectures

### 5. Les technologies pour l'électrification du système de propulsion

Les composants majeurs des systèmes électriques d'hybridation sont les machines électriques, moteurs ou générateurs ou machines réversibles, les électroniques de puissances qui pilotent ces moteurs, les sources de

stockage d'énergie électrochimiques primaires et secondaires, ou cinétiques.

Ces composants ont aujourd'hui des ratios de puissance massiques de quelques kW/kg qui continueront à croître dans le futur grâce aux nouveaux matériaux à forte densité d'induction et de température ou à l'exploitation de topologies peu répandues comme les machines à reluctance par exemple. Pour les électroniques, il faut compter sur l'élargissement de l'utilisation des composants grand gap tels que SiC, GaN. Pour les batteries d'accumulateurs, les technologies Lithium continuent leurs évolutions, sachant que les besoins aéronautiques demandent d'augmenter les densités d'énergie (Wh/kg) comme pour le domaine automobile mais aussi les densités de puissance (kW/kg) comme pour les outillages portatifs. Néanmoins l'industrie aéronautique bénéficie des efforts réalisés sur les technologies électriques pour l'hybridation automobile en particulier pour les composants électriques et accumulateurs électrochimiques. Il faudra aussi compter bientôt sur les solutions de piles à combustibles dont les densités de puissance massiques et volumiques sont encore un frein pour l'aéronautique.

La masse est un paramètre clé pour les technologies embarquées, mais les aspects volumes et refroidissement sont aussi des facteurs potentiellement limitants pour l'introduction des technologies d'hybridation. Si pour l'utilisation de machines électriques de forte puissance avec des durées d'utilisation de 15 à 30s, l'inertie thermique peut être suffisante, pour des durées supérieures, des systèmes de refroidissement seront nécessaires aussi bien pour les machines électriques que les batteries et viendront augmenter la masse.

## 6. Conclusion

L'aéronautique est à l'aube d'une nouvelle ère avec l'introduction de l'électrification partielle ou totale des systèmes de propulsion comme cela a été le cas dans le domaine automobile il y a une vingtaine d'année. Il existe encore des freins liés à l'impact sur les performances (durée de fonctionnement/masse) et coût d'installation de ces systèmes pour les utilisateurs, ce qui demande de continuer à faire progresser significativement les technologies électriques.

# Applications duales des actionneurs piézoélectriques amplifiés

**FRANK CLAEYSSEN, FRANÇOIS BARILLOT, GÉRALD AIGOUY, ALEXANDRE PAGÈS, THOMAS MAILLARD, CHRISTIAN BELLY, ADRIEN GUIGNABERT, MATTHIEU LOGEAS, ALEXANDRE BATAILLE, ETIENNE BETSCH, GLADYS JAUSSAUD, MARC FOURNIER, MATHIEU BARRAJA, JONATHAN STENTZ**

CEDRAT TECHNOLOGIES S.A., 59 Ch. du Vieux Chêne - Inovallée - 38246 MEYLAN cedex, France

**Résumé :** Depuis plus de 20 ans, sous contrats CNES, DGA et ESA, les actionneurs piézoélectriques ont trouvé des applications dans les instruments d'optiques spatiales. Des exemples récents incluent le micro mécanisme de pointage de précision BSA pour ATLID ou la motorisation de compensation de filé de miroir MEFISTO. Ces mécanismes assurent des mouvements précis et rapides tout en étant compacts, légers et résistants aux chocs et vibrations. Ces avantages leur permettent de couvrir aussi de nombreux besoins hors spatial, en stabilisation active et micro scanning dans des caméras Infra Rouge, en micro motorisation en instrumentation ou en actionnement de puissance tels que le contrôle actif d'écoulement en aérodynamique.

**Abstract:** For more than 20 years, under CNES, DGA and ESA contracts, piezo actuators have found applications in space optic instruments. Recent examples include the ATLID BSA small Tip Tilt for precision pointing and MEFISTO, a Tip Tilt for satellite motion compensation. These space mechanisms perform high precision motions while being compact, lightweight and resistant to external vibrations and shocks. These advantages allow also to cover many other needs, such as active stabilisation or micro scanning in IR imagers, micro motorisation in instrumentation or power actuation as in active flow control in aircraft.

**Mots clés :** actionneur piézoélectrique, moteur piézoélectrique, mécanisme, micro positionnement, stabilisation active, pointage optique, tip-tilt, jets synthétiques

## 1. Introduction

Pour des besoins duaux tels que de l'amélioration d'images en satellite d'observation, d'orientation de faisceaux laser en interférométrie laser (lidars, horloges), de micro positionnement de sondes ou de stabilisation active d'instrumentation embarquée, le CNES, la DGA et l'ESA ont perçu l'intérêt des actionneurs piézoélectriques dès les années 1990 : Les céramiques piézo multicouches (MLA) faisaient leur apparition, offrant des déformations actives de l'ordre de 1/1000 et des forces élevées >20MPa, avec des tensions de commande <200V, compatibles des électroniques spatiales. Ces propriétés leur confèrent de la haute résolution et de la raideur, engendrant une bande passante élevée. Par contre, la course réduite et la fragilité des MLA nus étaient un frein à leur application.

Pour exploiter le potentiel et contourner les limites des MLA, CEDRAT TECHNOLOGIES (CTEC) a développé les actionneurs piézo amplifiés APA®. Grâce à leur coque assurant amplification et précontrainte, ils produisent des courses de 20µm à 2mm, des forces de 20N à 2kN, tout en assurant les tenues aux vibrations et chocs de lancement requises. Les APA® sont à présent utilisés pour des mécanismes XY, des Tip-Tilts, etc. Ils sont aussi à la base de

micromoteurs linéaires ou rotatifs pas à pas SPA, ainsi que de solutions d'actionnement de puissance.

## 2. Mécanismes de pointage spatiaux

Grâce à l'héritage de PHARAO pour le CNES, CTEC a développé le mécanisme BSA d'ATLID [6] (Fig. 1) du satellite EARTHCARE de l'ESA pour AIRBUS. Le BSA est un Tip-Tilt à 4 APA60SM® équipé de jauge de contrainte (SG). Ce mécanisme de pointage optique offre une course >3mrad, une résolution <0.4µrad, une bande passante >2kHz. Il a passé les tests de vibrations et de chocs >100g. Les modèles de vols ont été livrés en 2016.

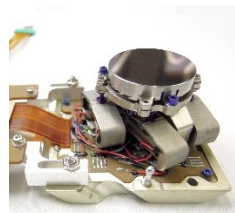


Figure 1: BSA ATLID

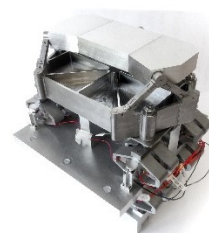


Figure 2: MEFISTO

Dans le cadre du projet DGA RAPID MEFISTO pour la Composante Spatiale Optique de défense, CTEC a étudié la faisabilité d'un mécanisme (fig.2) destiné à

assurer de la compensation de filé en satellite d'observation. Grâce à 8 APA120ML, il entraîne un miroir de 730gr, suivant une dent de scie de fréquence > 100Hz avec une erreur de vitesse <1%, tout en tenant les contraintes de lancement.

### 3. Micro-mécanismes de caméras

A partir de 2000, CTEC s'est engagée sur la démocratisation de ses technologies spatiales pour adresser des applications non spatiales. Ainsi, en optronique, depuis 2006, CTEC fabrique des micro-mécanismes XY (fig.3) et Tip-Tilt (Fig.4) à base d'APA XS pour caméras Infra Rouge. En cumul, environ 10 000 APA® ont ainsi été intégrés.

Par exemple, avec les acquis PHARAO et ATLID, CTEC a développé des Tip-Tilts DTT35XS-SG. Grâce à leur grande bande passante et des résolutions illimitées, ces mécanismes de pointage optique rapide assurent simultanément les fonctions de stabilisation active sur 0-100Hz et de micro scanning, conférant à la caméra une très haute qualité d'image. Ces fonctions sont assurées dans l'environnement vibratoire de la caméra, avec une durée de vie de plus 20 ans sur plus de  $10^{10}$  cycles.



Figure 3: XY25XS



Figure 4: DTT35XS

### 5. Micromoteurs piézoélectriques

Les petits APA® ont aussi permis l'émergence de nouveaux actionneurs à grandes courses avec blocage à l'arrêt : les moteurs de la famille SPA. Ces moteurs fonctionnent par accumulation de pas, de l'ordre d'une course d'APA, obtenus par effet inertiel. Le cumul de pas permet ainsi aux modules MSPA d'entraîner tangentiellement une charge sur des courses potentiellement illimitées avec une résolution submicronique.

Ces micromoteurs assurent ainsi des fonctions d'entraînement d'optiques ou d'échantillons en linéaire sur plusieurs cm, en rotatif sur 360° (fig.5) ou sur 3 degrés de liberté Rx, Ry, Tz (fig.6). Ils trouvent leurs applications en instrumentation optique, rayon X, MEB...



Figure 5: RSPA

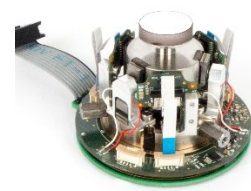


Figure 6: FSM-MSPA

### 4. Actionnement de puissance

Les grands actionneurs APA® (types ML, L, XL) adressent plutôt des applications dynamiques de puissance. En machines d'essai, ils sont utilisés pour réaliser des shakers, des machines de cyclage en traction, des tribomètres. En machine-outil, ils réalisent de l'anti-vibration ou de l'assistance vibratoire à l'usinage. En fluide, les APA® adressent des électrovannes rapides, des régulateurs de pression et des compresseurs. En aéronautique, leurs applications concernent le contrôle actif d'écoulement, via des volets actifs et des jets.

Ces applications de puissance émergent plus tardivement que les précédentes car plusieurs problèmes doivent faire l'objet de montées en TRL, qui seront soutenues par TOTAL dans le projet ALICOP: gestion des échauffements, tenue en contraintes, besoin de puissance élevée. Ainsi, pour actionner un APA L à pleine course à 1kHz, un courant de 20A à 170V est nécessaire, ce qui est à présent possible grâce aux électroniques SA75D à récupération d'énergie développées par CTEC.

Grâce à ces solutions d'actionnement de puissance, CTEC innove par exemple avec l'ONERA : En 2016, le jet pulsé VIPER à base d'APA L alimenté par une SA75D, a permis d'établir un record avec un débit de 462g/s/m à Mach 1 de 0 à 500Hz. Sur cette base, des jets synthétiques sont développés dans le cadre du projet DGA RAPID ASPIC.

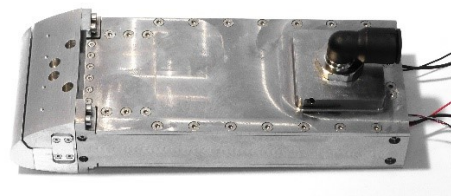


Figure 7: Jet VIPER, base du projet ASPIC

## 6. Conclusion & Remerciements

Partant d'applications spatiales, les actionneurs piézoélectriques APA® se sont largement diffusés en optronique et en instrumentation.

Via leur mise en moteur SPA, ils assurent des micro-motorisations 'direct drive' rotatives ou linéaires à longue course, innovantes.

Des travaux en cours leur permettent aussi d'entrer dans les domaines de la productique, des machines d'essai, de la fluidique et de l'aéronautique.

Les auteurs remercient chaleureusement les différents partenaires qui ont accompagné CTEC dans ces développements, notamment BPI France, CNES, DGA, ESA, ONERA, TOTAL.

# Actionneur en environnement haute température

REGIS MEURET<sup>1</sup>, LAURENT GUILBAUD<sup>2</sup>, BRUNO ALLARD<sup>3</sup>, DANIEL ROGER<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Safran Electrical & Power, Rond-Point René Ravaud, 77551 Moissy Cramayel, France

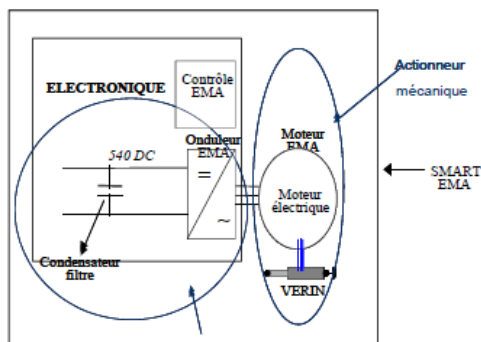
<sup>2</sup> THALES CAP Bretagne - Zone Artisanale Le Piquet 35370 ETRELLES

<sup>3</sup> Laboratoire Ampere, INSA de Lyon 20 avenue Albert Einstein 69621 Villeurbanne

<sup>4</sup> LSEE - FSA, Rue Gérard Philipe, Technoparc Futura 62400 BETHUNE  
regis.meuret@safrangroup.com

## 1. Introduction

L'électrification de certains actionneurs a été réalisée sur les derniers programmes et c'est le cas des actionneurs de frein qui l'ont été sur le B787, pour l'instant cette électrification a été faite en plaçant l'électronique en zone soude pressurisée pour des raisons de maîtrise de la fiabilité, de coût et de disponibilité des composants et en protégeant le moteur de la chaleur émise par le disque carbone du frein en effet à ce jour la réalisation d'électronique de puissance en zone non pressurisée entraîne des sur coûts et le niveau de robustification est encore à optimiser ; dans le futur l'optimisation de ce système passera par l'utilisation d'une électronique de commande du moteur au plus près de l'actionneur et un moteur électrique intégré à l'actionneur permettant une réduction de masse et câblage. Cette solution pour sa faisabilité passe par l'utilisation de technologie haute température au niveau moteur et électronique de commande et puissance accompagnée d'une recherche



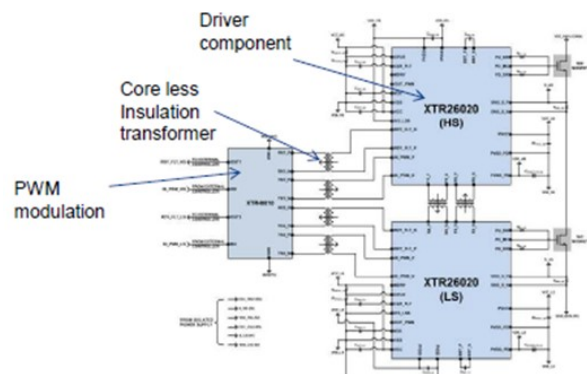
d'intégration des fonctions de commande pour les placer sur la couronne de frein. Ces travaux ont fait partie des objectifs de nombreux projets de recherche comme SEFORA le premier et SICRATES le dernier, et des collaborations avec IDEALEC via le projet RAPID TADORNE (voire article pour la partie Bus barre) ou Gore avec de nombreux partenaires pour effectuer les recherches nécessaires et pour fournir les composants nécessaires à la réalisation de cette chaîne électrique.

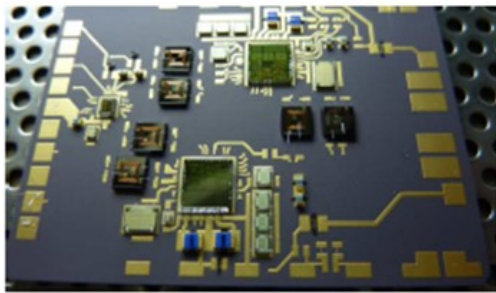
Des composants de nouvelle technologie ont été évalués dans la perspective d'un convertisseur intégré servant à la commande d'un moteur de vérin d'une puissance de 1 à 5 kW sur un réseau DC de 540 V et pouvant atteindre une tension de 900 V pic.

Le carbure de silicium démontre de réelles capacités à fonctionner en haute température, tout en ayant des pertes en commutation fortement réduites grâce à la rapidité de commutation. La conception d'un convertisseur nécessite aussi l'emploi de passif comme les condensateurs d'entrée, le filtre réseau et les bus barres pour relier les éléments de puissance entre eux. Une nouvelle technologie de condensateur a été étudiée avec la société Gore qui a utilisé son film ePTFE gardant ses propriétés jusqu'à 230 °C et permet donc de réaliser des condensateurs d'une très grande stabilité et autocicatrisable (8µF 1000 V), la solution céramique présente une densité plus importante mais avec une grande variabilité en fonction de la température.

## 2. Réalisation de la partie driver

Pour les drivers et la partie commande rapprochée, le choix des composants s'est porté sur des composants SOI de la société XREL en technologie HT<sup>0</sup>1 µm, pour la partie regulation de vitesse et contrôle de l'actionneur il est sans doute préférable de garder une partie déportée de l'actionneur avec des contraintes plus faible en température et donc pouvant utiliser des technologies plus fine





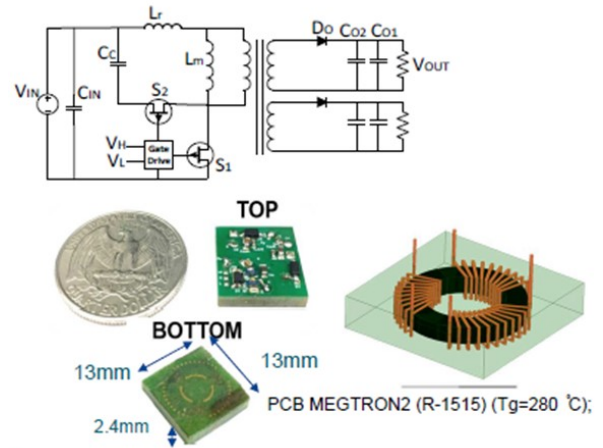
Transformateur Core less sur substrat verre

Figure 1 : Driver hors alimentation

Un volume non négligeable de l'onduleur de puissance est consacré à l'isolation galvanique au niveau des commandes et de l'alimentation du driver, qui doit répondre à deux critères : l'un statique (tenue diélectrique statique), l'autre dynamique (susceptibilité à des perturbations, qualifiée en kV/μs).

L'accent a été mis sur l'isolation galvanique des signaux logiques d'entrée et de l'alimentation de la commande locale de grille, l'objectif principal étant l'augmentation de la densité de puissance du module de puissance avec des facteurs de forme contraints. L'isolation des signaux logiques est assurée par des transformateurs à air. Les dispositifs sont basés sur la technologie sur verre disponible à STMicroelectronics-Tours, avec l'optimisation de la géométrie du transformateur ainsi que du matériau isolant (parylène), pour une tenue à haute température (3000h sans vieillissement à 250°C).

L'isolation de l'alimentation du driver (28V/6V, 2W) a fait l'objet de plusieurs points d'étude : la synthèse d'une structure de conversion à faible perte, minimisant les contraintes sur le dispositif magnétique d'isolation, l'augmentation du niveau d'isolation dynamique (100kV/μs), la géométrie du dispositif magnétique minimisant la surface. Le flyback quasi-résonant à clamp est apparu le meilleur compromis. L'analyse de dispositifs magnétiques planaires a fait ressortir le compromis entre la géométrie des bobinages et la fréquence de découpage. Le choix de composants GaN basse-tension a obligé à corriger les paramètres de leur modèle pour une précision acceptable en fonctionnement ZVS. La mise au point d'un procédé bas coût d'enfouissement de dispositifs magnétiques dans un substrat polymère a permis de contraindre la surface du convertisseur, tout en garantissant une haute performance d'isolation dynamique (75 kV/μs) et une absence de vieillissement à 3000h à 250°C.



$V_{IN} / V$	15
$V_{OUT} / V$	7 x2
$P_{OUT} / W$	1 x2

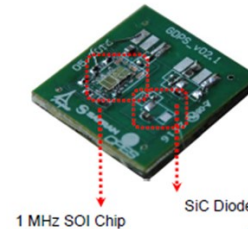


Figure 2 : alimentation : capacité parasite 1.7 pF

Un circuit intégré spécifique a été conçu pour encapsuler les composants actifs au sein de l'alimentation à découpage, en utilisant la technologie 1μm de la société XFab.

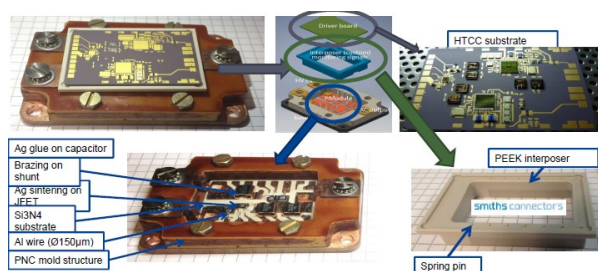
### 3. Réalisation de la partie module de puissance :

L'objectif principal de THALES DMS ETR ELLES dans le cadre du projet SiCRATES visait à développer de nouvelles technologies d'assemblage compatibles avec composant WBG capables de supporter un environnement sévère pour un module de puissance fonctionnant avec un Tj de 250° C.

En raison de la limitation connue des brasures pour le report des puces JFet en SiC, la technologie du frittage argent a été utilisée pour ses propriétés thermiques et sa compatibilité avec le substrat de puissance.

Les défis relevés ont également porté sur le développement d'un matériau de protection innovant (encapsulant rigide) résistant aux contraintes avioniques telles que les vibrations et la haute température, ainsi que l'intégration de la commande (driver avec coreless) capable de supporter 230°C, superposée au module de puissance au moyen d'un interposeur avec contact à ressorts.

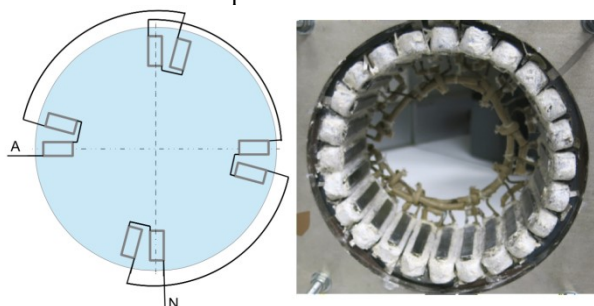
Le test électrique de démonstrateurs (phase leg et driver) a permis de vérifier avec succès la fonctionnalité de la commande, confirmant une qualité de technologie et matériaux d'assemblage prometteurs pour les applications Haute Température.



**Figure 3:** Module de puissance avec son driver intégré

#### 4. Réalisation de la partie moteur électrique

Les travaux menés sur les moteurs ont montré qu'il est possible de réaliser des bobines inorganiques adaptées aux moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP). Cette option technologique permet d'atteindre des températures internes de 500°C en régime permanent. Les bobines des prototypes ont été faites avec du fil rond à isolation inorganique mince (10µm) existant sur le marché, le Cerafil 500. Les bobines réalisées avec ce fil sont enrobées dans un ciment HT° à grains très fins et à base d'alumine. La figure 4 représente le stator à isolation inorganique du prototype de MSAP 24 dents / 20 pôles et le schéma des connexions d'une phase



**Figure 4:** Stator du prototype de la MSAP 24/20 HT° à isolation inorganique.

Les propriétés électriques et mécaniques du Cerafil 500 sont très médiocres par rapport à celles des fils émaillés classiques réalisés avec des polymères. L'enrobage de ciment HT° donne à la bobine les propriétés mécaniques requises et



# Propulsion MagnétoHydroDynamique (MHD) en eau de mer

**JEAN-PAUL THIBAUT**

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LEGI, F-38000, Grenoble, France

**Résumé :** Les lanceurs à rails, La propulsion MagnétoHydroDynamique (MHD) est un mode de propulsion direct par réaction en eau de mer. En supprimant l'hélice ou toute autre pièce mécanique en mouvement, elle offre un haut potentiel de discrétion. Des électrodes, alimentées en courants continus réglables, combinées au champ magnétique permanent produit par un aimant supraconducteur, génèrent des forces électromagnétiques volumiques qui pompent l'écoulement et assurent une propulsion par réaction.

**Abstract :** MagnetoHydroDynamic (MHD) propulsion is a direct mode of propulsion by reaction in seawater. By removing the propeller or any other mechanical part in movement, it offers a high potential of discretion. Electrodes, fed by adjustable DC currents, combined with the permanent magnetic field produced by a superconducting magnet, generate volume electromagnetic forces that pump the flow and provide jet propulsion.

## 1. Introduction

La propulsion MagnétoHydroDynamique (MHD) est un mode de propulsion direct par réaction envisagé dès les années 60 pour réaliser une propulsion sans hélice ou autre pièce mécanique en mouvement [1]. Des électrodes, alimentées en courant continu, permettent de faire passer un courant de densité  $\mathbf{J}$  au sein de l'écoulement. Ce dernier, placé dans un champ magnétique d'induction  $\mathbf{B}$ , est ainsi le siège de forces électromagnétiques volumiques  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  qui assurent le pompage de l'écoulement et la propulsion par réaction du navire (voir figure 1).

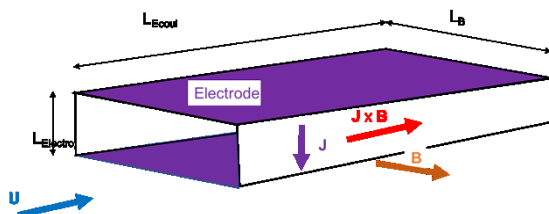


Figure 1 : Schéma du canal de propulsion MHD

L'eau de mer est un électrolyte (solution faible de chlorure de sodium) assimilable à un faible conducteur électrique [2]. En conséquence pour garantir un rendement suffisant, le champ magnétique appliqué doit avoir une induction de l'ordre de 10T [3] et une excitation permanente. La réalisation récente de grands aimants supraconducteurs [4] laisse présager de la faisabilité de ces propulseurs.

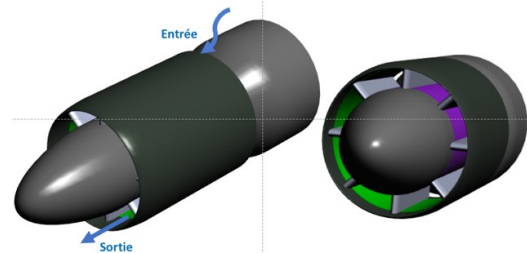


Figure 2 : Vues arrière du propulseur MHD annulaire intégré à l'arrière d'un sous-marin

Le propulseur annulaire intégré à l'arrière du navire, présenté en figure 2, comporte des électrodes internes en violet et externes en vert qui créent des courants radiaux. L'aimant supraconducteur, voir figure 3, est contenu dans un cryostat et il comporte ici un ensemble de 16 bobines qui sont assemblées pour former deux nappes de conducteurs parcourues par des courants opposés et parallèles à l'axe qui se ferment par les têtes de bobine. Le champ, naturellement confiné entre ces 2 nappes, est orthoradial. Les têtes de bobines sont carénées radialement comme le montre la figure 1.

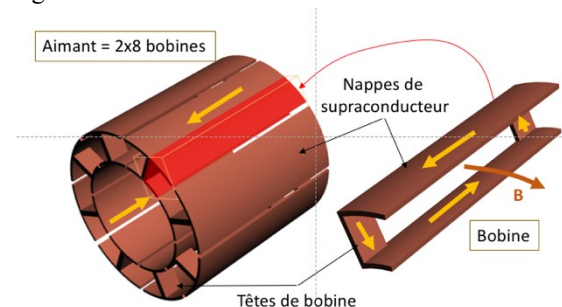


Figure 3 : Aimant en nappes de supraconducteur = assemblage de 16 bobines. Le champ généré entre les deux nappes de conducteur est orthoradial.

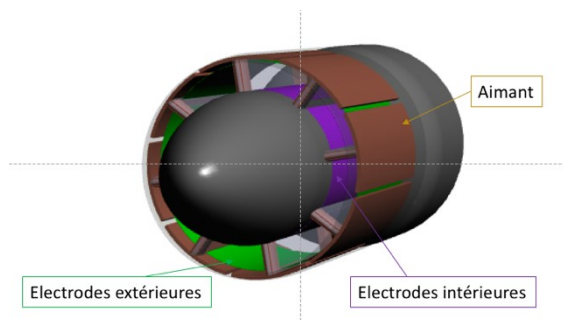


Figure 4 : Vue semi-transparente du propulseur complet.

Les forces générées par le propulseur complet, présenté en figure 4, sont pilotées en intensité et en sens (propulsif ou contra-propulsif) par l'alimentation des électrodes. Ces dernières peuvent être alimentées séparément suivant des secteurs angulaires et ainsi les forces produites sont distribuées autour du navire. Cette particularité permet de contrôler directement la manœuvrabilité du navire sans nécessité de barre ou de dérive.

## 2. Problématique

Comme le montre la figure 2, l'écoulement soumis au forçage électromagnétique dans cet espace annulaire est « ouvert » sur l'océan environnant. La MHD en eau de mer couple la mécanique des fluides avec l'électromagnétisme et l'électrochimie dans les limites de la réalisabilité technologique. Les termes de couplage dépendent des propriétés physiques du fluide dont la conductivité électrique apparente  $\sigma$ . La distribution de courants électriques au sein du propulseur résulte de la compétition entre le gradient du potentiel électrique  $\Phi$  appliqué aux électrodes et la force contre-électromotrice  $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$  liée au déplacement de l'écoulement conducteur dans le champ magnétique. Il s'agit ici d'un couplage faible dans la mesure où le champ magnétique d'induction  $\mathbf{B}$  n'est pas affecté par l'écoulement conducteur. Il ne dépend que de la géométrie de l'aimant supraconducteur. Le système d'équation à résoudre couple les équations de Navier-Stokes (1) avec un terme source : les forces électromagnétiques  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  avec la loi d'Ohm (2) qui met en évidence la compétition le gradient du potentiel électrique et la force contre-électromotrice. Enfin la conservation des courants électriques permet d'exprimer la distribution de potentiel électrique par (3).

$$(1) \quad \rho \frac{d\mathbf{U}}{dt} + \nabla p + \rho \mathbf{g} = \rho \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

$$(2) \quad \mathbf{J} = \sigma (\nabla \Phi + \mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

$$(3) \quad \nabla^2 \Phi = -\nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

Le mode de propulsion par réaction mis en œuvre est très différent de la propulsion par réaction dans l'air

des avions. En effet l'eau de mer est un liquide incompressible donc la conservation du débit impose que, à section de passage du propulseur constante la vitesse de l'écoulement reste constante. Les forces électromagnétiques se traduisent alors par un gradient de pression positif. Si l'on considère que l'écoulement sortant est à la pression  $p_{\text{sortie}}$  de l'océan ambiant (condition de sortie d'un jet libre), la pression d'entrée  $p_{\text{entrée}}$  du propulseur est plus basse que l'ambiante. Cette entrée est donc un « aspirateur » de l'écoulement externe au navire. Ainsi le débit massique  $q_m$  passant dans le propulseur, donc sa vitesse interne  $U$ , n'est pas connu a priori et dépend des conditions d'avancement du navire et de l'intensité du forçage. Le bilan propulsif du navire comporte donc une contribution de la dépression d'entrée additionnée d'un effet possible de survitesse du jet sortant. L'équation (4) donne une expression intégrale simplifiée de cette force propulsive  $F$ .

$$(4) \quad F = q_m (U_{\text{sor.}} - U_{\text{ent.}}) + S_{\text{sort.}} (p_{\text{sort.}} - p_{\text{ent.}})$$

## 3. Travaux en cours

Les calculs d'optimisation réalisés dans les années 90 ont mis en évidence des performances en rendement comparables, à bas régime ; à celle des propulseurs traditionnels avec cependant des courbes de rendement présentant un maximum généralement situé au premier tiers de la gamme de vitesse. La possibilité de concevoir un propulseur à électrodes segmentées (voir paragraphe 1) avait été proposée alors. Le paragraphe précédent illustre pourquoi les calculs à mener sont complexes puisque la fraction de l'écoulement passant dans le propulseur dépend de l'avancement du navire et de l'intensité du forçage alors que ce forçage est piloté par les courants, qui eux-mêmes dépendent de l'écoulement.

Pour parvenir à de nouveaux calculs de performance consolidés, une étape préalable consistera à déterminer une (ou des) géométrie(s) de propulseur de référence, en particulier de ses électrodes et de son aimant supraconducteur. Cette géométrie sera extrapolée à une première configuration 2D axisymétrique (distribution azimutale uniforme de l'écoulement et des forces électromagnétiques) qui permettra des simulations des divers régimes d'avancement : à vitesse constante ainsi qu'en phases d'accélération et de décélération. La configuration 3D complète sera ensuite utilisée pour des simulations destinées à évaluer le potentiel de manœuvrabilité résultant d'un forçage de distribution azimutale non uniforme.

En conclusion les prédictions de performances fiabilisées pourront être exploitées en vue d'entreprendre un programme de recherche et développement orientant la conception d'un navire à propulsion MHD.

#### 4. Références

- [1] O.M PHILLIPS. "The Prospects for Magnetohydrodynamic Ship Propulsion", *J. of Ship RES.*, 1962.
- [2] P. BOISSONNEAU & J.P. THIBAUT, "Experimental Analysis of Couplings Between Electrolysis and Hydrodynamics in the Context of MHD in Seawater", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32 (1999) 2387-2398.
- [3] MHDS 91, Proceedings International Symposium on Superconducting Magnetohydro-dynamic Ship Propulsion, Kobe, Japan, 1991.
- [4] P. BRINDZA, S. LASSITER, E. SUN & M. FOWLER; JeffersonLab; F. FORREST, A. PORHEIL, D. RAUMAGE, P-E. MALLARD, S. ANTOINE and V. SIGALO; SigmaPhi "Final Assembly and Factory Testing of the Jefferson Lab SHMS Spectrometer Quadrupole and Dipole Superconducting Magnets", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol 27, 2017.

# Moteurs et générateurs supraconducteurs

JEAN LEVEQUE, KEVIN BERGER, THIERRY LUBIN ET BRUNO DOUINE

GREEN, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, France

**Résumé :** L'histoire des machines supraconductrices a débuté dans les années 1960. La première machine fabriquée en 1967 était un alternateur entièrement supraconducteur utilisant des fils NbTi. Ensuite, les supraconducteurs à haute température (HTS) ont été découverts et ce fut le point de départ de nouvelles études sur les machines supraconductrices. Cet article passe en revue diverses topologies de moteurs supraconducteurs et de générateurs utilisant les supraconducteurs à haute température critique qui ont été étudié et réalisé au GREEN.

## 1. Introduction

Armature et sabot L'utilisation de fils supraconducteurs à haute température, pour les moteurs supraconducteurs peut conduire à de grandes économies de taille et de masse, ainsi qu'à une amélioration du rendement par rapport aux machines classiques. Les puissances envisagées sont généralement autour de quelques mégawatts pour des applications telles que la propulsion marine ou les éoliennes. Cet article présente les développements récents des moteurs ou générateurs supraconducteurs au GREEN.

## 2. Intérêt des machines supraconductrices

La majorité des machines supraconductrices sont synchrones à flux radial. Ce sont les machines pour lesquelles nous avons le plus de données permettant de mettre en évidence l'intérêt de la supraconductivité. La conception de ces machines est très proche de celle des machines classiques à pôles saillants. Leur particularité est l'enroulement supraconducteur de l'excitation. Généralement, l'induit est en cuivre même si il est possible de l'envisager supraconducteur. Dans un article récent [2], une comparaison est faite entre un moteur asynchrone de 3,8 MW - 180 tr/mn, un moteur à aimants permanents et supraconducteur. La comparaison de ces trois types de moteurs est visible donnée sur la figure 1 et montre les avantages en termes de rendement et de compacité des moteurs supraconducteurs.

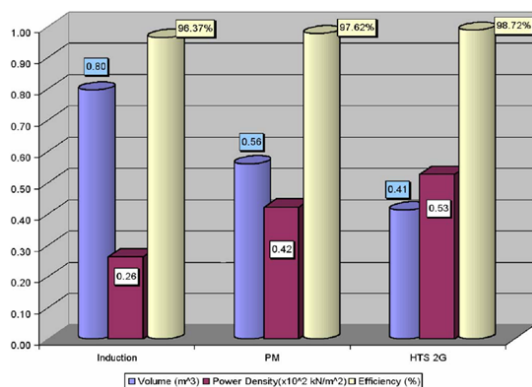


Figure 1 : Comparaison de trois types de moteur [2].

## 3. Moteur à déviation ou modulation de flux

Ces structures utilisent les propriétés d'écrantage des matériaux supraconducteurs pour moduler, concentrer ou dévier un champ magnétique. Ces machines ont des topologies de rotor atypiques.

### 3.1. Moteur à modulation de flux

Cette première structure proposée par le laboratoire GREEN, est composée de deux solénoïdes alimentés par des courants inverses, les champs magnétiques sont donc en opposition. Entre ces deux enroulements sont insérés des pastilles supraconductrices qui vont moduler dans l'espace le champ magnétique autour de l'inducteur. La conception et les essais d'un moteur basé sur ce principe ont été réalisés au laboratoire GREEN [3]. Cette topologie permet de créer une densité de flux magnétique élevée et donc d'obtenir un couple massique important.

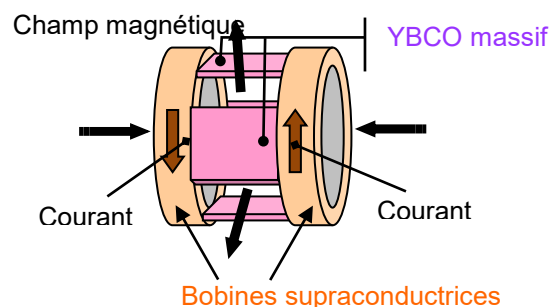


Figure 2 : Inducteur à modulation de flux réalisé au GREEN.

### 3.2. Moteur à barrière de flux

Cette seconde structure est également proposée par le laboratoire GREEN [3]. La géométrie est composée de deux solénoïdes supraconducteurs, alimentés dans le même sens. La variation de l'induction magnétique sur le contour de l'inducteur est obtenue par l'ajout d'un supraconducteur massif incliné, disposé entre ces deux

enroulements. Une structure de machine avec une paire de pôles est alors obtenue, et sa conception schématique est donnée en figure 3. Son principe de fonctionnement peut être assimilé à celui des machines synchrones à griffes. Ce moteur a été réalisé et testé avec succès au GREEN.

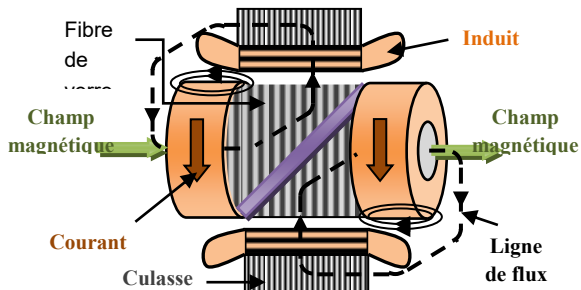


Figure 3 : Moteur à barrière de flux réalisé au GREEN.

#### 4. Moteur supraconducteur à flux axial avec transmission magnétique intégrée

Depuis quelques années, de nouvelles topologies de réducteurs magnétiques conjuguées à l'évolution des aimants permanents en termes d'énergie spécifique permettent d'atteindre des couples volumiques et/ou massiques très importants avec des rendements dépassant les 95%. Par rapport aux entraînements avec réducteur mécanique, ces transmissions de couple sans contact ont les avantages suivants : pas de fatigue mécanique, pas de lubrification, protection naturelle contre les surcharges, pas de pertes dues aux contacts mécaniques, pas de bruits acoustiques et rendement très élevé. Dans ce contexte, un moteur supraconducteur à flux axial avec un inducteur supraconducteur incluant un accouplement magnétique associant supraconducteur et aimants permanents a été réalisé et testé. Ce moteur développe une puissance de 1 kW à 750 tr/mn (figure 4, [4]).

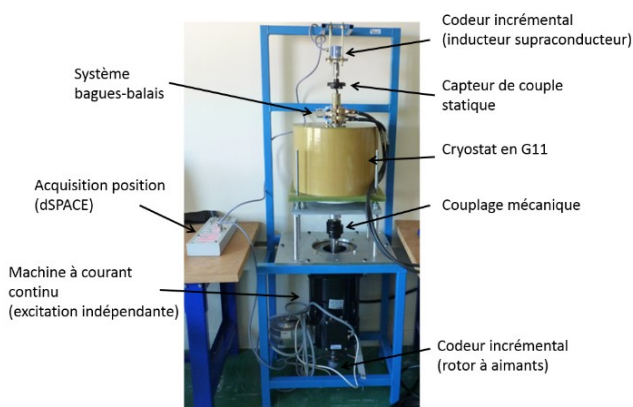


Figure 4 : Moteur supraconducteur incluant un accouplement magnétique supraconducteur, réalisé au GREEN.

#### 5. Conclusion

De nombreux moteurs supraconducteurs ont été étudiés et réalisés dans le monde. Ces moteurs sont le plus souvent des machines synchrones dont la structure est voisine de celle des machines classiques. Le GREEN possède la particularité d'étudier et de tester, avec le soutien de la DGA, des structures de machines totalement inédites. Un marché suffisant est désormais nécessaire pour pousser cette technologie et convaincre les utilisateurs finaux. Des produits normalisés, fils et bobines supraconducteurs sont également requis pour d'avantages d'applications industrielles.

#### 6. Remerciements

Les auteurs remercient la DGA d'avoir financé ces travaux.

# La roue de Grenoble, un instrument unique pour une technologie originale : le moteur linéaire

**GERARD COQUERY**

TACV, Sao-Paulo, Brésil ; IFSTTAR, Marne-La-Vallée, France

**Résumé :** Le laboratoire d'essais de la "Roue de Grenoble" a été construit vers 1972 pour la caractérisation des moteurs linéaires asynchrones destinés à la propulsion du véhicule sur coussin d'air conçu par Jean Bertin. Dimensionné par Creusot-Loire pour la validation expérimentale de la motorisation électrique du monorail "Aérotrain", ses caractéristiques restent étonnantes à ce jour : 12m de diamètre, 400km/h et une inertie correspondant à une masse de 25 tonnes reportée en périphérie. Ce moyen d'essais était et reste pertinent pour les validations et mise au point des systèmes linéaires innovant à grande vitesse en permettant de lever certains risques techniques et donc de réduire les risques financiers. Mais les projets de systèmes de transports par moteur linéaire ne sont plus d'actualité, au moins en France. Ce texte propose un court résumé de l'histoire de cet instrument, des travaux réalisés et la question de son devenir.

**Abstract:** The test laboratory "Wheel of Grenoble" was built in 1972 to test the linear induction motor dedicated at the propulsion of the air cushion vehicle invented by Jean Bertin. Designed by Creusot-Loire for the experimental validation of the monorail electrical traction of the "Aerotrain", its characteristics stay even today remarkable: diameter 12m, peripheric speed of 400km/h and 25 tons from inertia. This test bench was and stay relevant to set up innovative linear high-speed systems, allowing to avoid technical and financial risks. However, ground transportation project using linear motor are today cancelled in France. This paper is a short summary of this instrument, of the research works done, and the question of its future.

**Mots clés :** Banc d'essai moteur linéaire, banc d'essais grande vitesse, roue inertielle

## 1. Introduction

Les années 1960-1970 ont été animées par de grands projets de transports très innovants. Entre TGV et Aérotrain la décision n'a été prise par l'État qu'en 1974. Jean BERTIN a réussi une brillante démonstration de la faisabilité d'un système de transports sur coussin d'air avec son "Aérotrain" (un rapport de 1977 rapporte l'équivalent de 100 000 kms parcourus et 26 000 passagers embarqués). Mais il attendait un moyen de propulsion silencieux et propre : le moteur électrique linéaire. La complexité de l'étude d'un système de propulsion par moteur linéaire réside dans son dimensionnement et sa mise au point qui nécessite la construction d'une voie d'essais à grande vitesse de plusieurs kilomètres.

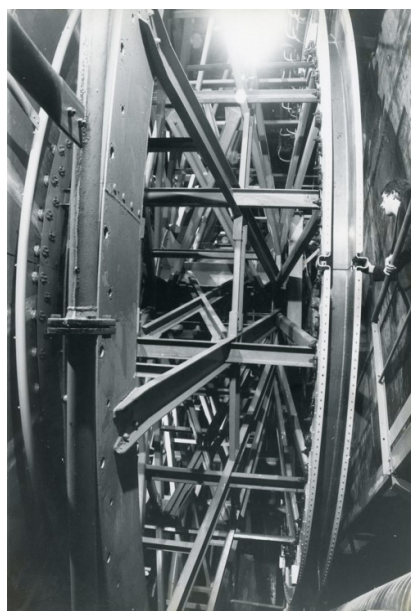
Lorsqu'il s'agit d'innovation technologique majeure, les ingénieurs conçoivent et utilisent des outils de simulation numérique et de validation expérimentale pour lever ou réduire les risques techniques et financiers.

Pour les systèmes de propulsions classiques, les moteurs électriques rotatifs et les transmissions de l'effort par les roues, la validation expérimentale est réalisée sur des bancs d'essais appliquant les conditions d'usage réelles. Dans le cas du moteur linéaire une partie du moteur est intégrée dans la voie et seule une expérimentation sur le site réel peut démontrer les performances attendues.

Aussi les concepteurs de cette machine électrique spéciale, devant les risques élevés de cette première mondiale d'une application grande vitesse, ont voulu

valider les performances du moteur linéaire à grande vitesse avant la réalisation sur la voie d'essais de l'Aérotrain.

Il a été ainsi imaginé de construire une grande roue à la périphérie de laquelle serait installé l'induit correspondant au moteur étudié.



**Figure 1 :** Photographie de la Roue de Grenoble 1979  
(Source IFSTTAR)

## 2. Les essais à grande vitesse des moteurs linéaires

Cette roue a été construite par Creusot-Loire à l'initiative de la société "Le Moteur Linéaire", créée pour concevoir et réaliser ce moteur pour Bertin, ce site d'essais a été repris par l'IRT<sup>1</sup> en 1981. L'institut a eu alors mission de poursuivre les travaux de recherche sur les moteurs linéaires asynchrones.

Il faut noter les résultats acquis et oubliés à ce jour, par ce moteur à induit en U inventé par Jean Guimbal. Un prototype réalisé par la société CELDUC a atteint en 1979 la vitesse de 180km/h alimenté directement sur le réseau triphasé, en 1984 la vitesse de 300km/h est atteinte avec un moteur alimenté par un onduleur MLI à thyristor d'une puissance d'un mégawatt, Citons encore la propulsion d'une plateforme sous-marine pour le bassin des carènes pour la DGA en 1982. L'ensemble de ces travaux ont été mené par l'IRT sous la conduite de Jean Pierre Pascal. Les essais à 300km/h de 1984 ont été réalisés dans le cadre d'une coopération franco-allemande, les industriels allemands étant alors intéressés par cette technologie de moteur pour le projet "Transrapid", ont finalement opté pour le moteur synchrone bobiné dans la voie.

Le contexte de l'innovation du transport terrestre a alors évolué en France, le succès du TGV mis en exploitation en 1981 a fait abandonner tout autre financement de recherche par l'État en 1986. Toutefois, les acquis du moteur linéaire en U ont été valorisés par la propulsion de chariots automatisés de transport de bagages dans les aéroports, plus de 500 moteurs sont installés dans les années 2000.

## 3. Les essais sur les contacts roue-rail et pneu-chaussée

Le moyen d'essai de la Roue de Grenoble a alors perdu de son intérêt pour le moteur linéaire, mais la grande vitesse ferroviaire avait besoin d'approfondir la connaissance du contact roue-rail. La possibilité de faire défiler une voie à grande vitesse à poste fixe à donner l'idée aux chercheurs de l'institut, en 1986, de transformer la périphérie de cette grande roue en "voie d'essai" à double usage pour les études du contact roue-rail et du contact pneu-chaussée. Elle a donc été équipée d'une piste de largeur réduite dédiée aux mesures du comportement de ces interfaces, un carénage a été aménagé pour réduire l'effort de rotation.

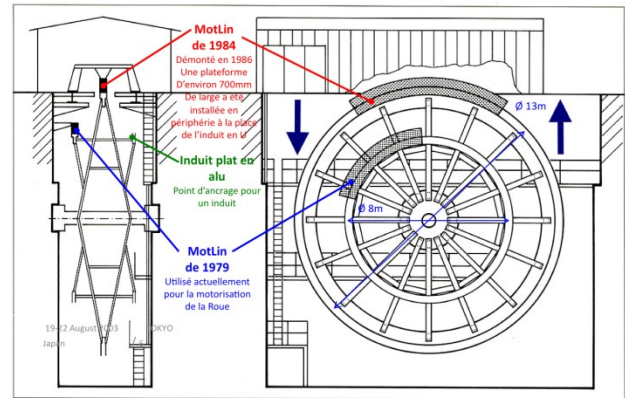


Figure 2 : Site de la roue de Grenoble (Source : IFSTTAR)

À la fin des années 1990, le laboratoire de la roue de Grenoble a ainsi permis d'élaborer et de valider des modèles comportementaux pertinents qui ont fait l'objet de nombreuses collaborations et publications entre INRETS<sup>2</sup>-SNCF-Alstom-RATP.

L'IRT ayant fait l'objet d'une fusion avec l'ONSER en 1985 pour créer l'INRETS, lequel a été lui-même regroupé avec le LCPC<sup>3</sup> en 2011, pour fonder l'actuel IFSTTAR<sup>4</sup>. Ce laboratoire de la roue s'est trouvé, de fait, exempt de travaux expérimentaux, les données de base acquises, les modèles validés, les outils de simulation numérique offrant une capacité d'études paramétriques pertinentes, la validation expérimentale ne semble plus nécessaire.

Les moteurs linéaires restent alors sans projets applicatifs significatifs. L'outil "Roue de Grenoble" devient une seule charge financière sans projets scientifiques et industriels pertinents, oublié des chercheurs, il est progressivement abandonné.

## 4. Quel avenir pour ce grand équipement

Cette roue de 12m de diamètre ne semble plus être porteuse de recherches expérimentales innovantes en France. La propulsion de moyens de transport par moteur linéaire ne fait plus rêver les ingénieurs, alors même que des projets de nouveaux systèmes à très grandes vitesses font la une de l'actualité. Ainsi les futuristes "Hyperloop" d'Elon Musk, attirent des investisseurs même parmi les grandes compagnies ferroviaires. La catapulte électromagnétique pour les porte-avions de l'US Navy est une technologie stratégique.

La jeune société TACV<sup>5</sup> et ses partenaires industriels, bénéficiant des expériences acquises, propose des innovations réalistes reposant sur des technologies de moteurs linéaires asynchrones en U qui offre par sa compacité un rapport poids/poussée exceptionnel et un rendement élevé. Citons quelques exemples civils et militaires : lanceur de drone, catapulte, booster et frein linéaire pour le ferroviaire,

<sup>2</sup> INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

<sup>3</sup> LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

<sup>4</sup> IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.

<sup>5</sup> TACV d.s.t Brazil : Track Air Cushion Vehicle (développement de systèmes de transport)

<sup>1</sup> IRT : Institut de Recherche sur les Transports

propulsion à grande vitesse sans contact avec le sol, transmission par induction à grande vitesse.... La roue de Grenoble reste un outil expérimental très efficace pour la validation de beaucoup des technologies d'interfaces sol-mobile à grande vitesse, et déterminant pour les projets de système de transport sans contact de TACV.

## 5. Conclusion et perspectives

Cet article a proposé un condensé de l'histoire de ce grand équipement d'essai qu'est la roue de Grenoble. Elle a permis la validation d'une technologie majeure pour la propulsion sans contact des véhicules terrestres : le moteur linéaire asynchrone à induit en U, lequel offre des performances remarquables.

Approchant des années 2020, les nouveaux matériaux de construction et les dernières technologies de l'électronique de puissance offrent la possibilité de concevoir des véhicules ultralégers guidés sur des infrastructures optimisées et de conception modulaire, pour lesquels une motorisation sans contact redevient un challenge technique. Que ce soit à sustentation magnétique ou par cousin d'air : absence de bruit, pas d'usure de la voie, voie surélevée supprimant l'effet de fragmentation du territoire, performance du système énergétique et automatisation, résilience au risque climatique..., autant de critères qui doivent exciter l'imagination pour la création d'un autre mode de transport pour les passagers, en particulier pour les pays ne disposant pas encore de réseaux conventionnels.

Disposer d'un moyen expérimental qui permette la validation des interfaces sol-véhicule, avec ou sans-contact, de ces systèmes restent un atout pour l'innovation industrielle, complémentaire des outils numériques dont nous disposons.

### Références

- [1] Système de Transport U-LIM-AS. Coopération franco-allemande, annexe E (synthèse des essais de 1984).
- [2] Le moteur linéaire enfin prêt, Science&Avenir, 1979.
- [3] G. Coquery, J. Sébillaud, Airport baggage handling system using U asynchronous linear motors, Maglev 2004, Shanghai.



# Micro-hybridation de turboréacteur : la solution à réluctance variable

ALEXANDRE GIRAUD<sup>1</sup>, IOAV RAMOS<sup>1</sup>, BERTRAND NOGAREDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NOVATEM SAS, Toulouse, France, [www.novatem-sas.com](http://www.novatem-sas.com)

**Résumé :** Cet article présente l'hybridation électrique d'un turboréacteur de faible poussée à l'aide d'un alterno-démarrreur. Ce dernier doit à la fois assurer le démarrage de la machine et la génération de puissance électrique à bord. L'environnement fortement contraint, les besoins en vitesse (>50 000 rpm) ainsi que la réversibilité de la machine électrique ont amené NOVATEM à développer une machine électrique spécifique. Cette machine a été conçue et optimisée avant d'être testée sur banc spécifique. Les principales étapes de son développement sont ici présentées.

**Abstract:** This article presents the electrical hybridization of a low-thrust turbojet engine using a starter-generator. The latter must both ensure the starting of the engine and the generation of the onboard electrical power. The highly constrained environment, the speed requirements (>50 000 rpm) and the reversibility of the electrical machine led NOVATEM to develop a specific electrical machine. This machine was designed and optimized and then tested on a specific test bench. The main stages of the starter-generator development are presented in this article.

**Mots-clés :** Machine à réluctance variable, hybridation électrique, turboréacteurs, alternateur

## 1. Introduction

L'électrification des avions et engins volants est un enjeu majeur car elle permet un gain de masse important, induisant donc un gain économique mais également écologique en réduisant la consommation de carburant et l'impact sur l'environnement [1]. L'utilisation de l'énergie électrique permet également une rationalisation de la consommation d'énergie en simplifiant la gestion de la puissance embarquée. C'est dans ce contexte qu'une hybridation de turboréacteur de faible poussée est proposée ici. Hybrider un turboréacteur de vecteur doit tout d'abord permettre de limiter la consommation de carburant, particulièrement lors son démarrage, tout en assurant la disponibilité de la puissance électrique et sa génération via des machines électriques intégrées aux propulseurs [2]. Ainsi, pour répondre à ces deux problématiques, une solution optimale et élégante est proposée : un système électrique à base d'un alterno-démarrreur permettant les deux fonctions, démarrage et génération électrique avec une seule machine tournante, entraînant un gain de masse et de coût, et une réduction du nombre de composants.

## 2. Conception de l'alterno-démarrreur

### 2.1. Choix de topologie de machines électriques

Exploitant l'interaction d'une source aimantée de manière permanente, généralement disposée au rotor, avec un champ tournant produit au stator, la machine à aimants permanents constitue une solution largement développée dans le monde aéronautique. Ses principaux avantages tiennent à la compacité de son

inducteur (la densité d'énergie magnétique des aimants terres rares est supérieure à 200 kJ.m<sup>-3</sup> comparé à une solution bobinée), conduisant à des performances très attractives en termes de couple massique et de rendement notamment. Mise à part la dépendance stratégique qu'introduit cette technologie (la Chine contrôle la production de 15 minerais dont 97% des terres rares [4]), les machines à aimants ne sont pas nécessairement adaptées à l'application à double fonction visée. Il s'agit en effet de concilier, au sein d'une même structure électromagnétique, un besoin en flux élevé à basse vitesse (afin de maximiser le couple disponible pour le démarrage) avec une limitation de la force électromotrice induite à haute vitesse (afin de ne pas trop contraindre le dimensionnement de l'électronique de puissance). En outre, en mode générateur il n'y a aucun moyen d'action simple permettant de couper le courant de défaut engendré par un court-circuit total ou partiel au sein du bobinage statorique en raison du flux magnétique permanent.

Basé sur un principe « d'aimantation induite » des plots ferromagnétiques constituant son rotor sous l'effet du champ produit au stator [5], la machine à réluctance variable constitue une alternative tout à fait séduisante à la solution à aimants permanents. En effet, la polarisation à saturation des pôles rotoriques permet d'exploiter un champ d'entrefer sensiblement plus élevé que dans le cas de l'inducteur à aimants terres rares (gain théorique de l'ordre de 30 à 50 %), conduisant à une amélioration sensible des performances en termes de couple massique. S'agissant de l'application ciblée, la simplicité structurelle de son rotor monobloc (aptitude naturelle au fonctionnement à haute vitesse), associée aux fonctionnalités qu'autorise cette technologie en termes de contrôle-commande (par

réglage des créneaux de courants d'alimentation en amplitude et en phase), s'avèrent particulièrement bien adaptées au double objectif de performance recherché à basse et haute vitesse.

## 2.2. Développement de l'alternateur-démarréur

La machine est dimensionnée par la fonction moteur (fonction démarreur) : la machine doit délivrer un couple de 2,5 Nm jusqu'à 10 000 tr/mn, et une puissance d'environ 3 kW jusqu'à 25 000 tr/mn dans un encombrement de 75 mm en diamètre et de moins de 50 mm en longueur. L'encombrement est ici essentiel car cette machine est montée dans le carter d'entrée d'air directement sur l'arbre machine, comme visible en vert sur la Figure 1.

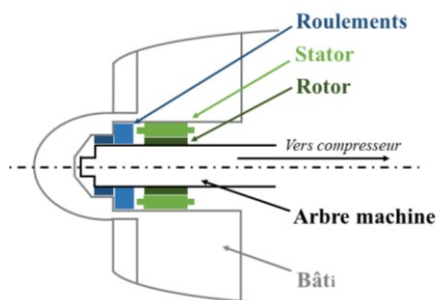


Figure 1 : Alternateur-démarréur sur l'arbre machine

La fonction alternateur doit pouvoir amener la machine jusqu'à 60000 tr/min. La figure 2 présente des photos d'un des prototypes réalisés avec le stator bobiné et enrobé, ainsi que le rotor, directement monté sur l'arbre machine du turboréacteur



Figure 2 : Gauche: Stator bobiné et enrobé - Droite : rotor monté sur l'arbre turbomachine

## 3. La problématique du capteur de position

Les contraintes d'intégration de la machine électrique au sein du turboréacteur interdisent le plus souvent de recourir à un capteur de position externe pour l'autopilotage des commutations de la machine électrique. A cette fin, NOVATEM a développé une solution de capteur directement intégré dans le bobinage permettant un contrôle précis et adaptatif des angles de commutation de la machine.

La solution développée présente l'avantage de ne pas augmenter le volume des parties actives de la machine électrique, tout en fournissant une information suffisamment précise ( $< 1^\circ$ ) position du rotor pour piloter la machine à réluctance de la manière la plus performante possible en mode moteur ou alternateur. Ce procédé a fait l'objet d'une protection par brevet [6].

## 4. Test et conclusion

Des mesures de puissance et de pertes ont été réalisées avec un banc d'essai hautes vitesses (entre 5000 tr/min et 60000 tr/min). Les pertes fer sont déduites des mesures de pertes mécaniques et électriques. Pour un des premiers des prototype (n°1), l'évolution des pertes fer en fonction de la vitesse est illustrée sur la Figure 3. Cette courbe témoigne manifestement d'un défaut au sein de la machine. En effet, les pertes fer atteignent, 690 W à 60000 tr/min ! L'analyse détaillée de ces pertes a conduit à incriminer l'isolement inter-tôles au sein du circuit magnétique rotorique. Ces courts-circuits étaient notamment provoqués par la découpe laser des tôles, entraînant des chemins de conductivité superficielle à la périphérie du rotor.

Pour remédier à cela, NOVATEM a mis en œuvre un nouveau procédé de réalisation basé sur la découpe par électroérosion. Grâce à un paramétrage optimisé de la machine de découpe au fil (réalisé dans les ateliers de NOVATEM), les pertes fer ont été ramenées à des niveaux satisfaisants dans un second prototype (n°2), comme visible sur la Figure 3.

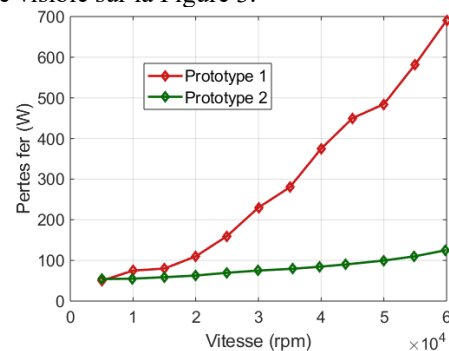


Figure 3 : Évolution des pertes fer avec la vitesse selon deux procédés de réalisation

Grâce à ces travaux, les derniers prototypes d'alternateur-démarréur réalisés par NOVATEM et intégrés au sein des turbomachines, présentent des performances tout à fait prometteuses, alliant une grande compacité (puissance massique 3,3 kW/kg) pour un rendement à faible vitesse supérieur à 80 %.

## 5. Références

- [1] Aldo BOGLIETTI, Andrea CAVAGNINO, Alberto TENCONI, Silvio VASCHETTO et Politecnico di TORINO, The safety critical electric machines and drives in the more electric aircraft: A survey. In Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE, pages 2587–2594. IEEE, 2009.
- [2] Etienne FOCH : L'avion tout électrique, une rupture technologique crédible. Revue 3 EI, (64):6–9, 2011.
- [3] David L. An., Critical Rare Earths, National Security, and U.S.-China Interactions: A Portfolio Approach to Dysprosium Policy Design. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2015.
- [4] Bertrand NOGAREDE, Electrodynamique appliquée, Dunod, 2007.
- [5] Demande de brevet déposée par BNCE NOVATEM n°PCT/FR2014/052227 du 09/09/2014

# Les lanceurs à rail pour applications de défense

**DR. PHILIPPE DELMOTE, FRANÇOIS BIETH, DR. MARKUS SCHNEIDER**

Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL), France

**Résumé :** Les lanceurs à rails, aussi appelés « canons électriques », permettent aujourd'hui d'accélérer des masses significatives à des vitesses supérieures à 2 km/s, surclassant nettement celles offertes par les meilleurs canons conventionnels. Il s'agit ici d'une véritable technologie de rupture, où le tir s'effectue à l'aide de l'énergie électrique et non de la poudre. Le principe sous-jacent est une application directe de la force de Laplace au cas d'un projectile conducteur parcouru par un courant et guidé par deux rails métalliques formant une boucle magnétique. L'utilisation de courants de plusieurs méga-Ampères permet d'atteindre des vitesses de bouche allant jusqu'à Mach 9. Cette gamme de vitesse offre des avantages clés en termes de portée, d'énergie cinétique à l'impact, et de distance d'interception dans le cadre de systèmes de défense contre les missiles modernes.

**Abstract:** Modern railguns offer the possibility to launch projectiles to speeds higher than 2 km/s clearly outperforming the best conventional guns. This real disruptive technology uses electrical energy and not powder. The underlying principle is a direct application of the Lorentz force. Here, a conducting part of the projectile connects a pair of metallic rails, forming a magnetic loop. The use of current amplitudes of several mega-Amperes allows to reach muzzle speeds up to Mach 9. Such projectile speeds offer key advantages in terms of range, kinetic energy at impact, and distance to interception in the context of modern missile defense systems.

**Mots clés :** Lanceur à rails, canon électrique, puissance impulsionnelle, force de Laplace

## 1. Contexte

Les accélérateurs électromagnétiques constituent des systèmes prometteurs pour la défense. Outre la minimisation des risques pyrotechniques via la suppression de la poudre propulsive, ils offrent la possibilité d'atteindre des vitesses de bouche supérieure à 2,5 km/s surclassant totalement les systèmes conventionnels. Ces vitesses de la munition offre des avantages clés. Tout d'abord, la portée se trouve décuplée et permet des actions offensives tout en restant à distance de sécurité. En permettant des frappes à plusieurs centaines de kilomètres, le canon électrique se place en alternative à une utilisation de missile beaucoup plus couteuse [1]. En tir tendu, l'énergie cinétique accumulée dans le projectile inflige des dégâts significatifs à la cible, même en l'absence de tête militaire explosive. Enfin, associés à une capacité multi-coups haute cadence, les canons électriques permettent d'effectuer des tirs de défense contre des projectiles adverses en vol. Ici, la vitesse très élevée des munitions rend possible des interceptions à plus grande distance, augmentant ainsi la marge de sécurité face à des missiles modernes toujours plus rapides [2]. Vis-à-vis des avantages offerts, et de la nécessaire intégration d'une source d'alimentation spécifique (énergie à délivrer de l'ordre de plusieurs centaines de mégajoules, dans des échelles de temps de quelques millisecondes [3]) les applications navales sont aujourd'hui principalement concernées par la technologie des lanceurs [4]. Bien que le concept du canon électrique remonte aux débuts du siècle dernier [5], son développement a été largement lié aux progrès des technologies de commutations et de stockage d'énergie électrique. Les installations de grande envergure restent rares et en Europe, seul l'Institut

franco-allemand de recherche de Saint Louis (ISL) dispose de moyens d'essais significatifs.

## 2. Armature et sabot

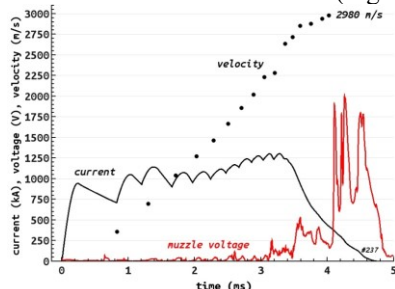
Le principe de base d'un lanceur électrique est une application directe de la force de Laplace. Un projectile conducteur (ou plutôt son « armature » propulsive, située derrière la munition proprement dite) vient fermer un circuit électrique formé par deux rails métalliques, eux même reliés à une source d'alimentation de forte puissance. Lors du déclenchement du tir, des commutateurs semi-conducteurs délivrent dans la boucle ainsi formée un courant dont l'amplitude et la durée sont spécifiquement optimisées. Le courant parcourant les différents conducteurs interagit avec le champ magnétique créé, et vient propulser l'armature le long des rails. La maîtrise des contacts glissants sous sollicitations extrêmes (vitesse, température, pression, ...) est un point critique. Différentes solutions techniques sont investiguées, telles que les brosses conductrices, les armatures de type C-shape ou même des solutions hybrides (Figure 1).



**Figure 1 :** armature hybride composée d'un premier étage à brosses cuivre et d'un second étage de type C-shape. La munition est disposée dans un sabot s'ouvrant en sortie de canon.

Avant le tir, l'ensemble armature-charge utile est inséré entre les rails à l'aide d'une presse, assurant un contact initial optimal. Au départ du coup, la force de Laplace se substitue à cette précontrainte mécanique en venant plaquer les bras ou les brosses de l'armature contre les

rails. La qualité du contact est évaluée expérimentalement en observant les tensions aux bornes des rails et la formation ou non de plasmas parasites [6, 7]. Les données du tir sont souvent synthétisées en un graphique unique vitesse/courant/tension de bouche (Figure 2).

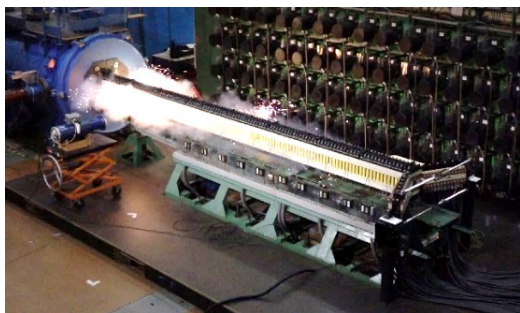


**Figure 2:** Courbes caractéristiques d'un tir (projectile C-shape de calibre 40x40 mm, masse 300 g, vitesse atteinte de 2980 m/s).

Les premiers essais sont réalisés à l'aide d'armatures lestées, simulant une charge utile. Ultérieurement, des sabots assurant le guidage et la protection mécanique d'une « munition type » sont testés [8].

### 3. Artillerie longue portée

La limite d'utilisation des canons d'artillerie conventionnels est aujourd'hui d'une quarantaine de kilomètres. Le lanceur à rails promet d'étendre cette portée au-delà de deux cents kilomètres ; une majeure partie de la trajectoire de vol se déroule à haute altitude afin de ne pas dissiper trop d'énergie cinétique dans les basses couches de l'atmosphère.



**Figure 3:** Lanceur NGL60 – calibre 60 mm x 60 mm lors d'un tir ; en arrière-plan le banc d'énergie 10 MJ de l'ISL.

### 4. Systèmes de défense à haute cadence de tir

Dans le cadre de scénarios « antimissiles », une des solutions classiques consiste à envoyer vers la cible un nuage de projectiles denses. Les systèmes conventionnels de type Phalanx ou Goalkeeper offrent des cadences de tir de l'ordre de 70 Hz avec des vitesses de sortie de bouche de 1100 m/s. L'ISL développe un canon électrique de 3 m, calibre carré 25 mm x 25 mm, offrant une capacité de tir en rafale. En mode mono coup, les performances atteignent 2400 m/s pour un projectile de 96 g [9]. Afin de valider un fonctionnement en salves, quatre pré-accélérateurs peuvent être montés en série en amont du canon principal. Ces derniers sont en fait des lanceurs ayant une très courte distance d'accélération et disposant de

leurs alimentations dédiées. Le projet dans lequel s'inscrit ce démonstrateur vise à atteindre une capacité de tir de 5 coups tirés à 50 Hz et à une vitesse de Mach 5.

L'accélération électrique permet d'envisager des séquences de tir évoluées. Par exemple, les projectiles peuvent être accélérés à des vitesses de bouche croissantes lors de la salve, afin de se regrouper au niveau de la cible.

### 5. Perspectives

Plusieurs défis technologiques sont à relever, et font déjà l'objet de recherches spécifiques. Le niveau de maturité des lanceurs est maintenant suffisant pour motiver de sérieuses études sur les aspects « sources électriques » (fiabilité, compacité, disponibilité, cadence de tir, ...) ainsi que sur les aspects « projectile » (aérodynamique, guidage, sabot, munition, ...). Pour autant, les développements sur les lanceurs ne sont pas terminés et des projets originaux, tel que l'usage de générateurs XRAM supraconducteurs pour l'alimentation et l'augmentation du champ magnétique entre les rails, sont soutenus par la DGA.

### 6. Références

- [1] S. Hundertmark, D. Lancelle, "A Scenario for a Future European Shipboard Railgun," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 43, no. 5, May 2015.
- [2] J. Gallant, T. Vancaeyzeele, B. Lauwens, B. Wild, F. Alouahabi, M. Schneider, "Design Considerations for an Electromagnetic Railgun Firing Intelligent Bursts to Be Used Against Antiship Missiles," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1179-1184, May 2015.
- [3] O. Liebfried, "Review of Inductive Pulsed Power Generators for Railguns," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1108-1114, July 2017.
- [4] L. J. Petersen, M. Ziv, D. P. Burns, T. Q. Dinh, P. E. Malek, "U.S. Navy efforts towards development of future naval weapons and integration into an all electric warship (AEW)," IMarEST Engine as a Weapon (EAAW) Int. Symp. U.K., London, U.K., Sep. 12-13, 2011.
- [5] Fauchon-Villeplee, "US patentschrift 1921 Fauchon-Villeplee," Mar. 1 1921. US Patent 1,370,200.
- [6] S. Hundertmark, G. Vincent, D. Simicic, M. Schneider, "Increasing Launch Efficiency with the PEGASUS Launcher," *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1607-1613, July 2017.
- [7] B. Wild, F. Alouahabi, D. Simicic, M. Schneider, R. Hoffman, "A Comparison of C-Shaped and Brush Armature Performance," *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1227-1233, July 2017.
- [8] S. Hundertmark, G. Vincent, D. Simicic, "Developing a Launch Package for the PEGASUS Launcher," *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, Vol. 45, No. 7, pp. 1234-1238, July 2014.
- [9] M. Schneider, C. Schuppler, F. Alouahabi, "Single shot performance of RAFIRA," *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, Vol. 43, No. 6, pp. 2100-2103, June 2017.

# Générateur XRAM à 1MJ en tant qu'alimentation impulsionnelle des lanceurs à rails

OLIVER LIEBFRIED, VOLKER BROMMER

Institut Franco-Allemand de Recherches de Saint-Louis (ISL), France

**Résumé :** Les canons électriques à grande échelle demandent des puissances de plusieurs GW pendant quelques ms, afin d'accélérer un projectile jusqu'à des vitesses de plus de 2000 m/s. Une telle puissance est mise à disposition par des composants de stockage d'énergie à forte puissance. Ceux-ci doivent être chargés par des sources électriques primaires, comme des batteries ou des convertisseurs connectés au réseau électrique. Les générateurs inductifs ont prouvé qu'ils pouvaient constituer une alternative aux bancs de condensateurs habituellement utilisés. Le principal défi à relever avec les commutateurs d'ouverture à fort courant est représenté par la méthode d'amplification de courant XRAM avec des commutateurs semi-conducteurs à forte puissance, fonctionnant selon le principe d'ouverture par un contre-courant. Un démonstrateur de générateur inductif de 1MJ est actuellement en développement à l'ISL et va servir de source d'énergie impulsionnelle pour un lanceur à rails.

**Abstract:** Railguns require electrical power in the GW-range during milliseconds, in which a projectile is accelerated to a velocity of more than 2000 m/s. Such power is usually provided by applying high power energy storages, which can be charged by available supply sources like batteries, a generator or a network connection. Inductive pulsed power generator have been proven to be a compact alternative to commonly used capacitor banks. The opening switch challenge is encountered by applying the XRAM current amplifying methodology and high power semiconductor switches, turned-off by an inverse-current injection. A demonstrator for a stored energy of up to 1 MJ is currently under development at ISL and will be used to supply a railgun at ISL.

**Mots clés :** Lanceur à rails, puissance impulsionnelle, commutateurs d'ouverture, stockage d'énergie, inductif, Générateur XRAM

## 1. Introduction

Les accélérateurs électromagnétique constituent des systèmes prometteurs pour l'artillerie de longue portée, ainsi que pour les systèmes d'armes rapprochés (CIWS : Close In Weapon System) pour la défense contre les projectiles hypersoniques [1, 2]. Dans les deux cas, une énergie électrique de plusieurs centaines de mégajoules doit être mise à disposition. Pour que cette énergie puisse être libérée sous forme d'impulsions d'une durée de quelques ms, une puissance de quelques gigawatts doit être générée. Les convertisseurs correspondants utilisent des accumulateurs de puissance de courte durée, comme des condensateurs diélectriques ou des bobines d'induction. Les premiers sont relativement encombrants pour stocker une telle énergie. De plus, ils nécessitent des chargeurs de condensateurs volumineux

et des bobines de mise en forme du courant impulsionnel (voir figure 1). Il s'avère que les accumulateurs à stockage inductif présentent une plus grande densité d'énergie que les condensateurs [3]. En optimisant la chaîne de conversion d'énergie, il est donc possible de réaliser une alimentation plus compacte, ce qui est d'une importance cruciale dans le cas de diverses applications sur des plateformes mobiles. Pourtant, un système inductif exige des commutateurs d'ouverture qui sont beaucoup plus difficile à réaliser, comme des commutateurs de fermeture (thyristors) sur les systèmes capacitifs. Pour cette raison, la contrainte électrique est répartie sur plusieurs étages / commutateurs selon le principe XRAM, dans lequel un courant de charge peut-être amplifié en fonction du nombre des étages. Un générateur XRAM utilise des commutateurs d'ouverture, à la base des thyristors de puissance, qui sont ouvert symétriquement via un contre-courant de courte durée [4]. La technologie XRAM a déjà été vérifiée en combinaison avec un lanceur à rails [5]. Elle est maintenant développée pour une énergie stockée de 1 MJ, afin de pouvoir effectuer des comparaisons directes avec un lanceur alimenté par des condensateurs.

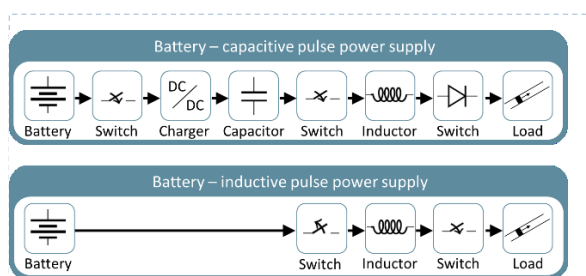


Figure 1: Chaînes de conversion d'énergie capacitive et inductive avec une batterie comme source d'énergie

## 2. Fonctionnement du générateur XRAM

La figure 2 présente un schéma simplifié, ainsi que des courbes de courant de principe d'un générateur XRAM à deux étages, utilisant des commutateurs

d'ouverture à thyristor. Lorsque les thyristors T1 et T2 sont enclenchés par des unités de gâchette, les inductances L1 et L2 sont chargées en série. En même temps, les diodes D11 à D22 s'opposent à un courant pouvant circuler dans le circuit de décharge. Dès que le niveau maximum de courant est atteint, le thyristor principal TCC est enclenché et les condensateurs CCC1 et CCC2 se déchargent par T1, T2 et la charge (LL, RL). Par conséquent, les commutateurs T1 et T2 sont ouverts et le courant commute du circuit de charge vers le circuit de décharge. Les diodes DCC1 et DCC2 protègent les thyristors au moment critique de la coupure de courant. En appliquant ce principe de commutateur d'ouverture, il est possible d'éviter de forts pics de tension aux bornes des thyristors provoqués par de très forts taux de montée en courant. Une fois la phase de commutation terminée, la charge LL, RL est alimentée par les inductances L1 et L2 mises en parallèle. Etant donné qu'il s'agit d'une charge à basse inductance (par exemple : lanceur à rails), le courant de charge est amplifié en fonction du nombre d'étages du générateur XRAM. Dans le cas de la figure 2, l'amplification équivaut à un doublement.

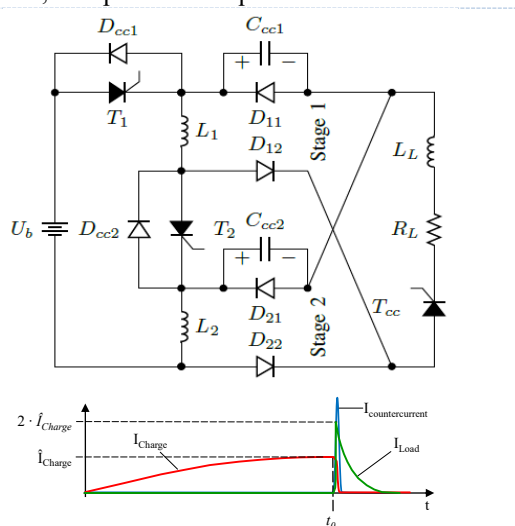


Figure 2: schéma d'un générateur XRAM à 2 étages et courbes de courant de principe.

### 3. Développement d'un générateur XRAM à 1 MJ

Les caractéristiques mécaniques et électriques de ce générateur sont listées au tableau 1. Il s'agit d'une bobine toroïdale (figure 3), qui permet d'éviter la formation d'un champ magnétique de dispersion. Elle est construite à base des disques de cuivre d'une épaisseur variable. Outre une grande stabilité mécanique, cette construction doit présenter une très faible résistance, afin d'éviter de fortes puissances de perte pendant une procédure de charge par alimentation de courant ( $U_b$ ). La construction modulaire de 20 bobines individuelles permet la réalisation d'un générateur avec différents facteurs d'amplification. Une bobine individuelle a été testée jusqu'à un courant impulsionnel de 120 kA, correspondant à une énergie de 136 kJ. La bobine entière a été testée jusqu'à 50 kA, ce qui correspond à 1,25 MJ.

Les commutateurs d'ouverture et de fermeture ont été réalisés avec des thyristors rapides (Fast Switching Thyristors) et des thyristors à commande optique (LTT : Light Triggered Thyristors). Les unités de gâchette sont contrôlées optiquement et permettent une commutation synchrone. Actuellement, un générateur XRAM de 10 étages est en phase de construction et il servira pour continuer le développement de la technologie des commutateurs et démontrer la faisabilité de ce système jusqu'à des énergies de 1 MJ.

Courant de charge @ 1 MJ	45 kA
Courant de décharge (@ 10 étages)	450 kA
Inductance totale	1 mH
Résistance DC	< 10 mΩ @ 20
Tenue en tension max.	5 kV
Amplification max. (étages)	20
Volume de la bobine	220 l
Poids de la bobine	1000 kg

Tableau 1 : caractéristiques du générateur XRAM à 1MJ

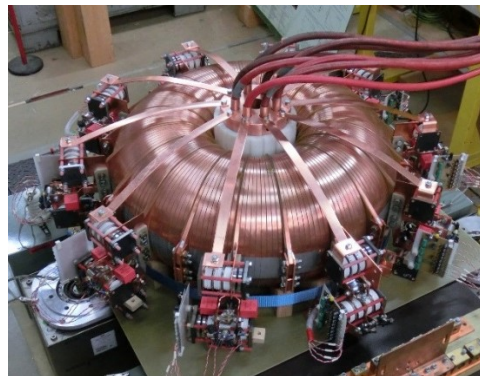


Figure 3 : montage actuel d'un générateur XRAM à 10 étages

### 4. Références

- [1] S. Hundertmark and D. Lancelle, "A Scenario for a Future European Shipboard Railgun," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 43, no. 5, May 2015.
- [2] J. Gallant, T. Vancaeyzeele, B. Lauwens, B. Wild, F. Alouahabi and M. Schneider, "Design Considerations for an Electromagnetic Railgun Firing Intelligent Bursts to Be Used Against Antiship Missiles," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1179-1184, May 2015.
- [3] O. Liebfried, "Review of Inductive Pulsed Power Generators for Railguns," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1108-1114, July 2017.
- [4] P. Dedie, V. Brommer and S. Scharnholtz, "ICCOS Countercurrent-Thyristor High-Power Opening Switch for Currents Up to 28 kA," in *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 536-539, Jan. 2009.
- [5] O. Liebfried and V. Brommer, "A Four-Stage XRAM Generator as Inductive Pulsed Power Supply for a Small-Caliber Railgun," in *IEEE Trans. Plasm. Sci.*, vol. 41, no. 10, pp. 2805-2809, Oct. 2013.

# HySPàC : la structure de recherche du CNRS sur l'hydrogène-énergie

CHRISTOPHE COUTANCEAU<sup>1</sup>, FERMIN CUEVAS<sup>2</sup>, DANIEL HISSEL<sup>3</sup>, CHRISTOPHE TURPIN<sup>4</sup>, OLIVIER JOUBERT<sup>5</sup>

<sup>1</sup>IC2MP, UMR7285 CNRS-Université de Poitiers, 4 rue Michel Brunet, TSA 51106, 86073 Poitiers cedex 9

<sup>2</sup>Université Paris Est, ICMPE (UMR7182), CNRS, UPEC, F-94320 Thiais

<sup>3</sup>Univ. Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, Fédération FCLAB, CNRS, 90010 Belfort Cedex

<sup>4</sup>LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

<sup>5</sup>Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), UMR 6502 CNRS-Université de Nantes, 2, rue de la Houssinière, BP 32229, 44322 Nantes Cedex 3

**Résumé :** Les De l'étude des matériaux à l'intégration système, en passant par l'électrochimie, la catalyse ou la chimie du solide, le Groupement de Recherche du CNRS "HySPàC" fédère la communauté académique française, dans la "production", le "stockage" et la "conversion" de l'hydrogène pour des domaines d'applications "stationnaires" et "mobiles" de ce combustible. Il apporte de nouvelles connaissances sur l'hydrogène et son utilisation comme carburant vertueux. Cet Article couvre toutes les facettes de HySPàC illustrées par quelques exemples de résultats montrant les forces de recherches académiques et partenariales sur le sujet.

**Abstract :** From the study of materials to system integration, through electrochemistry, catalysis or solid chemistry, the CNRS research grouping "HySPàC" brings together the French academic community, in the hydrogen production, storage and conversion activities for stationary and mobile applications. HySPàC provides new knowledge on hydrogen and its use as a virtuous fuel. This article covers all facets of HySPàC illustrated by some examples of results showing the strengths of academic research and partnership on the subject.

**Mots-clefs :** Hydrogène, stockage, piles à combustible, systèmes

## 1. Introduction

L'hydrogène joue un rôle capital dans la transition énergétique. Il aide à contourner les carburants fossiles, polluants. Très énergétique, il est utilisable dans de nombreux formats, pour la recharge de téléphones aux grandes demandes de véhicules. Cependant, au regard du niveau de maturité encore limité des technologies envisagées, des actions de recherche sont nécessaires. Pour faire face à ces questions, la France possède des expertises et des acteurs clés regroupés au sein du GdR du CNRS N°3652 HySPàC "Hydrogène, Systèmes et Piles à Combustible. HySPàC regroupe environ 400 chercheurs permanents, du CNRS, du CEA, de l'IFSTTAR, des universitaires et des industriels (EDF, ENGIE, Zodiac, Safran). Les 106 équipes constituant le GdR, reconnues au niveau international, interviennent ainsi sur la production d'hydrogène décarboné, sa purification et son stockage gazeux ou solide, sur les différents constituants des cœurs de cellules (membranes polymères, électrolytes céramiques, catalyseurs,

couches de diffusion, plaques bipolaires, etc.) et les systèmes (auxiliaires, gestion électrique, modélisation, diagnostic, hybridation, etc.) impliqués dans les piles à combustible basse température (PEMFC1, DMFC2, DAFC3, etc.) et haute température (SOFC4, ITSOFC5, PCFC6, etc.), et dans l'électrolyse de l'eau (PEMEC7, SOEC8).

## 2. Résultats

La production un hydrogène décarboné à bas coût est l'objectif actuel. L'électrolyse à haute température est la solution la plus prometteuse. Le déploiement de cette technologie à grande échelle

<sup>1</sup> PEMFC = Proton Exchange Membrane Fuel Cell

<sup>2</sup> DMFC = Direct Methanol Fuel Cell

<sup>3</sup> DAFC = Direct Alcohol Fuel Cell

<sup>4</sup> SOFC = Solid Oxide Fuel Cell

<sup>5</sup> ITSOFC = Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell

<sup>6</sup> PCFC = Proton Ceramic Fuel Cell

<sup>7</sup> PEMEC = Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell

<sup>8</sup> SOEC = Solid Oxide Electrolysis Cell

nécessite cependant de l'innovation de rupture (TRL 1 à 3) associant recherche fondamentale de pointe et développement technologique. Les innovations d'HySPàC ont porté notamment sur le remplacement des matériaux de cœur de cellules [1], sans altérer les performances actuelles et permettant une plus grande stabilité à long terme ou sous pression [2].

Les acteurs de HySPàC se concentrent aussi sur moyens de stockage innovants pour des applications mobiles et stationnaires sont à l'étude. Pour des applications embarquées telles que les vélos électriques, des matériaux nouveaux à base de magnésium ont été développés pour la production d'hydrogène à basse pression par réaction avec de l'eau [3]. Coté application stationnaire, et notamment pour la gestion de l'intermittence des énergies renouvelables, un stockage sûr, efficace et compact de l'hydrogène est recherché, soit au sein de composés solides (hydrures), soit dans des réservoirs sous pression. Ceci a été démontré très récemment par la conception et la construction des réservoirs moyenne pression (30 bars) permettant l'autonomie en énergie du refuge du Col du Palet (alt. 2600 m, Parc National de la Vanoise), tout au long de l'été [4].

En France, les premiers usages de la pile à hydrogène démarrent avec des flottes captives telles que des taxis (Hype) ou des utilitaires comme dans le cadre du projet Mobypost (FCLAB - FEMTO-ST [5]) où 10 véhicules (Fig. 1) ont été mis en service pendant plus de 2 ans. Cette flotte de véhicules a été conçue en fonction des besoins et contraintes réelles d'exploitation de La Poste. Ainsi, de la production d'électricité par des panneaux photovoltaïques installés sur site à celle d'hydrogène par électrolyse, à son stockage à bord dans des réservoirs à hydrures métalliques, jusqu'à la chaîne de traction électrique (hybride batteries - pile à combustible) et son pilotage, une optimisation systémique a été recherchée.

Une autre application des piles à combustible est le domaine du transport aéronautique. Le projet FUCHYA (2015-2018) qui a rassemblé l'IRT Saint-Exupéry avec Safran Power Units, Zodiac Aerospace et Airbus avait pour objectifs d'étudier le vieillissement et le diagnostic des PEMFC basses températures (80°C) et hautes températures (160°C). Il s'est poursuivi par PIPAA (2017-2021), piloté par SAFRAN Power Units et accueilli par la plateforme de tests du LAPLACE pour les

développements laboratoire, visant notamment à aller jusqu'à des démonstrations en vol [6].



**Figure 1 :** Véhicules Mobypost– Première flotte de véhicules à hydrogène déployée en France (Chaîne de traction intégrée @ FCLAB / FEMTO-ST / UTBM)

Malgré la maturité des piles PEMFC, ces générateurs de puissance électrique doivent encore gagner en compétitivité (coût, durabilité, fiabilité) et plusieurs verrous principalement amonts doivent être levés. Les objectifs des équipes HySPàC sont la diminution de la quantité de métaux nobles dans les électrodes, l'augmentation de la température de fonctionnement, la durabilité du système en fonctionnement et l'augmentation des performances électriques. Pour atteindre ces objectifs, des architectures innovantes d'électrodes [7] et d'électrolytes polymères [8] ont été développées, les mécanismes de dégradation ont été étudiés et des solutions de prolongation de vie des matériaux proposées [9].

### 3. Conclusion

Le CNRS à travers HySPàC a permis de développer des recherches à l'interface entre les différentes disciplines et susciter des échanges et des collaborations entre les chercheurs et générer des idées novatrices basées sur l'excellence des équipes dans leurs domaines respectifs.

HySPàC a été un formidable catalyseur de progrès scientifiques et technologiques, de la recherche amont (TRL 1-2) à appliquée (TRL3), jusqu'au transfert industriel (TRL8).

Ceci s'est notamment concrétisé par la création de startups (McPhy Energy, Mahytec, Sylfen, H2SYS...) dont la progression est spectaculaire et d'autres projets sont en cours de maturation.



#### 4. Remerciements

HySPàC remercie le CNRS notamment la direction de l'Institut de Chimie et L'Institut des Sciences de l'Ingénieur et des Systèmes pour leur aide dans la structuration de la filière Hydrogène.

#### 5. Références

- [1] C. Arrivé, T. Delahaye, O. Joubert, G. Gauthier, *Journal of power sources*, 223 (2013) 341-348 et A. Flura, C. Nicollet, V. Vibhu, A. Rougier, J.C Grenier and J.M. Bassat, *Electrochemica Acta* 231, 103-114 (2017).
- [2] L. Bernadet, G. Gousseau, A. Chatroux, J. Laurencin, F. Mauvy, M. Reytier, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (2015) 12918-12928. [5]
- [3] F. Mauvy, J.-L. Bobet, J. Sabatier et F. Bos « Use of a magnesium-based material for producing dihydrogen or electricity », Brevet WO2017060368A1, 2017
- [4] <http://parcdelavanoise.blogspot.com/> et <http://www.mahytec.com/fr/mahytec-livraison-colpalet/> [accès le 7 juin 2018]
- [5] D. Hissel, *Revue de l'Electricité et de l'Electronique*, vol. 2018-2, pp. 4-9, 2018.
- [6] C. Turpin, Keynote, IDHEA 2016, International Discussion on Hydrogen Energy and Applications, 2-4 Novembre 2016, Nantes, France
- [7] D. Dru, S. Baranton, J. Bigarré, P. Buvat, C. Coutanceau, *ACS Catalysis* 6 (2016) 6993-7001
- [8] H.-D. Nguyen, J. Jestin, L. Porcar, C. Iojoiu, S. Lyonnard, *ACS Appl. Energy Mater.* 1 (2018) 355-367.
- [9] L. Dubau, L. Castanheira, F. Maillard, M. Chatenet, O. Lottin, G. Maranzana, J. Dillet, A. Lamibrac, J.-C. Perrin, E. Moukheiber, A. Elkaddouri, G. De Moor, C. Bas, L. Flandin, N. Caqué, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 3 (2014) 540-560. 10.1002/wene.113

# De l'hydrogène-énergie pour la mobilité lourde

## Application au banc d'essais mobile ECCE et à la traction ferroviaire

DANIEL HISSEL\*, MICHEL AMIET\*\*

\* Univ. Bourgogne Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, Fédération FCLAB, CNRS, 90010 Belfort Cedex – [daniel.hissel@univ-fcomte.fr](mailto:daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

\*\* Direction Générale de l'Armement, 60 Bd du Général Martial Valin, 75509 Paris Cedex 15 - [xpert.amiet@gmail.com](mailto:xpert.amiet@gmail.com)

**Résumé :** L'hydrogène, vecteur énergétique dual à l'électricité, apparaît aujourd'hui comme une alternative crédible aux carburants d'origine fossile. Pour évaluer les potentialités de ce vecteur énergétique à échelle 1, la DGA s'est engagée pour faire évoluer le banc d'essai mobile ECCE, véhicule hybride de 13 tonnes, en participant à l'installation sur ce véhicule d'une pile à combustible de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) destinée à la propulsion du véhicule. Par ailleurs, la DGA a également expérimenté la même pile à combustible à bord d'un locotracteur, en partenariat avec la SNCF. Ces projets collaboratifs ont permis de maîtriser de nombreux aspects scientifiques et technologiques dans la conduite et le pilotage de véhicules hybrides à hydrogène associant sources d'énergie permanente, transitoire et impulsionnelle.

### 1. Introduction

Les véhicules électriques présentent des performances dynamiques largement supérieures à celles des véhicules mus par un moteur à combustion interne mais ils sont fortement pénalisés par leur autonomie. La DGA est donc particulièrement intéressée à tester les différentes structures et les composants d'un véhicule hybride de forte puissance.

Cette démarche a conduit tout d'abord à la conception, à la construction et aux essais du Banc ECCE (Banc d'Evaluation des Composants d'une Chaîne Electrique), fruit d'une collaboration sous l'égide de la DGA entre des industriels et des laboratoires universitaires et publics. Le financement du projet, conçu en 1994 et concrétisé en 1998 par la signature d'une convention, a été apporté par la DGA, les collectivités régionales et locales de Franche-Comté et de Lorraine, les sociétés ALSTOM, AREVA et ARQUUS, les laboratoires FEMTO-ST, GREEN et LTE et la fédération FCLAB. Différentes évolutions du banc ECCE ont suivi ces premiers développements, jusqu'à l'installation d'une pile à combustible de forte puissance à bord (source permanente), aux côtés de supercondensateurs (source impulsionnelle) et de batteries (source transitoire). Cette même pile à combustible a également été évaluée sur un locotracteur (locomotive de manœuvres) en partenariat avec la SNCF.

Les objectifs scientifiques visaient à identifier les contraintes d'association de ce type de sources et les modalités et stratégies de pilotage temps réel associées. D'un point de vue plus technologique, le choix de l'architecture électrique la plus adaptée au regard de l'usage, la définition des protections associées, ainsi que les questions normatives ont été particulièrement investigués.

L'expérience acquise a ici été mise à profit pour des véhicules électriques à hydrogène, militaires et civils.

### 2. Présentation des travaux

Le Banc ECCE a été conçu pour tester différentes solutions de génération et de stockage d'énergie électrique, diverses solutions de motorisation, mais également différentes solutions de gestion temps réel des flux énergétiques. Les contraintes de masse et de volume sont au second plan car il s'agit d'un laboratoire mobile. Compte-tenu de la taille et de la masse du véhicule, les puissances mises en jeu doivent donc être en conséquence. Nous nous intéresserons ici en particulier à l'architecture électrique associant système pile à combustible, supercondensateurs et accumulateurs électrochimiques (au Plomb en l'occurrence).

Le schéma de principe de la figure 1 détaille l'architecture électrique du véhicule ECCE dans cette configuration. La structure présente quatre roues indépendantes donc sans liaison mécanique entre elles. La puissance nominale aux roues est de 4x30 kW. Au niveau du bus DC, le choix s'est porté sur une tension de  $\pm 270V$ . La tension de 540V correspond au 230/400V alternatif redressé. La tension du bus continu est fixée directement par les batteries et peut donc varier selon l'état de charge de celles-ci, entre 430 et 620 volts.

Eu égard à la quantité d'énergie nécessaire et au coût des batteries, le choix s'est porté sur des batteries au plomb type énergie. 90 éléments (6V ; 98Ah) ont été mis en série pour former deux groupes et le point commun est relié à la masse du châssis.

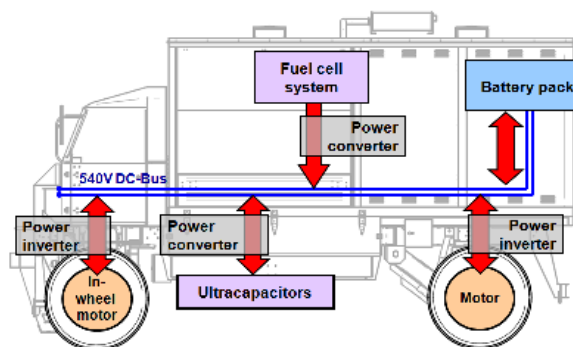


Figure 1 : Architecture électrique ECCE

Les supercondensateurs permettent de stocker de l'énergie et de la restituer très rapidement. Ce sont donc des éléments de stockage d'énergie de type impulsif. Deux packs de 30F supportant chacun une tension de 270V sont mis en série et connectés au bus continu au moyen d'un convertisseur DC/DC. Les packs sont conditionnés avec les systèmes d'équilibrage et de refroidissement. L'énergie stockée dans les supercondensateurs est suffisante pour maintenir la tension du bus continu suite à un appel de puissance de 40kW pendant 9s. Le système pile à combustible (PAC) est composé de 2 stacks de type PEMFC de 110 cellules de surface active 760 cm<sup>2</sup>. Chaque PAC est alimentée en air et hydrogène et est connectée au bus 540V via un convertisseur DC/DC.

Sur la figure 2, on aperçoit à gauche le système PAC et au milieu les échangeurs eau-air pour le refroidissement (en effet, bien que le rendement électrique d'une pile à combustible soit très élevé, près de 50% de l'énergie produite l'est sous forme thermique). L'alimentation en hydrogène est obtenue au moyen d'un cadre de 6 bouteilles d'hydrogène comprimé (200 bars) installé à l'arrière des échangeurs. Des capteurs d'hydrogène ont bien entendu été installés pour garantir la sécurité en cas de fuite.



Figure 2 : Vue du système PAC installé sur ECCE

Un tel véhicule électrique hybride est un système complexe, dans lequel des flux d'énergie de différentes natures sont mobilisés. La question qu'il faut donc se poser est celle de la gestion (en temps réel

généralement) de ces flux énergétiques. En effet, quelle que soit la qualité du dimensionnement initial du système hybridé, si cette gestion des flux énergétiques n'est pas appropriée, ses performances resteront limitées. La stratégie de gestion des flux énergétiques doit donc être choisie de manière à utiliser au mieux les performances et gérer les contraintes de chaque source énergétique disponible à bord. Ici, une stratégie de gestion, basée sur l'intelligence artificielle, a été retenue. La logique floue de type 2 a été retenue car elle présente l'avantage d'offrir la possibilité de manipuler l'incertitude explicitement ; autrement dit la logique floue de type 2 permet de modéliser et de minimiser l'effet des incertitudes sur le système. Il s'agissait, à l'époque de la mise en œuvre expérimentale sur le véhicule ECCE, d'une première mondiale dans le domaine du pilotage de véhicules électriques.

L'idée générale de la gestion d'énergie proposée ici vise à augmenter la durée de vie globale du système hybride de fourniture énergétique, tout en garantissant, bien évidemment la fourniture énergétique demandée par la chaîne de traction. Pour ce faire, il s'est agi de :

Respecter le bilan de puissances, en sollicitant en priorité les supercondensateurs (plus grande durée de vie), puis le système pile à combustible et enfin les batteries ;

Répondre aux variations dynamiques de la demande énergétique en priorité par les supercondensateurs et limiter la dynamique en puissance sur le système pile à combustible pour préserver sa durée de vie ;

Dans un état stationnaire, la puissance totale sera fournie par le système pile à combustible car c'est le système le plus rapidement et le plus aisément rechargeable ;

Asservir l'état de charge des supercapacités à la vitesse du véhicule, pour permettre la plus grande récupération énergétique possible à vitesse maximale (l'état suivant étant généralement une décélération) et la plus grande fourniture possible à vitesse nulle (l'état suivant étant généralement une accélération) ;

Limiter l'état de charge des batteries dans des valeurs déterminées.

Les résultats expérimentaux obtenus (figures 3 et 4) soulignent la tenue de ces objectifs et la capacité de l'hydrogène-énergie à proposer une alternative crédible aux carburants conventionnels, y compris pour des véhicules de forte puissance. On note en particulier la répartition des puissances fournies, en termes de dynamiques, entre la pile à combustible, les batteries au plomb et les supercondensateurs.

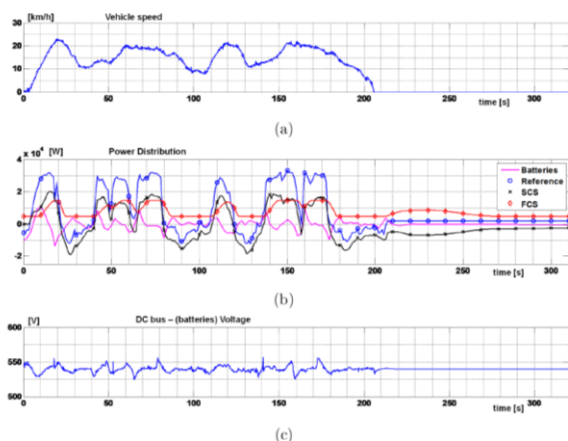


Figure 3 : Essais de roulage d'ECCE en configuration PAC/Scap/Batterie.



Figure 4 : ECCE en essais durant la phase d'évaluation de la chaîne de traction à hydrogène.

Au-delà de cette expérimentation sur le véhicule ECCE, cette même architecture électrique à hydrogène a également été validée pour la propulsion d'un locotracteur de la SNCF (la figure 5 propose une vue de l'installation lors de la mise sur bogies). En effet, les locomotives hybrides de type série sont utilisées depuis fort longtemps mais le moteur diesel, dimensionné pour un trafic en ligne, est très polluant à faible vitesse comme pour des opérations de triage. La solution de locomotive hybride avec système de stockage d'énergie électrique et groupe électrogène à hydrogène de faible puissance est alors une solution. Des batteries et des supercondensateurs sont utilisés pour fournir l'énergie transitoire et l'énergie impulsienne. La pile à combustible se charge à nouveau de fournir l'énergie permanente.

Là encore, les résultats obtenus à échelle 1 soulignent la capacité du vecteur hydrogène-énergie à apporter des solutions propres et efficaces pour la propulsion de véhicules électriques lourds. Ils soulignent également l'impérieuse nécessité de piloter les différentes sources énergétiques existantes à bord (permanente, transitoire, impulsienne), chacune en fonction de ses qualités propres.



Figure 5 : Mise sur bogies du locotracteur hybride SNCF dans sa version hydrogène.

### 3. Conclusions et perspectives

Soutenu notamment par la DGA, ce travail partenarial national a été remarquable et a permis de développer des solutions originales susceptibles d'être reprises sur de nombreuses applications, qu'elles soient militaires ou civiles.

Il a également servi de base technologique et scientifique pour souligner l'intérêt et les potentialités du vecteur énergétique hydrogène-énergie pour des applications de mobilité lourde et permis de mettre en évidence l'efficacité et les performances de l'intelligence artificielle pour le pilotage en temps réel des flux énergétiques à bord de tels engins. Aujourd'hui, la concrétisation commerciale est en cours, notamment dans le domaine ferroviaire (locomotive I-Lint développée par ALSTOM), pour des solutions propres et alternatives à l'électrification (coûteuse) de lignes.

### 4. Bibliographie

- [1] Kauffmann, J.M., Hissel, D., Amiet, M., "ECCE véhicule hybride : du militaire vers le civil", 3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle, vol. 64, pp. 74-81, 2011.
- [2] Solano, J., Hissel, D., Péra, M.C., "Fail-Safe Power for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, n°2, pp. 34-39, 2018.
- [3] Hissel, D., "Systèmes hydrogène-énergie : De la science-fiction à la réalité industrielle", Revue de l'Electricité et de l'Electronique, vol. 2018-2, pp. 4-9, 2018.

### 5. Remerciements

Les auteurs remercient les (très) nombreuses personnes ayant collaboré aux différentes phases de cette étude, doctorants, ingénieurs, chercheurs, en provenance des sociétés ALSTOM, SNCF, AREVA, ARQUUS, de la DGA, des laboratoires FEMTO-ST-CNRS, FCLAB-CNRS, GREEN, LTE-IFSTTAR, CEA, LEMTA-CNRS. Ils remercient en particulier le Pr. Jean-Marie Kauffmann, qui a initié le développement du banc ECCE, au milieu des années 1990.

# La pile à combustible : une alternative aux systèmes d'énergie embarqués actuels, fiable et écologique

**Résumé :** Les accélérateurs Safran est un leader dans le domaine des piles à combustible pour applications aéronautiques et Safran Power Units est son centre d'excellence. Safran Power Units prépare la commercialisation de la technologie pile à combustible avec le projet PIPAA.

## 1. Projets Hyport et PIPAA ou le premier aéroport zéro émission au monde

PIPAA (Pile à combustible Pour Applications Aéronautiques) est le projet porté par Safran Power Units dans le cadre du méta-projet HyPort de la Région Occitanie, qui vise à faire de l'aéroport de Blagnac le premier aéroport zéro émission au monde, grâce à l'énergie hydrogène. Ils font suite à l'appel à projets du ministère de l'Environnement français a lancé en 2016 pour le développement de « Territoires Hydrogène ».

Le projet PIPAA a pour objectif de mettre au point la technologie pile à combustible de Safran Power Units. Le générateur de pile à combustible, embarqué dans la soute, fournira de manière autonome la puissance électrique requise au sol pour les avions moyen-courrier de l'aviation commerciale, et en vol pour les avions d'affaires. Ce projet permettra également de valider l'ensemble d'une chaîne de distribution et d'avitaillement en hydrogène des aéronefs sur une plate-forme aéroportuaire.

Le projet a été officiellement notifié en novembre dernier par BPI France, qui financera ce projet à hauteur de 19,3 millions d'euros sur 5 ans. La totalité du projet représente un investissement de 51,6 millions d'euros.

Safran Power Units pilote ce projet avec comme partenaires easyJet, TRONICO (activités dédiées à l'électronique de puissance) et AD VENTA (pour le stockage et l'alimentation en hydrogène). Les partenaires s'appuieront sur les compétences techniques du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA), de l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) et de l'École Nationale de l'Aviation Civile (ENAC). Le projet a également été labellisé par le pôle Aerospace Valley.

## 2. Une première mondiale au service de l'aviation commerciale et de l'aviation d'affaires

Safran Power Units réalisera deux démonstrateurs :

- un premier démonstrateur pour satisfaire les besoins électriques au sol d'un avion commercial d'easyJet, ce qui permettra notamment d'alimenter le système de roulage électrique Safran Landing Systems de l'avion,

- et un second démonstrateur, destiné à fournir la puissance électrique requise par un avion d'affaires, au sol et en vol.

Les systèmes pile à combustible seront intégrés à l'architecture système des avions et donc reliés à leur réseau. De tests seront réalisés au sol, mais aussi en vol.

Ces essais seront une première mondiale : ils permettront de valider les briques technologiques de cette innovation. « Cette source d'énergie « propre » d'une grande autonomie sera à terme capable de fonctionner pendant toute la durée d'un vol, y compris d'un avion long-courrier et à haute altitude. Elle offre un rendement élevé et une grande flexibilité d'usage. Safran Power Units collabore avec les plus grands constructeurs d'avions de ligne et d'affaires sur les architectures système des avions afin d'optimiser la gestion des énergies et d'intégrer ce nouveau système à bord pour un usage au sol mais aussi en vol. D'ici 2019-2020, la pile à combustible sera prête pour de premières applications commerciales. Nous sommes fiers, une fois de plus, d'innover au service de nos clients » explique François Tarel, Directeur Général de Safran Power Units.

## 3. Démonstration technique : Safran Power Units pionnier

Durant 15 années de R&T, la société a testé plusieurs démonstrateurs fournissant différents niveaux de puissance, allant de 300 Watts à des puissances de 15 000 Watts. Des tests d'endurance de plusieurs milliers d'heures sur les composants critiques ont été réalisés, permettant de construire la stratégie R&T, dont l'objectif est d'atteindre un niveau TRL 6 (niveau de maturité nécessaire pour lancer un développement) d'ici 2020. Les performances de la pile à combustible ont ainsi été éprouvées en laboratoire avec succès, ce qui permet désormais de tester ce nouveau système pour des applications concrètes, en environnement réel.

## 4. Une solution innovante et écologique

La pile à combustible est un système de production d'énergie électrique non propulsive embarqué, autonome et silencieux :

Génération d'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Composants : pile à combustible, réservoir d'hydrogène gazeux, compresseur, convertisseur électrique et calculateur.

Facilité d'intégration à bord de tout aéronef.

Aucune émission polluante (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, particules).

La pile à combustible est une alternative capable de relayer – voire de remplacer – les solutions existantes (groupe auxiliaire de puissance, batteries) pour la fourniture d'énergie électrique. Son principe de fonctionnement, simple et très fiable, repose sur une

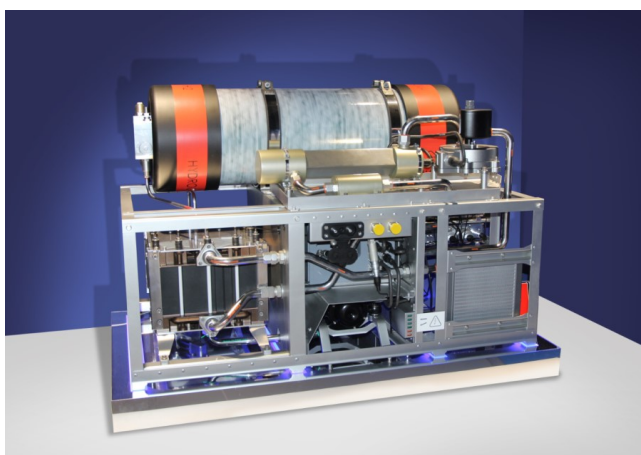
réaction chimique entre de l'oxygène et de l'hydrogène, qui produit un courant électrique, de l'eau et de la chaleur.

La pile à combustible permet de plus d'adapter le niveau de puissance électrique au juste besoin, en régulant la consommation d'hydrogène et d'oxygène. Elle peut ainsi répondre à des besoins variables, allant de quelques watts au mégawatt.

Compacte et légère, elle nécessite peu de câblages puisqu'elle peut être installée à proximité des sources de consommation.



© Safran Power Units – Philippe Stroppa  
Stack : Coeur de pile à combustible



© Safran Power Units – Angélique Brandan  
Générateur de pile à combustible exposé sur le stand de Safran lors du salon du Bourget 2017

# Les piles à combustibles pour la mobilité terrestre

**JOEL DANROC DEPUTY**

Manager CEA DRT Joel.danroc@ccea.fr

**Résumé :** Les piles à combustibles pour la mobilité sont en plein essor au niveau international avec un doublement des ventes tous les ans et l'implication forte de l'Asie et des US. En 2018 Monsieur le Ministre Nicolas Hulot a officiellement lancé « le plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique » qui comporte une feuille de route « recherche » présentée par le CEA mais impliquant l'ensemble des organismes de recherche nationaux. Le présent document décrit l'état de l'art de cette technologie pour les applications mobilité et sa place dans l'écosystème international de l'hydrogène.

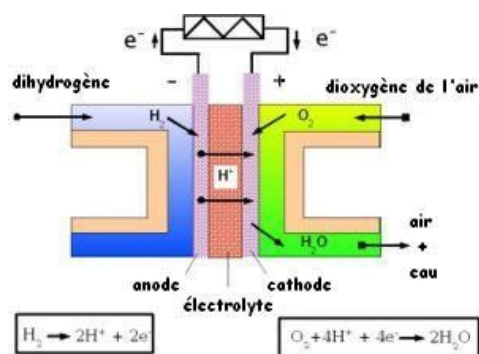
**Abstract:** Fuel cells for the mobility applications are rapidly expanding at the international level with a doubling of sales every year and strong implication of Asia and US. In 2018 Nicolas Hulot, Minister of the Ecological Transition, officially, threw "the plan of deployment of the hydrogen for the energy transition which contains a "road map research" presented by the CEA but involving the set of the national research laboratories. The present document describes the state of the art of this technology for the "mobility applications" and its place in the international ecosystem of the hydrogen.

## 1. Introduction

La mobilité routière est à 95 % assurée à partir d'énergie fossile pour des raisons liées à la facilité d'utilisation des carburants liquides « essence ou diesel » disponibles à des coûts limités. Les différents chocs pétroliers ont entraîné dans le passé le lancement par différents constructeurs automobiles de programmes de R&D de développement de véhicules électriques qui sont restés néanmoins à l'état de diffusion limitée. Les récents « plans climat » et COP visant à limiter les dégagements de CO<sub>2</sub> et surtout les résultats montrant sans ambiguïté le rôle nocif des gaz d'échappement sur la santé ont récemment poussé la diffusion des véhicules électriques à batterie et plus récemment des véhicules électriques à piles à combustible pour des applications routières, ferroviaires, marine en complément du marché stationnaire déjà lancé (250 000 chaudières de cogénération au Japon).

## 2. La pile à combustible

Le dix-huitième siècle a vu l'invention des piles à combustible dont le développement industriel a été effectué que beaucoup plus tard (1960). Les piles à combustibles utilisées pour le transport sont essentiellement des PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Le principe de fonctionnement est extrêmement simple : il s'agit de la réduction de l'hydrogène au sein d'un élément de pile avec production d'eau, d'énergie électrique et de chaleur (figure 1).



**Figure 1 :** Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

La réaction est catalysée par du platine et la température de fonctionnement est de l'ordre de 80 C. Les puissances de ces piles vont de l'ordre de quelques dizaines de mW au MW. Les durées de vie peuvent attendre 100 000 heures. Les rendements sont supérieurs à 50% soit deux fois le rendement des moteurs thermiques. Les piles actuelles font de l'ordre de 3kWe/litre et 3kWe/kg pour la pile ce qui explique leur développement pour les applications mobilité.

## 3. Les systèmes embarqués

Les piles à combustibles peuvent être utilisées en prolongateur d'autonomie (figure 2) de véhicules à batterie (puissance de 5 à 40 kW (exemple Kangoo ZE H<sub>2</sub> Symbio) ou en « Full Power » (100 à 400 kW : voitures Toyota (figure 3), Hyundai ou camions Nikola). L'hydrogène est stocké dans des réservoirs en composite à des pressions de 350 ou 700 bar dont le plein est effectué en 5 minutes. Les autonomies des véhicules varient de 500 à 600 km et peuvent atteindre 1000 km. Globalement les piles à combustible permettent à autonomie égale par rapport aux batteries de réduire le poids embarqué, d'accélérer la recharge,

de limiter la consommation en matériaux rares et enfin de maintenir l'autonomie en fonction des variations climatiques. Les développements technologiques des piles à combustible concernent la diminution des quantités de platine et la diminution du coût des membranes polymères et l'optimisation de la partie électrique. Les objectifs de coûts qui sont de l'ordre de 60 \$ par KWe pour les applications automobiles (durée de vie de l'ordre de 8000 h) sont atteignables avec des productions de un million de systèmes par an.



Figure 2 : RE-BEV



Figure 3 : FCEV

#### 4. Les marchés

Les marchés sont en pleine croissance avec une augmentation des applications pour la mobilité. A titre d'exemple, dès 2020 Toyota va produire 30 000 voitures par an Hyundai et Honda Daimler commercialisent de nouveaux modèles. Les taxis HYPE à Paris disposeront de 600 véhicules H<sub>2</sub> en en 2020.

- Le marché des camions se développe avec Toyota (Japon, US), Nikola (30 000 commandes), les bus Van-Holl, BYD ...L'armée américaine teste actuellement des véhicules GM.

- Le marché du rail : la moitié des lignes ferroviaires ne sont pas électrifiées ; à titre indicatif l'Allemagne a commandé 60 trains à pile à combustible Alstom pour remplacer les locomotives diesel en évitant ainsi l'électrification très coûteuse des lignes. Les premiers Tramway « H<sub>2</sub> » circulent en Chine.

- Actuellement 20 000 charriots élévateurs « H<sub>2</sub> » sont en fonctionnement, les vélos « Pragma » H<sub>2</sub> sont en vente.

#### 5. Les infrastructures de recharge H<sub>2</sub>

La diffusion des véhicules piles à combustible nécessite des infrastructures adaptées. Les analyses au

niveau de l'Europe ont montré que le coût de l'infrastructure H<sub>2</sub> est de l'ordre de celui de l'infrastructure des stations de recharge électrique dès lors que le nombre de véhicules atteint le chiffre de l'ordre de 7 millions. Les évolutions technologiques associées aux déploiements en masse rendront la mobilité H<sub>2</sub> parfaitement compétitive en terme de coût par rapport à « l'écosystème fossile /moteurs combustion interne » sans en présenter les inconvénients. Les infrastructures sont en cours d'installation en Asie (Chine, Japon Corée) aux US et en Europe (plus de 3000 en 2025).

#### 6. Conclusion

La mobilité individuelle et collective « H<sub>2</sub>/Piles à combustible » s'inscrit dans l'approche systémique du développement des énergies renouvelables et de leur stockage grâce à l'hydrogène. Dans ce cadre, l'hydrogène devra être produit à partir d'énergies renouvelables. L'étude Mac Kinsey effectuée pour le « H<sub>2</sub> Council » (initiative lancée en 2017 par des acteurs majeurs de l'industrie, de la mobilité et de l'énergie) prévoit la création plusieurs millions d'emplois pour la filière H<sub>2</sub> globale en 2050. Le plan « H<sub>2</sub> » lancé par Nicolas Hulot en 2018 confirme l'impulsion de l'état et le soutien de cette filière après des pays comme la Chine ou le Japon par exemple. Une feuille de route ambitieuse portée par le CEA mais intégrant l'ensemble des laboratoires de recherche nationaux a été validée ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la recherche dans le domaine du génie électrique. Les pôles de compétitivité dédiés à la mobilité et notamment MOVEO (dont fait partie le CEA LITEN) joueront un rôle important pour le déploiement de la mobilité H<sub>2</sub> sur les territoires. L'objectif est de créer une filière industrielle, créer une dynamique, faire naître et soutenir de nouveaux projets.



# La révolution dans les accumulateurs

M. MORCRETTE<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Réactivité et de Chimie des Solides (LRCS) CNRS UMR7314 Université de Picardie Jules Verne 33 rue Saint Leu, 80039 Amiens, France

<sup>2</sup> Réseau Français sur le Stockage Electrochimique de l'Energie (RS2E) CNRS FR 3459, France

<sup>3</sup> ALISTORE-ERI CNRS FR 3104, France

## 1. Contexte

Les accélérateurs électromagnétiques constituent des systèmes prometteurs pour la défense. Outre la minimisation des risques pyrotechniques via la suppression de la poudre propulsive, ils offrent la possibilité d'atteindre des vitesses de bouche supérieure à 2,5 km/s surclassant totalement les systèmes conventionnels. Ces vitesses de la munition offre des avantages clefs. Tout d'abord, la portée se trouve décuplée et permet des actions offensives tout en restant à distance de sécurité. En permettant des frappes à plusieurs centaines de kilomètres, le canon électrique se place en alternative à une utilisation de missile beaucoup plus couteuse [1]. En tir tendu, l'énergie cinétique accumulée dans le projectile inflige des dégâts significatifs à la cible, même en l'absence de tête militaire explosive. Enfin, associés à une capacité multi-coups haute cadence, les canons électriques permettent d'effectuer des tirs de défense contre des projectiles adverses en vol. Ici, la vitesse très élevée des munitions rend possible des interceptions à plus grande distance, augmentant ainsi la marge de sécurité face à des missiles modernes toujours plus rapides [2]. Vis-à-vis des avantages offerts, et de la nécessaire intégration d'une source d'alimentation spécifique (énergie à délivrer de l'ordre de plusieurs centaines de mégajoules, dans des échelles de temps de quelques millisecondes [3]) les applications navales sont aujourd'hui principalement concernées par la technologie des lanceurs [4]. Bien que le concept du canon électrique remonte aux débuts du siècle dernier [5], son développement a été largement lié aux progrès des technologies de commutations et de stockage d'énergie électrique. Les installations de grande envergure restent rares et en Europe, seul l'Institut

franco-allemand de recherche de Saint Louis (ISL) dispose de moyens d'essais significatifs.

## 2. Introduction

Dans cet article, sont présentés les différentes chimies des accumulateurs en les positionnant par domaines d'usage. Puis dans la seconde partie, les différentes pistes qui sont aujourd'hui traitées dans le RS2E (Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Energie) qui regroupe 17 laboratoires académiques français, les

centres de transfert de technologies (CEA, IFPEN, INERIS) et 18 industriels ([www.energie-rs2e.com](http://www.energie-rs2e.com))

## 3. La révolution Industrielle

Pour la première fois commercialisée par Sony en 1991, la technologie Li-ion poursuit son développement. Tout d'abord utilisée pour la téléphonie portable, leurs usages se sont démultipliés et on peut citer par ordre chronologique les ordinateurs, l'outillage portatif, les vélos, les véhicules hybrides et purement électriques et aujourd'hui les bus. Cette demande croissante a pu être satisfaite grâce aux investissements dans des outils de production en Chine, Corée ou Japon qui sont les trois seuls producteurs de batteries dans le monde et dans la synthèse des matériaux constitutifs de l'accumulateur. Précisons que la technologie Li-ion regroupe plusieurs familles avec des matériaux différents dont les caractéristiques vont être déterminantes pour les propriétés électriques, le vieillissement, le coût, la recyclabilité et la sécurité. On peut schématiquement les classer :

- La Technologie + LiCoO<sub>2</sub> / Graphite – est celle que l'on retrouve dans les téléphones et ordinateurs. Elle permet d'atteindre des densités d'énergie de 200 Wh/kg. Les réactions qui peuvent avoir lieu lors d'un emballement thermique ne permettent pas de l'intégrer dans des systèmes plus important.
- Les technologies NCA (LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub>) ou NMC (LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub>) / Graphite sont d'excellentes alternatives et s'imposent aujourd'hui dans la mobilité électrique. Elles permettent quand quelques pourcents de silicium sont ajoutés à l'électrode négatives en graphite d'atteindre 270 Wh/kg. Il faut noter que la forte croissance du prix du cobalt et les tensions géopolitiques de son extraction au Congo poussent les acteurs à trouver des solutions sans cobalt
- La technologie LiFePO<sub>4</sub> / Graphite est intrinsèquement moins performante en énergie spécifique. La sécurité plus importante mais surtout son vieillissement moindre permet

d'être aujourd'hui une solution pour le stockage stationnaire. Elle est aussi utilisée dans la mobilité électrique dans des flottes de véhicule et permet avec un design particulier d'être chargée très rapidement

- La technologie NMC / LTO ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ), encore moins dense, est quant à elle tournée vers des applications de puissance. Un exemple d'application est par exemple le bus électrique se rechargeant très rapidement typiquement 3 minutes en bout de ligne.

La croissance des volumes d'accumulateur mais également l'amélioration des densités d'énergie massique et volumique ont permis la chute impressionnante du coût des batteries passant de 1000\$/kWh en 2010, à 600\$ en 2014 pour atteindre en 2018 250\$/kWh avec des prévisions de 150\$/kWh vers 2025. Cette baisse des coûts permet aujourd'hui de développer les usages rendant par exemple le bus électrique très intéressant malgré la quantité de batterie embarquée ou encore le stockage stationnaire via des conteneurs remplis de cellules électrochimiques.

#### 4. Les pistes de recherche pour les prochaines générations d'accumulateurs

Un des objectifs du RS2E est d'accélérer le passage de la recherche à l'application. Pour cela, une unité de fabrication de cellule 18650 (cf photo) a été installée à Amiens et permet de démontrer dans des cellules représentatives, l'impact des découvertes faites dans le réseau dans un objet réel.



Ci-après les différentes orientations des recherches menées :

- **La sécurité**

La sécurité est un enjeu fort en particulier pour les usages grands publics comme le véhicule électrique. Ces 5 dernières années, des conducteurs ioniques solides ont été découverts avec des propriétés de conduction qui égales celles des électrolytes liquides actuellement utilisés. Il reste maintenant à maîtriser leurs manipulations car nombreux sont ceux qui ne sont pas stables à l'air, maîtriser les interfaces solides et enfin rendre la fabrication des accumulateurs avec des outils de procédé industriel. Ces électrolytes solides ouvrent potentiellement la voie à l'utilisation de matériaux alternatifs comme le lithium métal en remplacement du graphite (X10 en capacité spécifique)

combinés à des matériaux à haut potentiel permettant « théoriquement » d'atteindre entre 350 et 400 Wh/kg mais le chemin est encore long.

- **La densité d'énergie massique**

Une autre voie pour améliorer la densité d'énergie massique consiste à résoudre les problèmes des batteries Li-air ou Li/S. Alors que les batteries Li-air restent aujourd'hui à l'état de recherche fondamentale tant les verrous sont difficiles à résoudre, des prototypes de batteries Li/S (140 Wh/kg) sont actuellement produits (Oxys Energy) et testés. Les verrous restent un cyclage encore limité à la centaine de cycle lié à la formation d'espèces solubles de type polysulfure et une densité d'énergie volumique intrinsèque faible (/5 par rapport au Li-ion).

- **La densité de puissance**

Les supercondensateurs sont les dispositifs de choix pour remplir ces usages mais ils ne contiennent que peu d'énergie. Les pistes de développement et de recherche se tourne sur des systèmes hybrides intégrant un peu de stockage faradique et les Li-ion Capaciteurs (ou LIC) semblent être très intéressants et commence réellement à percer. Une autre alternative découverte il y a peu, consiste à remplacer le lithium par le sodium. Le couple électrochimique issu des travaux du RS2E et maintenant exploité par la société Tiamat devrait permettre d'ici deux ans de se positionner sur ces applications. Il faut noter que les batteries Na-ion ont également des tenues en cyclage très importantes.

- **Le coût d'usage**

La dernière grande piste étudiée est celle du stockage des énergies renouvelables qui requiert l'installation d'accumulateur de forte capacité et de puissance. On parle ici de MW et de dizaine de MWh, un facteur 100 par rapport au véhicule électrique avec des durées de vie de 20 ans (environ 7000 cycles). Les batteries de type Redox Flow dont le fonctionnement consiste à faire circuler deux électrolytes liquides aqueux contenant les espèces actives de type Vanadium par exemple remplissent partiellement le cahier des charges. Des recherches sont menées actuellement en utilisant des encres actives en milieu organique ou non pour améliorer une densité d'énergie encore trop faible. A noter également que des start up comme Zinium sur la technologie Zinc-Air issus des travaux d'EDF-R&D.

# STELLA – Système énergétique innovant pour la recharge des véhicules électriques

Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMONT, Hongwei WU

Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne (UTC), EA 7284 AVENUES,

Centre Pierre Guillaumat CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

E-Mail: [manuela.sechilariu@utc.fr](mailto:manuela.sechilariu@utc.fr) ; [fabrice.locmont@utc.fr](mailto:fabrice.locmont@utc.fr) . [hongwei.wu@utc.fr](mailto:hongwei.wu@utc.fr)

**Résumé :** Les émissions de gaz à effet de serre, produites par le secteur des transports, ont stimulé la croissance rapide de l'électromobilité. Néanmoins, cette nouvelle forme de mobilité nécessite l'installation d'infrastructures de recharge pour véhicules électriques (VEs). Cet article présente un système énergétique innovant et met en évidence les principaux enjeux de sa mise en œuvre. Le système énergétique proposé comprend trois éléments : une infrastructure intelligente pour la recharge des VEs (IIRVEs), une flotte hétérogène de VEs et un bâtiment relié à l'IIRVEs. L'IIRVEs est basé sur un micro-réseau intelligent optimisant les flux d'énergie conformément aux exigences du réseau public. Ce micro-réseau contient des sources photovoltaïques, de stockage, et prend en compte les stratégies suivantes : V2G (Vehicle to Grid, décharge des batteries des VEs dans le réseau public), V2H (Vehicle to Home, décharge des batteries des VEs dans un bâtiment) et I2H (Infrastructure to Home, l'énergie produite par l'IIRVEs et non utilisée par les VEs alimente directement le bâtiment). Ainsi, le système énergétique innovant offre de nouveaux services qui peuvent être associés avec l'électromobilité.

**Abstract:** Greenhouse gas emissions, produced by transport sector, have spurred the rapid growth of the electromobility. Nevertheless, this new form of mobility requires installing recharging infrastructures for electric vehicles (EVs). This paper aims at presenting an innovative energy system and highlighting the main issues for its implementation. The proposed energy system consists of three components: an intelligent charging station for electric vehicles (iCS\_EVs), a heterogeneous fleet of electric vehicles (EVs), and a building with a connection to the iCS\_EVs. The iCS\_EVs is based on a smart microgrid optimizing the power flows in accordance with the requirements of the public power grid. This microgrid contains photovoltaic sources, storage, and takes into account the following strategies: vehicle to grid, vehicle to building, and iCS\_EVs to building (energy generated by the iCS\_EVs and not used by the EVs directly feeds the building). Thus, the innovative energy system offers new services that can be associated with the urban electromobility.

**Mots clés :** Électromobilité, micro-réseau, énergie renouvelable, véhicule électrique, gestion d'énergie.

## 1. Introduction

À l'heure de la triple transition, énergétique, environnementale et numérique, la mobilité électrique est amenée à implanter en ville des infrastructures pour la recharge des véhicules électriques (VEs), mais aussi de nouveaux services associés. Dans un tel contexte, les problèmes suivants doivent être simultanément abordés : énergie partagée, énergie renouvelable, conception et dimensionnement du système énergétique, disponibilité du réseau électrique, diagnostic territorial, optimisation de l'implantation urbaine des infrastructures de recharge des VEs, mobilité électrique, interfaces numériques (échange de données), outils adaptés de régulation technique, sociale, juridique et/ou économique, impact sociétal et

réglementation. Quant aux batteries des VEs, de nouveaux services sont déjà envisagés qu'elles pourraient rendre tant à l'environnement bâti qu'au réseau électrique auquel elles sont reliées [1] : V2G (Vehicle to Grid, décharge des batteries des VEs dans le réseau public) et V2H (Vehicle to Home, décharge des batteries des VEs dans un bâtiment). Alors, on parle de flexibilité énergétique, de mutualisation de ressources et de mixité technico-fonctionnelle à différentes échelles. Actuellement on remarque un manque de maturité pour ces stratégies. Les travaux de recherche s'intéressent principalement à la structure de l'interface bidirectionnelle et à sa commande lors du passage en mode V2G ou V2H. Pour le mode V2G on remarque des études spécifiques [2]. Concernant la communication entre le VE et la borne de recharge,

certaines études analysent les modes de sécurité pour protéger les données des utilisateurs, d'autres s'intéressent aux méthodes d'identification des VE connectés aux bornes, ou encore aux performances de la connexion sans fil pour le mode V2G. Quant aux ombrières photovoltaïques (PV) qui injectent l'énergie produite, le mode V2G est utilisé pour pallier le caractère intermittent de l'énergie photovoltaïque. Par ailleurs, il n'y a pas d'algorithme d'optimisation technico-économique, les contraintes liées aux incertitudes et à l'utilisation du réseau électrique ne sont pas prises en compte, et l'interfaçage avec l'utilisateur n'est pas présent.

## 2. Système énergétique innovant pour la recharge des véhicules électriques

Le système énergétique innovant, proposé par le laboratoire AVENUES de l'UTC, est défini comme un groupement d'objets : une IIRVEs, une flotte hétérogène de VE et un bâtiment ayant une connexion à l'IIRVEs. L'IIRVEs est conçue sur la base d'un micro-réseau électrique intelligent capable de gérer de façon optimale les flux d'énergie [3]. Ce micro-réseau prend en compte les stratégies V2G, V2H et I2H (*Infrastructure to Home*, l'énergie produite par l'IIRVEs et non utilisée par les VE alimente directement le bâtiment), et ainsi propose de nouveaux services qui peuvent être associés. L'outil de régulation technico-économique concerne le contrôle optimisé des flux énergétiques du micro-réseau intelligent interconnecté avec le réseau public, le bâtiment environnant et les utilisateurs de VE et du bâtiment. La conception et la réalisation de cet outil font partie d'un programme de recherche en cours. Les résultats sont validés expérimentalement grâce à la plateforme technologique STELLA du laboratoire AVENUES, implantée en 2016 au Centre d'Innovation (CI) de l'UTC. STELLA est un démonstrateur de micro-réseau dédié à la recharge des VE et à l'alimentation d'un bâtiment. La figure 1 montre la plateforme STELLA qui repose sur des ombrières PV (28,9kW au nominal) couvrant neuf places de parking du CI, un stockage électrochimique et électrostatique, des dispositifs d'électronique de puissance, des connexions au réseau public et au bâtiment. Nous observons que ce système comporte trois types d'énergie ; une énergie permanente (réseau public et PV), une énergie transitoire (stockages Li-ion et Pb-acide) et une énergie impulsionnelle (supercondensateurs).

STELLA est aussi un lieu d'expérimentation pédagogique pour les élèves-ingénieur de l'UTC. De nombreux projets d'étudiants, encadrés par les enseignants-chercheurs, sont menés chaque semestre.



Figure 1 : STELLA (a) et image du laboratoire (b).

## 3. Conclusion et perspectives

L'IIRVEs et ses services associés représentent une innovation incrémentale par rapport aux ombrières PV existantes qui produisent de l'énergie propre mais en mode passif sans services auxiliaires. Des méthodes de dimensionnement et des interfaces intelligentes seront conçues et développées.

## 4. Remerciements

La plateforme STELLA a été réalisée grâce aux financements du FEDER et de l'UTC ; le projet de recherche a été labélisé par les pôles MEDEE et S2E2, et a été financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets Énergie Durable 2017 (#1766C0006).

## 5. Références

- [1] O. Erdinc, "Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households", *Applied Energy*, vol. 126, pp.142-150, 2014.
- [2] G. Duarte, C. Rolim, P. Baptista, "How battery electric vehicles can contribute to sustainable urban logistics: A real-world application in Lisbon, Portugal", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 15, pp.71-78, 2016.
- [3] M. Sechilariu, F. Locment, *Urban DC Microgrid: intelligent control and power flow optimization*, 1<sup>st</sup> ed., Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2016.

# L'électronique de puissance clef du développement de l'Industrie du futur

**OLIVIER COULON**

Consultant/Associé à DECISION Etudes & Conseil

L'électronique de puissance est au cœur des nouveaux besoins sociétaux du XXI<sup>ème</sup> siècle : développement durable, santé, sécurité, mobilité qui requièrent collecte de données, communication ainsi qu'énergie, puissance et contrôle/commande.

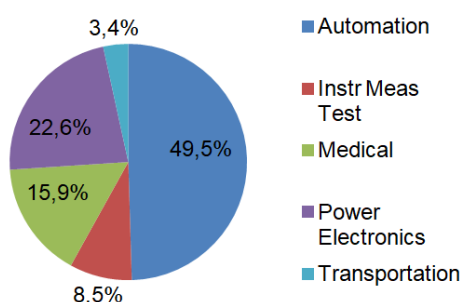
Elle est aussi l'instrument de la nouvelle révolution industrielle et sociale où la communication et les robots autonomes permettent flexibilité, efficacité et plus grande sécurité pour les opérateurs.

Tous les secteurs utilisateurs de l'électronique de puissance, l'industriel, le médical et l'énergie jouent leur rôle dans cette évolution vers une économie durable et une amélioration de notre mode de vie :

- L'automatisation industrielle et les services associés sont les outils de la révolution industrielle, où les robots communicants à travers l'internet des objets sont les principaux moteurs
- L'automatisation des bâtiments et la domotique ouvrent la voie à la rationalisation de l'économie nationale

Les compteurs intelligents vont consolider cela avec le réglage fin de l'utilisation de l'énergie par rapport aux besoins

**Répartition de la production mondiale en 2017**



Source : DECISION

Globalement ces marchés devraient croître à un rythme annuel supérieur à 5% sur la période 2016-2021. Cette prévision peut sembler prudente par rapport à d'autres mais il faut avoir à l'esprit que c'est un chiffre global où les segments dynamiques évoqués intègrent des segments matures ou en déclin ce qui tire la moyenne vers le bas.

Le monde connaît une période de changement radical de produits et de marchés régionaux matures vers de nouveaux produits et de nouveaux marchés. Les années à venir verront les marchés se déplacer de l'Ouest vers l'Est de l'Europe et les produits matures vers de nouveaux produits, systèmes et services qui permettront à travers les objets connectés et l'Intelligence artificielle de développer les nouveaux concepts d'industrie 4.0, de smart factories, smart buildings, smart cities et smart territories.

- L'électronique médicale assurera une vie plus longue ainsi qu'une vie plus saine dans la vieillesse, et assurera la surveillance, le diagnostic et les soins aux patients connectés
- Les alimentations électriques ont prospéré avec la croissance de l'électronique, mais les cordons USB peuvent remplacer au moins certains chargeurs de batterie ...
- L'énergie solaire, globalement une réponse efficace au développement durable, sera sans aucun doute un marché en croissance à travers le monde
- Le contrôle électronique de l'éclairage et les LED sont un autre moyen d'augmenter l'efficacité énergétique
- Le développement de l'agriculture intelligente entraîne une nouvelle révolution agricole, permettant de meilleurs rendements avec une irrigation et une fertilisation plus ciblées
- Le chauffage et la climatisation entrent dans une nouvelle phase où l'efficacité énergétique est primordiale

En particulier la période à venir ouvre une nouvelle ère de robots autonomes ou semi-autonomes qui pénètrent le marché domestique (aspirateurs, tondeuses, sécurité), l'industrie et le commerce (en particulier le matériel de manutention et la logistique), le transport (conduite autonome), le militaire et la sécurité (drones et autres robots pour l'armée de terre et la marine).

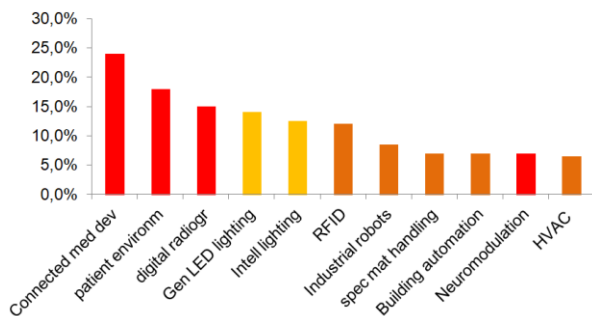
Régionalement les marchés matures (Europe, Amérique du Nord, Japon) croîtront plus lentement, autour de 4% par an, la Chine à 7% et les autres pays d'Asie à environ 10% par an soit deux fois la moyenne

mondiale. Ces différences de croissance conduiront à une érosion de la position dominante de l'Europe et des Etats-Unis qui représentent encore aujourd'hui la moitié du marché mondial.

Le mix-produit varie considérablement selon les régions : l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon ont une forte position dans la production de systèmes automatisés, la Chine est plus focalisée sur l'énergie et l'Amérique du Nord a aussi une position forte en électronique médicale.

Globalement, sur la période 2016-2021, le médical et l'énergie devraient croître plus rapidement que l'ensemble, autour de 6% par an et la mesure et le transport plus lentement, autour de 4% par an. L'automatisation, qui représente le segment le plus important, croîtra au même taux que la moyenne soit environ 5% par an.

#### Segments les plus dynamiques



Source : DECISION

La part de l'électronique dans les produits et les systèmes de l'industrie, du commerce et des ménages ne fera que s'accroître dans les années à venir. C'est particulièrement vrai dans le domaine de l'énergie où les unités décentralisées (éoliennes, énergie solaire...) requièrent des unités de contrôle et de conversion et où les composants électroniques (panneaux solaires, LED) peuvent être au cœur des systèmes.

Une autre évolution majeure est l'interdépendance croissante entre software et hardware. Les logiciels sont présents à tous les niveaux et aujourd'hui pratiquement tous les produits ont besoin d'un logiciel pour fonctionner et sont vendus avec leur logiciel intégré qui ne peut-être isolé. Les objets connectés ne feront qu'accroître cette évolution. La difficile distinction entre hard et soft et même services disparaît au sein de systèmes fonctionnels qui combinent les trois.

Les futurs développements seront caractérisés par le rôle croissant des technologies transverses qui concernent un large nombre d'activités économiques dans le champ de l'industriel de l'énergie et du médical. C'est le cas de l'internet des objets et de la RFID pour les robots autonomes, pour l'intelligence artificielle et le nombre croissant de systèmes

autonomes et pour des applications telles que la sécurité et la sûreté.

Pour l'Industrie du futur (Industrie 4.0), la révolution industrielle a été déclenchée par la transformation digitale, l'IoT, le Big Data et le Cloud computing. L'usine du futur sera une entité digitale où les machines, les pièces et les systèmes communiqueront. Elle sera capable d'auto-diagnostic, de prendre l'initiative d'une décision, d'adapter sa production, de fournir une assistance intelligente au personnel. Elle pourra être simulée au travers de modèles virtuels temps réel et elle contribuera à augmenter l'efficacité énergétique et la consommation de matières.

Dans ce contexte européen et mondial la France compte de nombreux atouts. Des industriels reconnus au plan mondial mais aussi une R&D accompagnée par les pouvoirs publics. Dans le domaine des composants électroniques et des semi-conducteurs soulignons en particulier l'accompagnement de la DGA (Ministère des Armées) sur la technologie du SiC (Carbure de Silicium) qui permet à la France d'être un leader dans cette technologie indispensable au développement de l'électronique de puissance.

*Auteur : Olivier Coulon – Consultant/Associé chez DECISION Etudes & Conseil, leader européen des études économiques pour les secteurs de l'électronique, de l'aéronautique, défense et sécurité.*

*Olivier Coulon a débuté son parcours professionnel en 2007 comme assistant du Chief Economist de STMicroelectronics. Il rejoint DECISION en 2008 en tant que consultant spécialisé dans les industries électroniques et aéronautique / défense et sécurité.*

*Olivier est responsable de l'ensemble des prévisions du secteur des équipements électroniques et, à ce titre, chef de projet du rapport World Electronic Industries actualisé régulièrement. Il est d'autre part directeur des études pour les secteurs aérospatiaux, défense et sécurité ainsi que les terminaux de télécommunications.*

*Olivier participe à l'ensemble des études conduites pour la Commission Européenne, soit la DG ENTR dans le domaine de la sécurité ou la DG CONNECT pour le secteur électronique.*

*Olivier est titulaire d'un Master 2 Recherche en Sciences Economiques de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.*

# Amortissement actif d'un convertisseur à découpage DC/DC

**FABIEN ROCHER, BRUNO CARVES-BIDEAUX**

fabien.rocher@mbda-systems.com, bruno.carves-bideaux@mbda-systems.com,  
MBDA, Le Plessis Robinson

**Résumé :** L'instabilité naturelle des convertisseurs de puissance associés à leurs filtres d'entrée peut être solutionnée par l'ajout d'un réseau de stabilisation passif ou, plus astucieusement, par une solution active basée sur une structure boost réversible.

## 1. Introduction

Cet article présente une solution innovante d'amortissement des filtres d'entrée sur les convertisseurs de puissance. Le système composé d'un filtre d'entrée de type L-C et d'un convertisseur de puissance régulé est instable et nécessite l'ajout d'un circuit d'amortissement. Celui-ci est usuellement composé de composants passifs, volumineux et coûteux. L'alternative consiste à remplacer ce circuit passif par un circuit actif. Les objectifs sont d'obtenir à la fois un gain de volume et de coût sur cette fonction sans dégradation des performances.

## 2. Problématique

Les convertisseurs de puissance à découpage nécessitent en entrée un filtre CEM composé de cellules L-C. Dans sa bande passante, le convertisseur, consommant une puissance constante, présente une impédance négative.

L'association du filtre CEM L-C et l'impédance négative du convertisseur de puissance crée un système instable.

## 3. L'amortissement passif de type R-C

Un circuit R-C en aval du filtre CEM permet la stabilisation, la résistance R permettant de contrer l'impédance négative et le condensateur C de couper toute consommation continue dans R

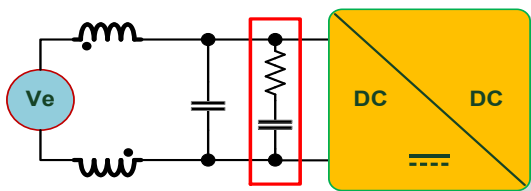


Figure 1 : principe de l'amortissement passif R-C

Cette solution éprouvée est contraignante : le condensateur doit avoir une capacité élevée et tenir la tension maximale d'entrée du système.

Des normes CEM militaires imposent des essais en susceptibilité conduite sur les lignes d'alimentation. Lors de l'injection de perturbations autour des fréquences de résonance du filtre, la puissance dissipée par le circuit d'amortissement peut être importante. La

résistance et le condensateur du circuit doivent donc être dimensionnés pour tenir ces stress.

## 4. Principe de l'amortissement actif

L'amortissement actif est un substitut au circuit R-C. Il s'agit d'un convertisseur à découpage présentant une impédance similaire au circuit passif R-C dans la bande de fréquence d'instabilité du système.

Le circuit utilisé est basé sur un convertisseur à découpage de type boost réversible.

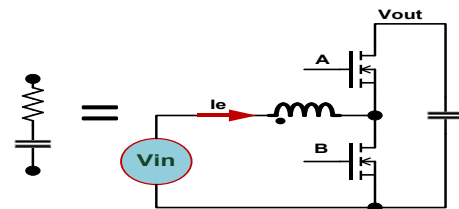


Figure 2 : principe de l'amortissement actif

La fonction principale de la boucle de régulation est de garantir un courant consommé  $I_{in}$  :

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R + \frac{1}{Cp}} = V_{in} \cdot \frac{Cp}{1 + RCp}$$

Avec R et C : résistance et capacité du circuit d'amortissement passif équivalent.

Un filtrage passe-haut de la tension d'entrée, permet de réaliser cette fonction

$$I_{REF} = V_{in} \cdot K \cdot \left( \frac{\tau p}{1 + \tau p} \right) \text{ avec } \tau = RC \text{ et } K = \frac{1}{R}$$

Le courant d'entrée du circuit est asservi par une boucle de régulation classique (correcteur PI et PWM) afin de suivre cette consigne  $I_{REF}$

La consigne  $I_{REF}$  est variable à des fréquences élevées. La bande passante de la boucle de courant doit donc être suffisante pour suivre cette consigne.

Une boucle de tension permet de réguler la tension de sortie du circuit d'amortissement actif. La tension de sortie doit être stabilisée à une valeur supérieure à la tension d'entrée sans impacter la fonction d'amortissement. La bande passante de la boucle de tension est très faible. La sortie du correcteur de la boucle de tension est additionnée à la référence de courant et permet ainsi de réguler la tension de sortie.

Le synoptique ci-dessous décrit le schéma global de régulation du circuit d'amortissement actif :

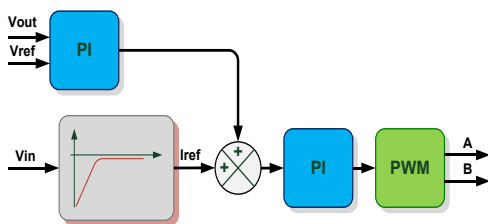


Figure 3 : principe de régulation de l'amortissement actif

## 5. Dimensionnement

### 5.1. Fréquence de découpage

La boucle de régulation du courant doit avoir une bande passante élevée. La fréquence de découpage est choisie bien supérieure à cette bande passante et conditionne le volume de l'inductance et les pertes du convertisseur boost, qui fonctionne même en l'absence d'agression

### 5.2. Courant d'amortissement maximal

Dans les applications militaires, les essais d'agressions conduites induisent un courant important dans le circuit d'amortissement actif qui doit donc être dimensionné pour supporter cette puissance.

Durant ces agressions, le courant dans le circuit d'amortissement est injecté dans le condensateur de sortie, faisant varier la tension à ces bornes. Le dimensionnement de ce condensateur est donc un compromis entre la tension maximale à ces bornes, impactant également les MOSFETs, et la valeur de la capacité.

### 5.3. Tenue aux coupures

Un circuit actif peut garantir une tenue aux coupures courtes de l'alimentation d'entrée. Le convertisseur boost réversible permet d'utiliser l'énergie stockée dans le condensateur de sortie pour alimenter le convertisseur principal.

Résultats :

Après validation de la fonction d'amortissement actif par simulation, une maquette a été réalisée :



Figure 4 : maquette d'un circuit d'amortissement actif

Des essais d'agressions conduites sur l'entrée du convertisseur de puissance ont été réalisés sans amortissement puis avec amortissement actif afin de valider la stabilisation du système. Les courbes ci-dessous montrent le courant d'entrée du convertisseur (courbe du haut) ainsi que la tension d'entrée (courbe du bas), dans les 2 cas :

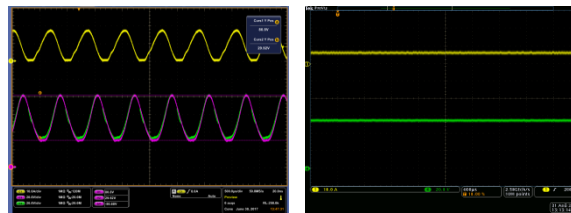


Figure 5 : courant et tension d'entrée sans et avec amortissement

La stabilisation du système est validée sur toute la plage de fréquence de fonctionnement du circuit d'amortissement actif.

## 6. Conclusion

Un amortissement actif peut remplacer un amortissement passif. La stabilisation du convertisseur par ce circuit a été validée par simulation et par essai. Le gain de volume et de coût est dépendant des applications et des normes CEM applicables. La complexité supérieure à celle d'une solution passive, implique une fiabilité moindre. L'amortissement actif augmente également les pertes dans le système, même en l'absence d'agression CEM. Référence : A. Jusoh, H. Baamodi, S. Mekhilef "Active damping network in DC distributed power system driven by photovoltaic system."



# Les MOSFET SiC dans les applications de puissance en 2018

**STEPHANE DE LA FOURNIERE,**  
Directeur Général, [www.cirtem.com](http://www.cirtem.com)

**Mots clés :** SiC, carbure de silicium, variateur, onduleur, convertisseur, CIRTEM

## 1. Introduction

Le salon PCIM Europe à Nuremberg est le grand rendez-vous du monde de l'électronique de puissance. Il permet de cerner les grandes tendances du moment. Lors de l'édition 2018, le visiteur ne pouvait qu'être qu'interpelé par l'effort de communication des fournisseurs de semi-conducteurs autour des composants SiC (carbure de silicium).

CIRTEM, en particulier grâce au soutien de la DGA, dispose d'une certaine expérience dans ce domaine. Cet article donne la vision de CIRTEM en tant que fabricant de convertisseurs du sujet. Il traite uniquement de l'utilisation des MOSFET SiC dans des applications de moyenne puissance, à partir de 5 kW, domaine de prédilection de CIRTEM. Il ne prétend pas être exhaustif et complet mais donner un point de vue du coté utilisateur pour éclairer le débat.

## 2. Rappel des gains de cette technologie

Le carbure de silicium est un matériau semi-conducteur à grand gap. Ses principaux atouts sont :

- Bien adapté à la réalisation de composants dotés d'une tenue en tension élevée.
- Des pertes par conduction réduites d'environ 40%<sup>1</sup> par rapport à un IGBT silicium de calibre équivalent parcouru par le même courant.
- Des pertes par commutation réduites d'environ 40%<sup>1</sup> par rapport à un IGBT silicium de calibre équivalent commutant à la même fréquence.
- Potentiellement bien adapté à un fonctionnement à haute température (selon la technologie et le packaging).
- Une conductivité thermique bien meilleure que le silicium qui permet, malgré des puces de plus petites tailles, d'avoir des résistances thermiques plus faibles que celles des composants Si.

Il présente aussi des inconvénients :

- Le matériau de base est beaucoup plus couteux à produire que le silicium.

- Il demeure quelques interrogations quant à sa robustesse et sa durée de vie car les retours sur sa maturité sont encore faibles.
- Sa vitesse de commutation étant très élevée il engendre de forts  $dV/dt$  qui peuvent avoir un impact important sur la CEM en mode commun et en rayonné.

## 3. L'offre de composants

Rappel : cet article ne traite que des MOSFET de fort calibre.

### 3.1. Le carbure de silicium

Il existe 2 principaux producteurs de matériaux de base : CREE (USA) et ROHM (Japon).

### 3.2. Les puces

Les principaux fabricants sont WOLFSPEED (USA - filiale de CREE), ROHM (Japon) et INFINEON (Allemagne), qui dispose d'un accord avec CREE pour la fourniture du matériau de base. Tous ces fabricants proposent des puces MOSFET 1200V avec des  $R_{ds(on)}$  à 25°C compris entre 22 et 45 mΩ, pour leur plus grosse puce.

Certains fabricants proposent aussi des puces 650 V ou 900 V mais leur intérêt est plus faible quand on les compare aux solutions à base de silicium (IGBT 650 V par exemple).

On trouve aussi des puces 1700 V mais de grosses interrogations subsistent quant à leur qualification en particulier au test HVH3TRB (High Voltage High Humidity High Temperature Reverse Bias : test de tenue en tension (80% de la tension nominale = 1360 V), bloqué, à 85°C et 85% d'humidité relative).

Toutes ces puces sont disponibles en boîtier TO-247 à 3 ou 4 pins et souvent dans des boîtiers CMS.

### 3.3. Les modules

Différents fabricants proposent aussi des modules où plusieurs puces MOSFET sont mises en parallèle pour diminuer la  $R_{ds(on)}$ . Suivant les modèles, ces puces

<sup>1</sup> Ces chiffres sont des ordres de grandeur. Suivant les compromis de dimensionnement et l'application, ils peuvent varier notablement.

MOSFET sont associées ou pas à des diodes Schottky SiC. En effet, un MOSFET ayant par construction une diode intrinsèque antiparallèle elle peut être utilisée comme diode de roue libre dans un bras d'onduleur pendant la phase de commutation. Le MOSFET qui lui est associé devra ensuite être commandé dès le temps mort terminé car les caractéristiques de la diode intrinsèque sont mauvaises.

Dans un premier temps, les fabricants ont proposé des modules dans des boîtiers identiques à ceux utilisés avec des composants silicium (IGBT). De plus en plus ils proposent des boîtiers spécifiques avec des inductances parasites réduites qui sont mieux adaptés à la grande vitesse de commutation des composants SiC.

Coté fabricants de modules, autres les fondeurs de puces déjà cités, on trouve principalement en Europe SEMIKRON, VINCOTECH, MICRO-SEMI et MITSUBISHI.

#### 4. Les bénéfices dans les applications

Les MOSFET SiC ayant des pertes par conduction et par commutation moindres que des IGBT on peut tirer parti de cet avantage :

- Soit pour améliorer le rendement du convertisseur, ce qui est particulièrement intéressant pour les convertisseurs ayant un fort taux d'utilisation comme les alimentations télécoms ou certains UPS.
- Soit pour réduire les pertes du convertisseur ce qui permet de simplifier son refroidissement qui peut être problématique dans certaines applications.
- Soit de monter la fréquence de fonctionnement du convertisseur, ce qui permet de réduire la taille et la masse des filtres.

Evidemment on peut aussi faire des compromis entre ces différents bénéfices en fonction de l'application.

Quelques ordres de grandeur pour évaluer les gains envisageables :

- Sur un convertisseur DC/DC non-isolé de 40 kW nous avons réduit les pertes d'un rapport 2 entre une version à IGBT Si et une version à MOSFET SiC. Le rendement passe ainsi de 97% à 98,5%. Le prix lui augmente de 3000 € par lot de quelques pièces. Si on valorise le kWh à 0,15 €/kWh il faudra donc 4 ans de fonctionnement à plein temps pour atteindre une rentabilité économique. Heureusement que dans certaines applications embarquées le kWh vaut beaucoup plus ...
- Sur un convertisseur DC/DC isolé de 100 kW, en commutation douce (ZVS), où on chercherait à réduire le volume au maximum on peut espérer passer la fréquence de commutation de 200 kHz à 1 MHz.

#### 5. Quelques exemples de réalisation

##### 5.1. CIRTEM

CIRTEM a réalisé plusieurs démonstrateurs technologiques à base de MOSFET SiC, dont certains pour le compte de la DGA. On peut citer :

- Un variateur de vitesse triphasé embarqué sur un hélicoptère. L'utilisation de MOSFET SiC a permis de réduire le dissipateur de ce variateur donc sa masse et son volume.
- Un variateur de vitesse de 300 kW multi-niveaux qui dispose d'un excellent rendement (99,7%).
- Un convertisseur DC/DC non isolé permettant de connecter une pile à combustible sur un bus DC à bord d'un avion. Là encore la grande compacité et une masse aussi faible que possible étaient recherchées.

CIRTEM finit actuellement le développement d'un premier produit de série où le choix de composants SiC a été fait pour offrir un très bon rendement et une grande compacité.

##### 5.2. Ailleurs dans le monde

Voici quelques réalisations produites en série :

- Des UPS industriels haut de gamme où l'utilisation de MOSFET SiC permet d'améliorer le rendement, y compris à des faibles taux de charge, et donc de réduire la consommation d'électricité. Le fabricant met aussi en avant la réduction du coût du refroidissement (climatisation des Datacenters) et la réduction de l'empreinte au sol.
- Des alimentations télécoms et des onduleurs solaires pour les mêmes raisons que précédemment.
- Des variateurs de vitesse utilisés dans la compétition automobile où on recherche une réduction des pertes pour des raisons de compacité et d'optimisation de l'énergie disponible.
- Des convertisseurs auxiliaires ferroviaires où la légèreté est recherchée pour maximiser la charge utile du train.
- Des chargeurs rapides de batterie pour véhicules électriques pour des raisons essentiellement marketing. La place n'est pas très critique dans cette application stationnaire et le faible taux d'utilisation de ces équipements ne justifie pas actuellement le gain de rendement.

#### 6. Conclusion

L'intérêt de l'utilisation de MOSFET SiC pour des applications de puissance avec des tensions supérieures à 500 V (composants de classe 1200 V) n'est plus à démontrer. En-dessous de cette tension il est plus discuté et dépendra de l'évolution des prix et des technologies concurrentes telle que le GaN. Des

progrès technologiques restent à accomplir pour fiabiliser les composants plus haute tension (1700 V, 3300 V, ...).

Reste la délicate question du prix. Tous les fabricants projettent des baisses de prix mais elles tardent à venir. Quand on regarde ce qui nous était annoncé il y a quelques années, on constate avec désolation qu'on est en retard ! Et ce n'est pas les récentes tensions sur le marché des semi-conducteurs de puissance qui vont aider à cette baisse. Mais, la demande et le marché sont là, donc les prix vont baisser, suivant en cela les tendances habituelles du marché des semi-conducteurs. Toutefois, du fait du surcoût de production du SiC ces composants resteront plus chers que leurs homologues à Si. Un point important influencera aussi le marché. Celui du prix de l'énergie. Comme on l'a vu l'utilisation de composants SiC permet de faire des économies d'énergie donc d'absorber une partie des surcoûts. Cela suppose toutefois que l'utilisateur final soit capable et prêt à payer un peu plus de CAPEX pour réduire ces OPEX et ce n'est malheureusement pas toujours le cas...

#### **7. Remerciements**

Je remercie Jacques Petit de SEMIKRON, Thierry Meynard du LAPLACE, mes collègues Didier Ferrer et Fabien Quesada pour leur aide précieuse dans la rédaction de cet article

# Bilan et perspectives des composants de puissance à grand gap

DOMINIQUE PLANSON, HERVE MOREL ET MICHEL AMIET,

Laboratoire Ampère, Univ. De Lyon, 21, avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne Cedex

Cet article est dédié à la mémoire du Professeur Jean-Pierre Chante

**Résumé :** Depuis le début des années 1990, des recherches ont été menées au laboratoire Ampère (ex-CEGELY) sur les composants de puissance grand gap (SiC, puis diamant depuis les années 2010 et plus récemment GaN) avec un soutien exemplaire de la DGA. Ces actions ont permis d'initier des relations avec le secteur industriel (Schneider-Electric, Ferraz-Shawmut, IBS, Safran, ST-Microelectronics) ou institutionnel applicatif (SuperGrid Institute, Institut Saint-Louis). Cet article retrace cette aventure, l'évolution des recherches et surtout les progrès significatifs réalisés que ce soit en termes de faisabilité de composants de puissance, d'augmentation des tensions de claquage et aussi des moyens de caractérisation de composants.

## 1. Introduction

Les composants de puissance sont le cœur des convertisseurs de puissance permettant d'alimenter les installations de puissance et de « transformer » la tension ou le courant de l'énergie électrique. Les contraintes de température, de compacité et de tension sont de plus en plus importantes dans un souci permanent d'économie d'énergie.

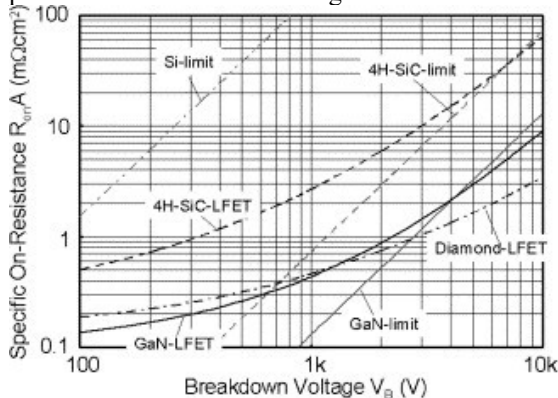


Figure 1 : Ron.S théorique en fonction de la tenue en tension pour Si, SiC, GaN et diamant [1]

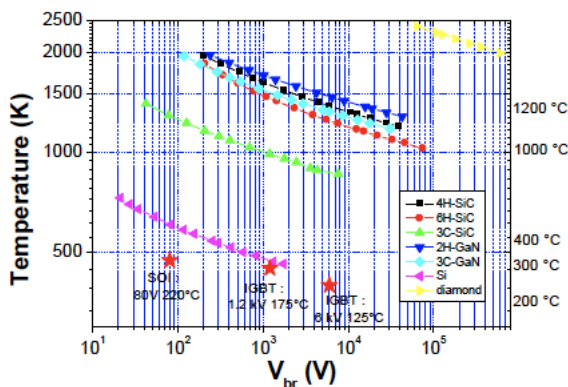


Figure 2 : Température d'emballement thermique en fonction de la tenue en tension théorique

## 2. Travaux et résultats obtenus

Très tôt, les potentialités du SiC puis rapidement du diamant, ont attiré l'attention du laboratoire pour des applications haute température et haute tension, nous amenant à souligner divers faits marquants.

Dans le cadre d'un programme blanc ANR, une évolution notable de la montée en tension est passée par la réalisation de diodes Schottky diamant 10kV.

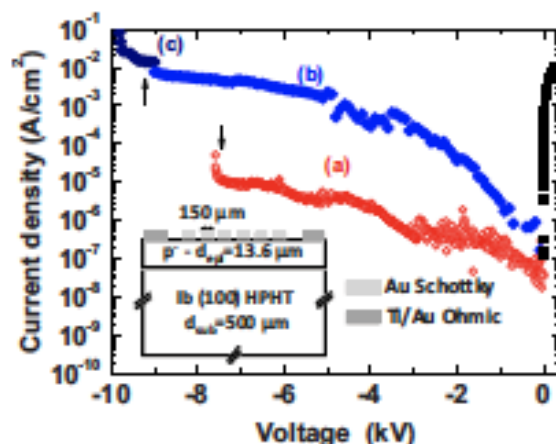


Figure 3 : Densité de courant en inverse de deux diodes Schottky diamant. [2].

Puis, le déclenchement optique de thyristors SiC avec diode LED a permis de valider aussi la mise en série et parallèle des thyristors, travaux réalisés en collaboration avec l'Institut Saint-Louis (ISL).

Le développement d'un driver haute température a permis d'atteindre une fonctionnalité d'un convertisseur jusqu'à 200°C

Une grande évolution fut alors l'acquisition de nouveaux équipements :

- une station sous-pointe semi-automatique (Signatone S460), permettant la réalisation de cartographies de plaquettes et composants associés très probantes.

- un banc de caractérisation OBIC (avec 2 longueurs d'onde) permettant d'obtenir les coefficients d'ionisation et une cartographie du champ électrique en périphérie des composants.

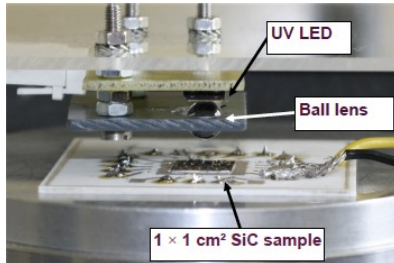


Figure 4 : Montage expérimental pour le déclenchement du thyristor

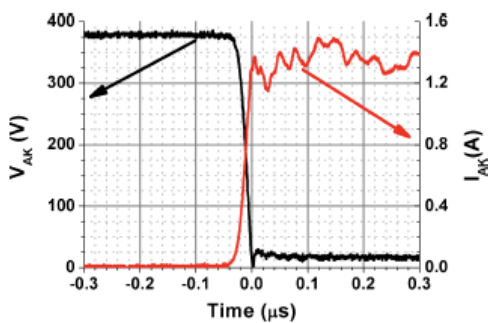


Figure 5 : Caractéristique en commutation  $I(t)$  et  $V(t)$  du thyristor

Par ailleurs, l'emploi de techniques innovantes a permis d'atteindre de significatifs résultats :

- le dopage localisé de type P par VLS (diodes bipolaires et protection périphérique avec couche cristalline de très grande qualité),
- la caractérisation de diodes diamant (IV-OBIC) et diodes GaN,
- la simulation et conception de composants par éléments finis (Synopsys) 3D.

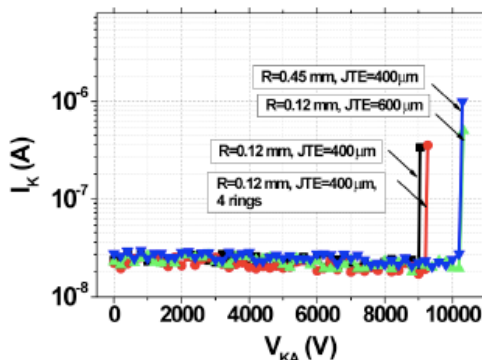


Figure 6.a

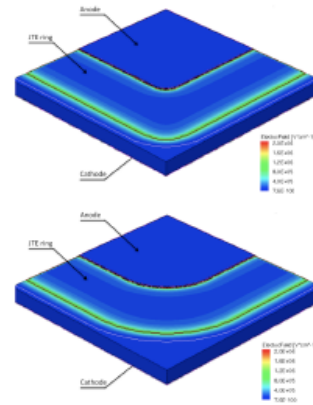


Figure 6.b

Figure 6 : Résultats expérimentaux (figure 6a) et de simulation en 3D (figure 6b), montrant l'impact du rayon de courbure en périphérie des protections périphériques en utilisant une combinaison de gravure et JTE

A noter enfin la création en 2014 d'une startup, Caly Technologies, par deux maîtres de conférence de notre équipe de recherche, entreprise en pleine réussite et évolution (5 employés aujourd'hui).

En conclusion, les recherches menées en France (avec les supports technologiques de partenaires européens) sur les composants de puissance à large bande interdite ont permis d'obtenir des résultats de premiers plans au niveau international. L'industrialisation de masse des composants SiC est en cours (SiC-MOSFET).

### 3. Perspectives

Commutation rapide des composants de puissance (jusqu'à 20 kV), caractérisation haute tension et haute température sous vide (programme GD3E), packaging haute tension (jusqu'à 15 kV)

### 4. Remerciements

Les doctorants (Tony Abi-Tannous, Besar Asllani, Pierre Brosselard, Florian Chevalier, Nicolas Daval, Nicolas Dheilly, Hassan Hamad, Stanislas Hascoet, Runhua Huang, Frédéric Lanois, Jean-François Mogniotte, Franck Nallet, Minh-Duy Nguyen, Shiqin Niu, Fabien Thion, Dominique Tournier, Heu Vang, Teng Zhang)

Les permanents (Cyril Buttay, Mihai Lazar, Luong-Viet Phung, Christophe Raynaud)

Les collaborations universitaires (LAAS, Laplace, LSPM, GEMAC, LMI, Charles Coulomb, G2ELab).

### 5. Références bibliographiques

[1] W. Saito, I. Omura, T. Ogura, H. Ohashi « Theoretical limit estimation of lateral wide band-gap semiconductor power-switching device » Solid-State Electronics 48 1555-1562 (2004)  
 [2] P.-N. Volpe, P. Muret, J. Pernot, F. Omnes, T. Teraji, Y. Koide, F. Jomard, D. Planson, P. Brosselard, N. Dheilly, B. Vergne, S. Scharnholz « Extreme dielectric strength in boron doped homoepitaxial diamond » Appl. Phys. Lett. 97, 1 (2010)

## Le diamant : matériau pour l'électronique du futur

JOCELYN ACHARD<sup>1</sup>, DAVID EON<sup>2</sup>, KARINE ISOIRD<sup>3</sup>

(1) LSPM, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, CNRS, Villetaneuse 93430, France

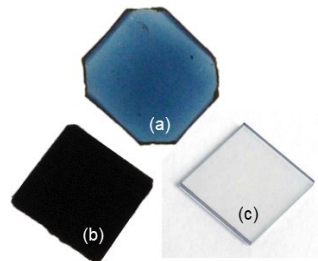
(2) Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, 38000 Grenoble, France

(3) LAAS-CNRS, Université de Toulouse, UPS, 31400 Toulouse, France

**Résumé :** Le domaine d'application de l'énergie électrique ne cesse de s'étendre et les puissances mises en jeu deviennent de plus en plus importantes. Or, les dispositifs actuels à base de silicium comme semi-conducteur ne satisfont plus totalement les besoins actuels. Des efforts importants sont menés dans le développement de composants à base de semi-conducteurs à large bande interdite, et notamment le diamant dont les performances extrêmes en font un matériau de choix pour ce type d'application. Ces travaux devraient permettre d'élaborer de nouveaux composants forte puissance et haute fréquence.

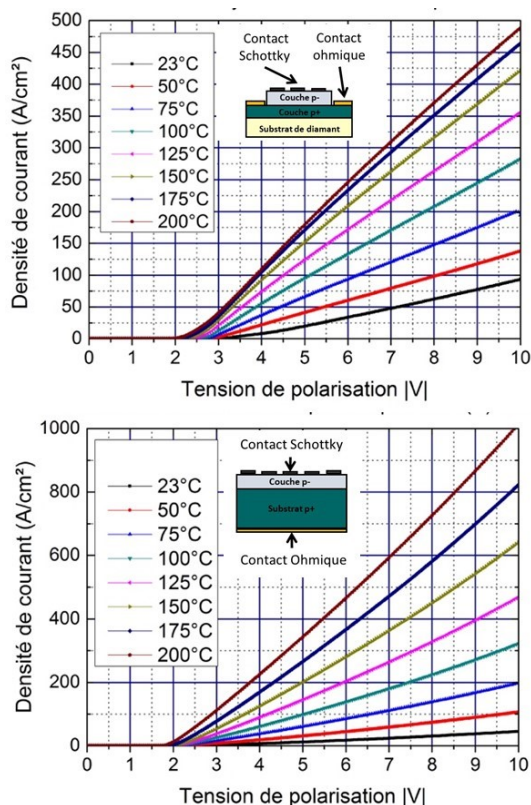
Le diamant allie un grand nombre de propriétés qui le rendent attractif pour de nombreuses applications. Son extrême dureté, associée à une conductivité thermique de  $20 \text{ W.cm}^{-1}\text{.K}^{-1}$  et une température de travail pouvant aller jusqu'à  $700^\circ\text{C}$  en l'absence d'oxygène, permet son utilisation en mécanique pour découper ou polir des matériaux durs non ferreux. Sur le plan optique, le diamant est transparent de l'infrarouge lointain jusqu'à l'ultra-violet profond ce qui permet son utilisation pour la réalisation de fenêtres optiques pour les lasers de puissance fonctionnant dans cette gamme de longueurs d'onde. En outre sa grande inertie chimique rend possible son utilisation dans des milieux très agressifs (acides, oxydants, ...) et le diamant est par ailleurs parfaitement compatible avec le tissu humain. Ces applications optiques et thermiques ne nécessitent pas un matériau d'une qualité cristalline exceptionnelle, et d'ores et déjà des films de diamant à la fois dans leur forme monocristalline ou poly-cristalline sont disponibles commercialement pour ces usages.

Toutefois, c'est sur le plan de l'électronique que les propriétés du diamant monocristallin se combinent le plus avantageusement [1]. Celui-ci est en effet un matériau semi-conducteur à large bande interdite ( $5.5 \text{ eV}$ ) qui possède un champ de rupture théorique pouvant atteindre  $10 \text{ MV.cm}^{-1}$ . Il se caractérise aussi par une faible constante diélectrique et des mobilités d'électrons et de trous atteignant plus de  $2000 \text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$  à température ambiante [2, 3]. Par ailleurs, le dopage de type p par adjonction d'atomes de bore au cours de la croissance est maintenant parfaitement maîtrisée. Elle permet d'obtenir des films de diamant monocristallin avec des concentrations de dopant allant de quelques  $10^{14}$  à quelques  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  pour des épaisseurs de matériau allant de quelques centaines de nanomètres à quelques centaines de micromètres [4-6]. Des substrats autosupportés sont désormais obtenus (cf. Figure 1) et permettent le développement de composants verticaux.



**Figure 1 :** Films autosupportés de diamant CVD (a) faiblement dopé au bore, (b) fortement dopé au bore et (c) intrinsèque.

La synthèse de diamant monocristallin par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma microonde est ainsi devenue un procédé quasi-mature et a permis, à travers différents projets nationaux soutenus par l'ANR (programmes Astrid et Blancs) et la DGA (projets FUI), de réaliser et caractériser des composants unipolaires de type diodes Schottky fonctionnant jusqu'à des températures de  $200^\circ\text{C}$  [7]. Sur des structures pseudo-verticales, une densité de courant allant jusqu'à  $1000 \text{ A.cm}^{-2}$  a ainsi été mesurée (cf Figure 2a) et ce, avec un taux de diodes fonctionnelles de 95% sur 64 réalisées. Une étude similaire a été réalisée pour des structures verticales conduisant à une densité de courant de  $500 \text{ A.cm}^{-2}$  (cf. Figure 2b) avec un taux de diodes fonctionnelles de 75% sur 64 réalisées. Par ailleurs, des travaux menés à l'Institut Néel ont permis de montrer que ce type de composants présentait un champ de claquage supérieur à  $7 \text{ MV.cm}^{-1}$  et un facteur de mérite de Baliga supérieur à  $244 \text{ MW.cm}^{-2}$  [8]. Notons enfin que, contrairement à ce que l'on observe pour les autres semi-conducteurs, les performances des diodes s'améliorent avec la température de fonctionnement montrant ainsi tout l'intérêt de ce matériau pour l'électronique haute température.



**Figure 2 :** Caractéristiques I-V sous polarisation directe et pour différentes températures de diodes Schottky avec une structure (a) pseudo-verticale, (b) verticale.

Ainsi, même si les résultats obtenus jusqu'à présent restent en deçà de ceux escomptés par simulation, ils placent les acteurs nationaux au meilleur niveau mondial et montrent toute la potentialité du diamant pour des applications en électronique de puissance ainsi que le rôle majeur que peut jouer ce matériau dans le futur. Les domaines d'utilisation, tant dans le domaine civil que dans le domaine de la défense, sont nombreux. On peut citer en particulier le développement de chaînes impulsionnelles de fortes puissances pour les dispositifs de protection active, les canons électromagnétiques, les différents convertisseurs des réseaux de distributions mondiaux (HVDC par exemple). Ces besoins modernes sont motivés par des demandes en énergies toujours plus fortes tout en respectant l'environnement.

Le diamant pourrait également jouer un rôle extrêmement important dans le domaine des radiofréquences (RF) même si pour l'instant le nitrure de gallium reste le meilleur candidat. En effet, une stabilité de ces composants RF au-delà de 200°C avec des fréquences de fonctionnement allant jusqu'à 50 GHz, et des densités de puissance de sortie de plusieurs  $W.cm^{-1}$  ont été démontrées récemment [9, 10].

A l'heure actuelle, l'un des verrous technologiques qui freine fortement le développement de ce matériau est l'absence de substrat monocristallin de dimensions supérieures au centimètre carré. Des travaux récents ont néanmoins montré qu'il existait des solutions

technologiques [11, 12] et les moyens doivent maintenant être mis en œuvre pour accélérer ce développement, d'autant plus que l'ensemble des compétences nécessaires est présent sur le territoire national. L'opportunité de mettre en place une filière de production diamant est à saisir.

### Références

- [1] L.S. Pan, D.R. Kania, Diamond: electronic properties and applications, Kluwer Academic, Boston/Dordrecht/London, 1995.
- [2] J. Isberg, J. Hammersberg, D.J. Twitchen, A.J. Whitehead, *Diam. Relat. Mat.* **13**, 320-324 (2004).
- [3] C.J.H. Wort, R.S. Balmer, *Materials Today* **11**, 22-28 (2008).
- [4] F. Omnès, P. Muret, P.-N. Volpe, M. Wade, J. Pernot, F. Jomard, *Diam. Relat. Mat.* **20**, 912-916 (2011).
- [5] J.P. Lagrange, A. Deneuville, E. Gheeraert, *Carbon* **37**, 807-810 (1999).
- [6] R. Issaoui, J. Achard, A. Tallaire, F. Silva, A. Gicquel, R. Bisaro, B. Servet, G. Garry, J. Barjon, *Appl. Phys. Lett.* **100**, 122109 (2012).
- [7] R. Monflier, K. Isoird, A. Cazarre, J. Tasselli, A. Servel, J. Achard, D. Eon, M.J. Valdivia Birnbaum, *EPE Journal* 1-7 (2017).
- [8] A. Traoré, P. Muret, A. Fiori, D. Eon, E. Gheeraert, J. Pernot, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 052105 (2014).
- [9] M. Kasu, *J. Appl. Phys.* **56**, 01AA01 (2017).
- [10] S. Russell, S. Sharabi, A. Tallaire, D.A.J. Moran, *IEEE Transactions on Electron Devices* **62**, 751-756 (2015).
- [11] M. Schreck, S. Gsell, R. Brescia, M. Fischer, *Scientific Reports* **7**, 44462 (2017).
- [12] H. Yamada, A. Chayahara, Y. Mokuno, Y. Kato, S. Shikata, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 102110 (2014).

# PRIMA (PRIses MAgnétiques)

**CONSORTIUM PRIMA (COMITE DE PILOTAGE) – GELIBERT STEPHANE, COGNARD LISE**

ARaymond France SAS, 38120 Saint-Egrève, France.

**Résumé :** Connecter et déconnecter des branchements est devenu un geste quotidien banal dont la fréquence a fortement augmenté avec l'essor des dispositifs électroniques et informatiques de notre vie quotidienne.

Le projet PRIMA propose de développer un nouveau type de connecteur magnétique innovant, ainsi que sa technologie associée appliquée à la transmission de courant électrique. Ce concept permet de :

- faciliter la connexion grâce au guidage magnétique non-orienté,
- sécuriser l'utilisateur et le signal, avec une étanchéité assurée,
- fonctionnaliser la connexion avec de l'intelligence pour la supervision et gestion.

Le projet PRIMA rassemble 8 acteurs de la chaîne de valeur en regroupant un concepteur de connexion magnétique (une PME nouvellement créée), un fabricant de connecteurs (ETI), deux PME pour la préparation de la matière magnétique, le CNRS par le biais de 2 laboratoires spécialisés en caractérisation matière et magnétisme, ainsi que 2 utilisateurs leaders sur leurs marchés respectifs.

## 1. Introduction

Pour développer le nouveau concept, il faut tout d'abord **optimiser un design complet** de façon technique et économique dans une démarche d'écoconception, tout en gardant le niveau de performance et de sécurité attendu. L'architecture magnétique est également un paramètre de développement et d'optimisation pour réduire la quantité de matière magnétique.

En parallèle, **la formulation et la fabrication de compounds pour aimants liés** (en remplacement des aimants frittés communément utilisés sur le marché) sont configurées en lien avec les spécificités de l'injection et la préparation complète de matière fortement chargée.

Les développements sont basés sur différentes configurations et designs correspondants à des applications visées par les perspectives de marchés, sous la forme de connecteur électrique 12 à 230V. La mise en application est faite dans deux secteurs différents, avec leurs spécifications, à savoir **l'automobile et le chargement d'équipements industriels**. Les démonstrateurs réalisés sur la base de deux boucles itératives sont testés selon les critères spécifiques de chaque marché, validant ainsi **la performance, la sécurité et l'adéquation avec les usages**.

## 2. Présentation des travaux

### 2.1. Développement des produits

La première étape du développement des prises magnétiques a été la définition des spécifications

techniques et fonctionnelles initiales pour chacune des applications par les clients.

Ces documents ont permis de concevoir des premiers designs de prises (boucle 1). Des échanges ont alors eu lieu avec le laboratoire du CNRS afin de définir l'architecture magnétique de chaque prise. Plusieurs itérations ont été nécessaires afin d'optimiser la force magnétique en fonction des premiers retours d'utilisateurs.

Nom entité	Type d'entité
ARaymond S.A.R.L.	ETI
gulplug S.A.S.	PME
ADmajoris S.A.S.	PME
Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS - Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) - Consortium de Recherche pour l'Emergence de Technologies Avancées (CRETA)	Laboratoire
Setup Performance S.A.S.	PME
<b>Constructeur / Equipementier Automobile</b>	
Fenwick-Linde S.A.R.L.	ETI

Tableau 1: Liste des partenaires du projet PRIMA

Ces données ont permis de mettre à jour le cahier des charges fonctionnel et de finaliser les conceptions en prenant en compte les contraintes mécaniques, électriques et l'optimisation magnétique.

Des maquettes pour chacune des applications ont ainsi pu être fabriquées. Ces pièces physiques ont été présentées aux utilisateurs finaux et testées en situation.





**Figure 1:** Cœur de prise magnétique 230V

Cela leur a permis de faire un premier retour sur les produits et de définir les pistes d'amélioration qui sont en cours d'intégration dans la boucle 2.



**Figure 2:** Concept prise magnétique

### 2.2. Développement des plasto-aimants

L'étude sur les plasto-aimants est menée en parallèle du développement des prises. Celle-ci a commencé par une étude bibliographique sur les poudres magnétiques avec l'identification des fournisseurs potentiels. Des commandes ont été passées afin de caractériser les poudres fournies et de vérifier les propriétés annoncées par les fournisseurs.

A partir de ces poudres, les compo-ndeurs ont mis en place un plan d'expérience permettant d'étudier l'influence des différents paramètres : nature des poudres (isotropes, anisotropes), taux de charge, nature de la matrice, paramètres process... Les compounds réalisés ont été injectés afin de définir les paramètres d'injection optimaux pour chaque mélange et d'étudier les éventuelles limites du process.



**Figure 3:** Extrusion de plasto-aimants

Les pièces injectées ainsi que les compounds ont été caractérisés mécaniquement, microscopiquement et

magnétiquement afin de définir le mélange correspondant le mieux aux besoins du projet. La fabrication du compound optimisé a alors pu être transférée à l'échelle industrielle.

### 2.3. Prochaines étapes

Le développement des prises optimisées est en cours (boucle 2).

En parallèle, l'investigation sur la technologie des plasto-aimants continue avec l'intégration d'un moule permettant d'orienter les particules magnétiques lors de l'injection. Des essais d'orientation sous champ sont également menés, afin de définir les températures et valeur de champ magnétiques permettant d'avoir une orientation maximale des particules magnétiques dans la matrice plastique. Ces paramètres seront testés dans le cadre du plan d'expérience défini pour la validation du process d'injection.

## 3. Applications

Les applications identifiées à ce jour pour les connecteurs magnétiques sont :

- Automobile : connecteurs rapides
- Industrie : prises de charges, robotique
- Santé : fauteuils roulants électriques, fauteuils ambulatoires
- Nautique : bornes électriques
- Bâtiment : constructions modulaires et/ou temporaires
- Militaire : à ce titre des contacts ont déjà été pris avec DGA/TA et DGA/TT et des industriels du domaine militaire.

## 4. Conclusion et perspectives

Pour les deux types d'usages, la chaîne de valeur du design jusqu'à la commercialisation est bien représentée par l'ensemble des acteurs du projet.

Les premiers retours d'utilisateurs sur les démonstrateurs présentés sont concluants et mettent en avant la facilité et sécurité d'usage et l'ergonomie associée. Ces données sont prometteuses et confirment l'intérêt et les besoins du « plug and play » vis-à-vis de l'évolution sociétale.

## 5. Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des partenaires du consortium, les financeurs de ce projet (DGA, DGE, BPI France, FEDER, la région Auvergne – Rhône-Alpes, le département Isère) ainsi que les pôles labellisateurs (Plastipolis et Minalogic).

# Les fluides magnétorhéologiques et leurs applications

G. BOSSIS

Institut de Physique de Nice, UMR7010

## 1. Introduction

Les fluides magnétorhéologiques se présentent sous la forme de particules aimantables de taille voisine du micron dispersées dans un liquide (souvent éthylène glycol ou huile silicone). En présence d'un champ magnétique les microparticules s'aimantent et s'agrègent sous la forme d'un réseau solide qui va résister à une contrainte de déformation de la même façon qu'un solide. C'est cette transition liquide-solide contrôlée par l'application d'un champ magnétique qui est exploitée dans de nombreuses applications, principalement dans des circuits hydrauliques où on cherche à moduler la transmission d'une force ou d'un couple. Cet effet est connu depuis longtemps (J.Rabinow: AIEE Trans. 67,1308 (1948)) mais fait toujours l'objet de recherches qui ont pour but d'améliorer les caractéristiques de ces fluides et d'étendre leur champ d'application. On se limitera dans cet article à décrire les principes de base et à évoquer les évolutions dans ce domaine.

## 2. La contrainte seuil magnétique

L'application d'un champ magnétique, en aimantant les particules, génère une force d'interaction entre 2 particules qui, dans une large gamme de champ, est donnée par :  $F_m \propto \mu_0 M_s^{0.5} H^{1.5} a^2$  avec  $a$  le rayon des particules et  $M_s$  l'aimantation de saturation du matériau constituant les particules. Si on suppose que la structure ainsi formée consiste de  $n_c$  chaînes de particules alignées dans la direction du champ, on aura une contrainte nécessaire pour casser ces  $n_c$  chaînes qui sera :  $\tau_y = n_c F_m / S$ . Or le nombre de chaînes par unité de surface est :  $n_c / S = N a / V$ . La contrainte seuil est alors  $\tau_y = K \Phi \mu_0 M_s^{0.5} H^{1.5}$  où  $\Phi = N_c (4/3) \pi a^3 / V$  est la fraction volumique des particules en suspension et  $K=2.31$  [1]. Lorsque la suspension est placée entre deux disques séparés de  $h$ , la contrainte,  $\tau$ , nécessaire pour faire tourner le disque supérieur à la vitesse angulaire  $\Omega$  est alors donnée par :  $\tau = \tau_y + \eta_0 \gamma$  (1) où  $\gamma = \Omega \cdot R / h$  est ici le taux de cisaillement à l'extrémité du disque et  $\eta_0$  la viscosité de la suspension à champ nul; c'est ce qu'on appelle la loi de Bingham. Les courbes expérimentales sont reportées sur la figure 1; leurs intersections avec l'axe des contraintes représente la contrainte seuil:  $\tau_y(H)$ .

On voit que l'effet du champ est approximativement de décaler les courbes verticalement ce qui justifie l'utilisation de l'équation de Bingham(1).

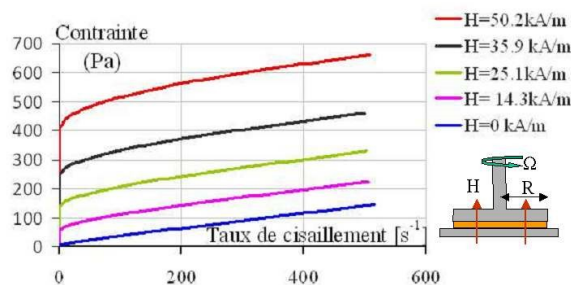


Figure 1 : Contrainte versus taux de cisaillement pour différents champs;  $\Phi=0.45$

En pratique les champs appliqués peuvent être beaucoup plus grands que ceux représentés sur la figure 1 et pour des champs de l'ordre de 400kA/m (soit  $B=0.5$  Tesla) la contrainte seuil peut atteindre 50kPa. Néanmoins l'application de forts champs nécessite l'emploi de bobines et de circuits en acier magnétique lourds et encombrants. Un progrès dans ce domaine devrait venir de l'utilisation de suspensions beaucoup plus concentrées ( $\Phi > 0.6$ ) grâce à l'utilisation de super fluidifiants utilisés dans l'industrie du ciment. On peut alors, grâce à un effet de blocage frictionnel contrôlé par le champ, obtenir des contraintes de l'ordre de 100kPa pour des champs beaucoup plus faibles ( $H=20$  kA/m)[2].

## 3. Les applications

Les principales applications concernent les dispositifs d'amortissement contrôlable ou de type embrayage [3]. Dans le premier cas (fig. 2) on souhaite minimiser la fonction de transfert  $T=x_0/y_0$  où  $y_0$  est la sollicitation imposée par les irrégularités de la chaussée. La fonction  $T(\xi, \omega^*)$  est donnée par la solution de l'équation :  $m \ddot{x} + c(H)(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0$ . Cette solution dépend de 2 paramètres  $\xi = c(H) / (2m\omega r)$  et la fréquence réduite  $\omega^* = \omega / \omega_r$  avec  $\omega_r = \sqrt{k/m}$  la fréquence de résonance du système.

Le paramètre de contrôle est  $c(H)$  qui est proportionnel à la viscosité  $\eta = \tau / \dot{\gamma}$  (cf Eq.(1) et fig. 1). La stratégie de commande consiste à augmenter fortement la viscosité quand  $\omega$  est voisin de  $\omega_r$  pour éviter les rebonds à la résonance et à la diminuer au maximum aux fréquences supérieures. Le second type d'application schématisé sur la figure 3 est relatif à la transmission de couple qui peut s'appliquer à l'embrayage, au freinage et à des dispositifs haptiques consistant à donner la sensation de l'effort réel résultant du mouvement d'un dispositif de contrôle (par exemple un volant

[<http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products>], une manette de jeu vidéo, etc...)

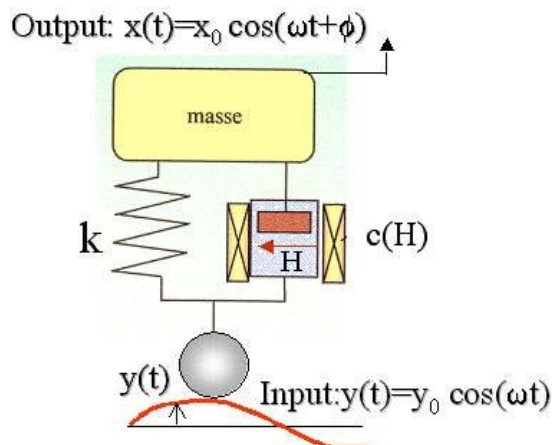


Figure 2 : Modélisation d'un amortisseur contrôlable

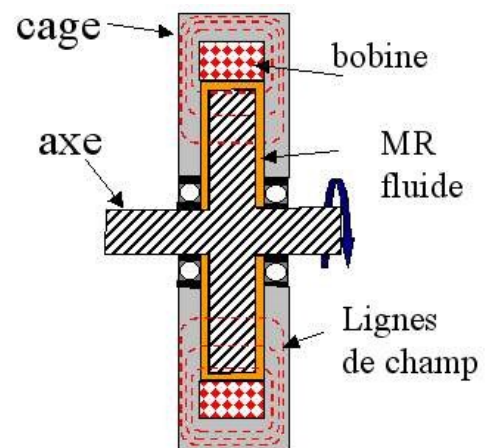


Fig.3 Schéma d'un viscocoupleur à fluide MR

Une autre application importante mais plus indirecte concerne le polissage optique. Dans ce cas le fluide magnétorhéologique sert de fluide porteur de particules abrasives non magnétiques qui sont soumises à une pression contrôlée par le champ magnétique, ce qui permet des polissages de grandes surfaces avec une rugosité de l'ordre du nanomètre [4]

#### Références

- [1] Rheology of magnetorheological fluids.:Models and measurements J.M.Ginder, L.C.Davis, L.D.Elie: Int. J. Mod. Phys B. 10, 3293 (1996); G.Bossis et al Lecture Notes in Physics 594, pp. 202–230, 2002.
- [2] MR fluid, foam and elastomer devices, J. D.Carlson\*, M. R. Jolly, Mechatronics 10 (2000) 555±569
- [3] Outstanding magnetorheological effect based on discontinuous shear thickening in the presence of a superplasticizer molecule G.Bossis, Y.Grasselli, A.Meunier, O.Volkova, Appl. Phys.Lett. 109, 111902 (2016)
- [4] W.I. Kordonski et al U.S. Patent 5,795,212, 18 August 1998 A.K.Singh et al Wear 302(2013)1180

# La supraconductivité en 2018

**PASCAL TIXADOR**

\* Univ. De Grenoble Alpes, G2ELab, I. Néel, F-38000 Grenoble, France.

**Résumé :** La supraconductivité fascine depuis sa découverte en 1911. Un marché mondial de plusieurs milliards existe, mais il concerne principalement les supraconducteurs conventionnels fonctionnant proche du zéro absolu. Ces conditions extrêmes, même si elles sont parfaitement maîtrisées, sont un frein d'où le fort intérêt des supraconducteurs pouvant fonctionner dans l'azote liquide, fluide industriel. Après beaucoup de R & D, ces supraconducteurs deviennent des conducteurs industriels aux performances élevées. Les premiers appareils commerciaux, comme les limiteurs supraconducteurs de courant, apparaissent dans les réseaux électriques. Un état de l'art rapide est dressé

## 1. Supraconductivité et applications bas Tc

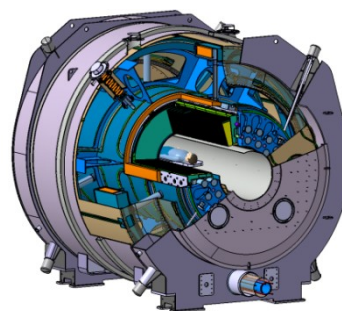
### 1.1. Introduction

La supraconductivité est un état particulier de la matière dont une des caractéristiques les plus remarquables est l'absence totale de résistivité donc d'effet Joule en courant continu. Par ailleurs ces matériaux peuvent transporter de densités de courant considérables, de centaines à milliers d'A/mm<sup>2</sup> suivant les conditions de température et d'induction magnétique. Les supraconducteurs sont par conséquent des matériaux « parfaits », mais ils ne sont pas idéaux à cause des conditions restrictives pour présenter l'état supraconducteur. La plus gênante est la température qui doit être inférieure à la température critique ( $T_c$ ). Celle-ci définit deux supraconducteurs : à basse et haute températures critiques.

### 1.2 Les « Bas Tc » et quelques applications

Les « bas Tc » ont été découverts en 1911 et les applications ont émergé à partir des années 60. Malgré leur température de fonctionnement proches du zéro absolu, environ 4 K (-269 °), ce sont eux qui représentent le marché actuel de la supraconductivité avec notamment les imageurs médicaux par résonance magnétique (IRM, plus 40 000 appareils supraconducteurs en service). Le CEA développe un IRM à 11,7 T [1]. Cet appareil (figure 1), futur record mondial, sera un outil précieux pour les Neuro sciences.

Ces « Bas Tc » ont permis de découvrir le boson de Higg en 2012 à Genève au CERN au LHC (Large Hadron Collider, figure 2). La traque de cette particule, maillon essentiel du modèle standard, avait commencé 50 ans avant. Sans supraconductivité, cette découverte n'aurait pas pu avoir lieu puisqu'il aurait fallu un accélérateur de 100 km de circonférence consommant 900 MW alors que le LHC ne fait que 27 km et surtout ne consomme que 40 MW.



CEA©

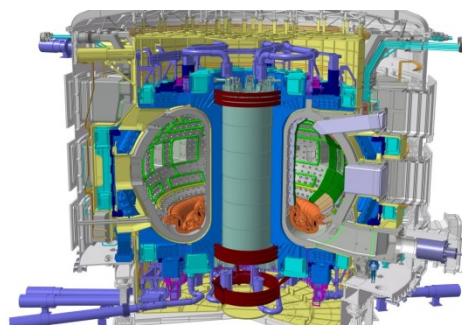
Figure 1.: Imageur 11,75 T développé au CEA (ISEULT).



CERN©

Figure 2.: aimants supraconducteurs (8,4 T) du LHC.

La supraconductivité permettra aussi de domestiquer l'énergie du soleil dans des machines de fusion thermonucléaire. Les défis de cette technologie sont tels qu'ils sont étudiés dans le cadre d'un projet international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). La machine d'ITER (figure 3, [2]) est en construction à Cadarache, là même où le CEA avait ouvert avec succès la voie des machines supraconductrices de fusion avec Tore Supra en 1986.



ITER©

Figure 3.: Machine de fusion en construction à Cadarache.

### 1.3 Les « Haut T<sub>c</sub> »

Si ces basses températures sont parfaitement maîtrisées industriellement, elles restent un verrou qui restreint ces supraconducteurs à un marché de niche. A la fin des années 80 ont été découverts les « Haut T<sub>c</sub> » dont certains peuvent être supraconducteurs dans l'azote liquide (77 K, - 196 °C), fluide totalement industriel très utilisé. En faisant sauter le verrou des très basses températures, ils ouvrent de grandes perspectives à condition que les supraconducteurs présentent des performances élevées à des coûts acceptables. Ces « Haut T<sub>c</sub> » se sont révélés particulièrement complexes, mais des recherches et développements importants ont conduit à des conducteurs, en particulier les rubans REBCO, très performants à des coûts déjà acceptables pour certaines applications.

## 2. Applications Haut T<sub>c</sub>

Le verrou de la cryogénie ayant sauté, les applications des « Haut T<sub>c</sub> » sont très nombreuses. Non seulement ils repoussent les limites des appareils actuels, mais ils offrent des fonctions innovantes. Ainsi les premiers appareils commerciaux apparaissent, en particulier quelques limiteurs supraconducteurs de courant de défaut dans les réseaux électriques. Le limiteur supraconducteur (acronyme FCL (Fault Current Limiter)) le plus développé est basé sur la perte naturelle de l'état supraconducteur dès lors que le courant dépasse la valeur critique. Dans l'état non supraconducteur, un supraconducteur est très dissipatif ce qui limite automatiquement tout courant de défaut. Cet appareil très innovant n'a pas d'équivalent « classique » et répond à des besoins forts dans les réseaux, comme de meilleures sécurité et qualité de l'énergie électrique. En gérant les courants de défaut, les limiteurs apportent beaucoup d'opportunités pour des réseaux électriques plus performants. La ville d'Essen en Allemagne expérimente avec succès dans son réseau urbain du centre-ville un câble supraconducteur de 40 MVA sous 10 kV associé à un limiteur (Figure 4) depuis Mars 2014. Le câble et le limiteur ont été réalisés par NEXANS. Le câble remplace un câble 110 kV. C'est la supraconductivité qui permet la baisse significative de la tension, apportant beaucoup d'avantages pour les réseaux urbains. Il faut noter que cette technologie a été particulièrement bien acceptée par la population. Une autre application où la supraconductivité repousse les limites sont les machines tournantes, traitées dans un autre article.



*Figure 4.: Limiteur supraconducteur de 40 MVA dans une sous station d'Essen (Allemagne).*

Comme pour le limiteur, la supraconductivité apporte la fonction nouvelle de stocker de l'énergie dans une bobine court-circuitée parcourue par un courant. L'absence de résistivité fait que le courant ne s'amortit pas. Connue sous son acronyme SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), ce stockage est caractérisé par une densité de puissance particulièrement élevée. La densité d'énergie n'est pas forte mais l'énergie peut être libérée très rapidement. Le SMES est une source d'énergie électrique impulsionnelle. Il se révèle très bien adapté pour certaines applications et les « haut T<sub>c</sub> » améliorent les performances. Par ailleurs l'induction magnétique qui permet de stocker l'énergie peut être utilisée pour améliorer les performances de certaines charges. Un projet majeur est le projet BOSSE qui fait l'objet d'un autre article.

## 3. Conclusion

Même si c'est souvent une technologie « invisible » la supraconductivité s'est imposée dans certaines niches comme les IRM avec les « Bas T<sub>c</sub> ». Les « Haut T<sub>c</sub> » commencent à être produits industriellement avec d'excellentes performances. La supraconductivité apporte de très nombreuses opportunités, mais reste une technologie de rupture qui inquiète souvent. Les nombreuses expériences en cours devraient lever ces craintes.

## Bibliographie

- [1] L. Quettier et al., "Manufacturing Completion of the Iseult Whole body 11.7 T MRI system", IEEE Trans. On Appl. Super, vol. 28, 2018, 4400604.
- [2] <https://www.iter.org/fr/accueil>
- [3] M. Stemmler et al., "Ampacity project – Update on World's first superconducting cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Centre", 23<sup>rd</sup> International Conference on Electricity Distribution, Lyon, paper 067

# Systèmes magnétiques supraconducteurs

**FREDERICK FOREST**

SIGMAPHI – Vannes, France

**Résumé :** La supraconductivité est utilisée pour la réalisation de nombreux systèmes magnétiques délivrant des champs magnétiques très élevés irréalisables par les techniques conventionnelles à base de bobinages résistifs en cuivre. En particulier les aimants pour les accélérateurs de particules représentent un domaine majeur d'application de la supraconductivité que ce soit pour la recherche en physique des hautes énergies ou pour les applications médicales. D'autres applications sont également explorées pour d'autres domaines d'activités. Cet article présente quelques réalisations majeures en cours ou récemment achevées par l'entreprise française Sigmaphi.

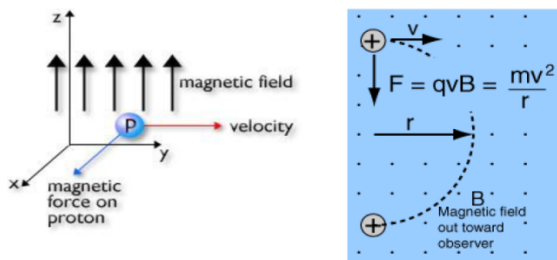
**Abstract :** Superconductivity is used for the manufacturing of many magnetic systems delivering very high fields not feasible with the classical techniques based on resistive copper windings. Especially particle accelerator magnets account for a major application market for superconductivity either for high energy physics or for medical applications. Other applications are also investigated for other markets. This paper presents some noteworthy ongoing or recent realization made by the Sigmaphi French company.

## 1. Accélérateurs, supraconductivité et magnétisme

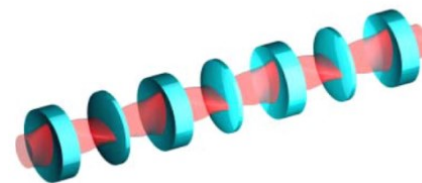
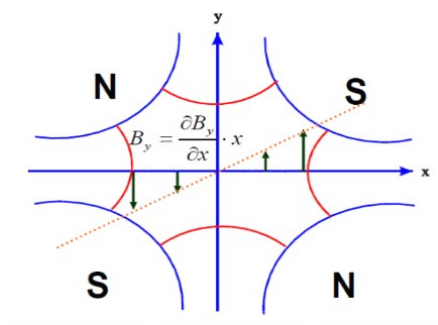
La force de Lorentz (1) qui s'exerce sur toutes particules chargées électriquement est la combinaison d'un terme proportionnel au champ électrique générant une force d'accélération et d'un terme normal au vecteur vitesse et au champ magnétique générant une force de déviation.

$$(1) \vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Cette force de déviation liée au champ magnétique est utilisée dans les accélérateurs de particules pour guider les particules via des aimants à champ dipolaire (Fig. 1) et pour focaliser les particules via des aimants à champ quadrupolaire (Fig. 2) pour une focalisation linéaire et d'ordre supérieur (sextupolaire, octupolaire) pour des focalisations non linéaires.



**Figure 1 :** déviation des particules dans un champ magnétique dipolaire



**Figure 2 :** focalisation des particules dans un champ magnétique quadrupolaire

Les accélérateurs pour la recherche en physique des hautes énergies ou pour la hadron thérapie (soin du cancer avec un faisceau de protons ou d'ions carbone Fig. 3) sont des machines pouvant être de dimensions considérables, constituées de plusieurs dizaines, centaines ou milliers de mètres d'anneaux (27 km pour l'anneau principal du CERN) ou de lignes pour accélérer les particules à l'énergie voulue et les acheminer vers les différentes salles d'expérimentation ou de soins.

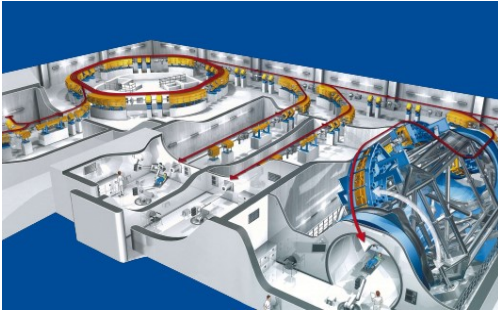


Figure 3 – Illustration de l'accélérateur de hadron thérapeutique d'Heidelberg, Allemagne

Une multitude d'aimants sont ainsi nécessaires et la forte dépendance de la rigidité magnétique (2) d'une particule à son énergie cinétique rend indispensable pour les hautes énergies le recours à la supraconductivité pour contenir les accélérateurs dans des dimensions raisonnables.

$$(2) \quad B\rho = \frac{1}{qc} \sqrt{T^2 + 2E_0 \cdot T}$$

## 2. Quelques exemples de réalisation par Sigmaphi

Sigmaphi est une PME française spécialisée dans les systèmes magnétiques pour les accélérateurs de particules. Les aimants supraconducteurs sont des objets particulièrement complexes soumis à des forces électromagnétiques souvent considérables et fonctionnant à très basse température (-268°C) afin de maintenir les bobinages à l'état supraconducteur.

Sigmaphi a livré et installé en 2017 un dipôle et deux quadropoles supraconducteurs pour le nouveau spectromètre de l'accélérateur du laboratoire Jefferson Lab, USA (Fig. 4) et d'autres réalisations sont en cours pour le CEA et le CERN.



Figure 4 : Quadropôle supraconducteur pour JLAB

Sigmaphi mène également un programme de R&D important pour explorer et développer de nouvelles

applications de la supraconductivité avec notamment la réalisation d'un démonstrateur d'aimant supraconducteur pour le stockage d'énergie (Fig. 5) et d'un démonstrateur de lanceur électromagnétique supraconducteur (Fig. 6) en collaboration scientifique avec le CNRS et l'Institut Saint Louis et le soutien financier de la DGA via le programme Rapid d'aide à la recherche industrielle.



Figure 5 – Aimant supraconducteur de stockage d'énergie

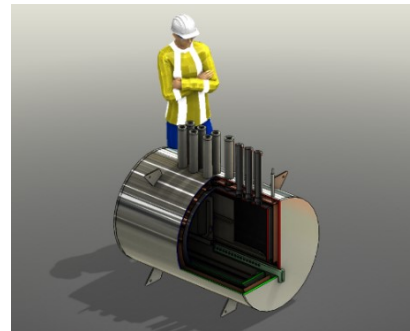


Figure 6 – Lanceur électromagnétique

Ce programme de R&D s'appuie sur les progrès les plus récents dans le domaine des matériaux supraconducteurs à haute température afin de repousser les limites actuelles de densité d'énergie magnétique stockée et démontrer la faisabilité technique d'un nouveau concept de lanceur électromagnétique. Ces quelques exemples montrent que le potentiel d'application de la supraconductivité reste considérable et offre des perspectives de développement importantes aussi bien dans le domaine scientifique qu'industriel.

## 3. Références

- [1] P. Brindza, S. Lassister, E. Sun & M. Fowler; JeffersonLab; F. Forest, A. Porhiel, D. Ramage, P-E. Maillard, S. Antoine and V. Sigalo; Sigmaphi "Final Assembly and Factory Testing of the Jefferson Lab SHMS Spectrometer Quadrupole and Dipole Superconducting Magnets", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol 27, 2017.
- [2] A. Badel, J. Cicéron, R. Pasquet, E. Voisin, F. Forest, M. Schnieder, P. Tixador, "Design of a Superconducting Self-Supplied Electromagnetic Launcher Proof of Concept Using HTS REBCO Conductor", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, 3601605, 2017.

# Les aimants permanents : les ressources en « terres rares » et en Néodyme dans le monde

JEAN-PAUL YONNET

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2E Lab, 38000 Grenoble, France

**Résumé :** L'invention des aimants Néodyme Fer Bore (NdFeB) en 1983 a été un progrès très important. Ces aimants surclassent largement leurs prédécesseurs grâce à leur induction rémanente très élevée associée à un champ coercitif important. On les trouve aujourd'hui dans de très nombreuses applications, aussi bien dans les dispositifs de taille miniature (dans les montres à quartz par exemple) que dans les gros systèmes (moteurs de véhicules électriques ou d'éoliennes).

La disponibilité des matières premières, en particulier du Néodyme, est un problème important. Actuellement les chinois dominent très largement le marché des terres rares, à la fois pour le Néodyme et pour les aimants NdFeB. Les tensions sur ces marchés ont conduit au développement de sources concurrentes. La production mondiale de Néodyme est en cours de diversification, mais la tension reste toujours importante sur le Dysprosium.

## 1. Les aimants permanents « terres rares »

Les Terres Rares ont révolutionné les aimants permanents. Les aimants « Samarium Cobalt » ont été découverts à la fin des années 60. Leur aptitude à résister à des champs inverses les rend pratiquement impossible à désaimanter. Cette propriété a permis de développer les applications fonctionnant en répulsion comme les paliers magnétiques.

En 1983, une nouvelle génération d'aimants permanents terres rares a été inventée : les aimants « Néodyme Fer Bore ». Ces aimants possèdent une induction rémanente très élevée associée à un champ coercitif important. Le Néodyme est beaucoup plus abondant que le Samarium, et le fer est nettement moins cher que le Cobalt. Ils sont particulièrement bien adaptés par les applications à température ambiante : disques durs, imagerie médicale, etc.

La figure 1 montre la très forte évolution du produit  $(B.H)_{max}$  des aimants avec l'invention des aimants NdFeB. Ce produit  $(B.H)_{max}$  représente l'énergie magnétique maximale que peut envoyer un aimant dans un entrefer. La valeur du  $(B.H)_{max}$  de 50 MGOe ou de 400 kJ/m<sup>3</sup> correspond à une induction rémanente légèrement supérieure à 1,4 T.

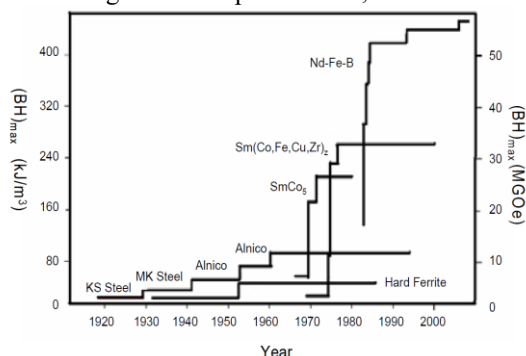


Figure 1 : Evolution du  $(B.H)_{max}$  des aimants

Le marché de ces aimants NdFeB a aujourd'hui très largement dépassé celui des autres aimants. La demande est en forte croissance avec le développement des moteurs de véhicules électriques et des éoliennes. Cette croissance est autour de 15 à 20% par an. Ceci

conduit à se poser régulièrement la question sur la disponibilité des matières premières, en particulier les « terres rares ».

## 2. Les terres rares utilisées dans les aimants

Les terres rares sont les éléments 57 à 71 de la classification périodique des éléments. Ils sont généralement présentés à part ; il faudrait les glisser entre le Lanthane (57) et l'Hafnium (72). Ces éléments ont des propriétés magnétiques importantes liées à leur structure électronique.

Dans les aimants permanents, on utilise surtout le Néodyme (Nd, 60), le Praséodyme (Pr, 59) et le Samarium (Sm, 62) pour obtenir une induction rémanente élevée et un grand champ coercitif. Une autre terre rare est utilisée dans les aimants Néodyme Fer Bore, le Dysprosium (Dy, 66), pour accroître le champ coercitif dans les applications travaillant à température élevée comme les moteurs électriques.

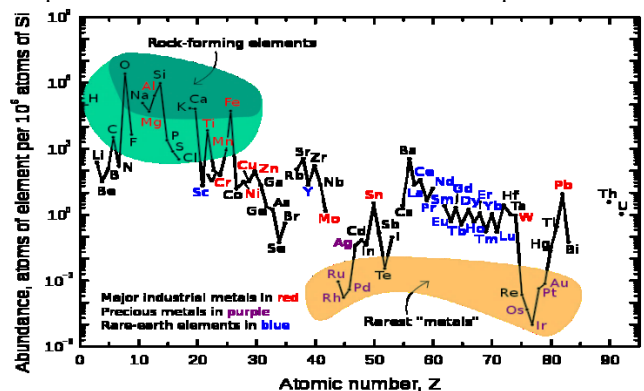


Figure 2 : L'abondance des éléments dans la croûte terrestre

La figure 2 présente l'abondance des éléments sur la croûte terrestre. On voit que les « terres rares », c'est-à-dire les éléments La (Lanthane) à Lu (Lutétium), ne sont pas très rares. Le problème principal, c'est de trouver des minerais suffisamment concentrés en terres rares pour que l'exploitation puisse être rentable.

Les deux principaux minerais sont la bastnasite et la monasite. Dans les années 60, la découverte de gisements de bastnasite aux Etats-Unis (MountainPass,



CA), a permis de d'extraire ces terres rares en quantité notable et de développer leurs utilisations. Dans les années 80, ce sont les minerais chinois (Baotou) qui ont pris le relais. On considérait à l'époque que les chinois possédaient 85% des réserves mondiales de terres rares. A cause du faible prix des terres rares chinoises, les mines américaines ont fermé et les chinois sont devenus le principal producteur dans le monde de minerais de terres rares, de terres rares séparées, et d'aimants permanents. Actuellement c'est de l'ordre de 85 à 90% des aimants NdFeB (Néodyme Fer Bore) qui sont produits en Chine.

La production mondiale de Néodyme est de 20 000 tonnes, celle de Samarium de 2 500 tonnes et celle de Dysprosium de 1 250 tonnes (source USGS pour 2015).

### 3. La prise de conscience de l'importance stratégique des terres rares

Le gouvernement chinois a cherché à limiter la production, en particulier à cause de la pollution engendrée par l'exploitation minière. Cela a produit une très forte instabilité sur les prix des terres rares, et sur les aimants terres rares. Entre 2010 et 2011, le prix du Néodyme a été multiplié par 6. Celui du Dysprosium a été multiplié par 10. Ces prix sont ensuite redescendus mais sans atteindre leur niveau d'avant la crise. C'est à ce moment-là que les pays industrialisés ont réellement pris conscience de l'importance stratégique des terres rares.

Dans le domaine de la recherche, on a alors vu se développer des projets d'aimants NdFeB sans Dysprosium, des aimants sans terres rares, et même des moteurs sans aimants. En parallèle, les travaux de recherche sur la récupération des aimants et leur recyclage ont beaucoup avancé.

Au niveau des ressources minières, la prospection s'est intensifiée, et on a localisé des minerais exploitables dans de nombreuses régions du monde. Depuis 2012, des mines fermées ont été ré-ouvertes comme celle de Mountain Pass (Etats-Unis) par la société Molycorp. Cette société s'est ensuite déclarée en faillite à cause d'un excès d'endettement en 2015. En Australie, la société Lynas exploite des mines importantes (Mount Weld), et sépare les terres rares à Kuantan en Malaisie. Sa production est en croissance permanente.

De nombreux autres projets d'exploitation minière se développent : en Australie (Browns Range / Dy, Nolans Bore, Yangibana), au Canada (Hoidas Lake, Thor Lake, Strange Lake, Eco Ridge, Nechalacho), aux Etats-Unis (Alaska, Nebraska, Texas, Montana), au Brésil, en Afrique du Sud, en Tanzanie, en Namibie, à Madagascar, au Groenland (Kvanefjeld), en Suède (Norra Kärr / Dy et Nd), au Viet-Nam (Lai Chau), en Corée, etc.

Aujourd'hui, les spécialistes considèrent que les réserves chinoises ne représentent que 35% des réserves mondiales, au lieu de 85 % dans les années 80.

Les investissements nécessaires pour exploiter les minerais et pour ensuite séparer les terres rares sont très importants. Ces installations sont lourdes et

longues à mettre en place. Il faudra un peu de temps avant que la part des terres rares chinoises soit notablement réduite, mais tout est en place pour y arriver.

Cette diversité des approvisionnements va permettre de stabiliser les prix, et de rendre plus facile le développement des utilisations.

### 4. Le cas particulier du Dysprosium

Dans les minerais, on trouve en même temps toute la série des terres rares. En général, les minerais sont riches en terres rares légères comme le Néodyme, et un peu moins en Praséodyme et en Samarium. Les terres rares lourdes comme le Dysprosium ne sont qu'en quantité très faibles.

Le Dysprosium est utilisé dans les aimants fonctionnant à température élevée. En remplaçant une petite partie du Néodyme par du Dysprosium, l'induction rémanente diminue légèrement mais le champ coercitif s'accroît notablement, permettant à l'aimant de fonctionner sans problème à 150°C, dans les moteurs par exemple.

Les minerais chinois contiennent un peu de Dysprosium, mais la plupart des autres minerais sont très pauvres en Dysprosium. Ce qui fait que le problème de la disponibilité de cette terre rare va perdurer.

Les Etats-Unis ont identifié cette pénurie. Au début des années 2010, ils ont acheté des stocks importants sur le marché pour leurs propres applications stratégiques.

Plus récemment, le champ coercitif des aimants sans Dysprosium a été notablement amélioré en contrôlant la taille des grains et la compaction avant frittage lors de la fabrication. Ces améliorations sont en cours d'intégration dans les fabrications industrielles.

### 5. Conclusion

La production des terres rares pour les aimants permanents est en pleine évolution. La demande est de plus en plus importante, à cause du développement des véhicules électriques et hybrides, des éoliennes, des systèmes d'imagerie par résonance magnétique, de tous les systèmes miniaturisés, etc.

Suite au quasi monopole chinois et aux variations importantes de prix, l'exploitation de nouvelles mines est en cours, ce qui fait que la production de terres rares va notablement augmenter dans les prochaines années. Les tensions sur le Néodyme devraient s'atténuer, et les volumes disponibles vont s'accroître.

Le seul problème persistant reste celui du Dysprosium, qui va rester peu abondant.

Le recyclage des aimants est une voie qui se développe, ce qui permettra de réutiliser les terres rares.

### 6. Documentation et références

Conférences REPM (Rare Earth Permanent Magnet and their Applications) : Crête (Gr) 2008, Bled (Slo) 2010, Nagasaki (Jap) 2012, Annapolis (USA) 2014, Darmstadt (All) 2016

# PLER – Production locale d'électricité renouvelable

**Manuela SECHILARIU, Fabrice LOCMONT, Hongwei WU**

Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne (UTC), EA 7284 AVENUES,  
Centre Pierre Guillaumat CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

E-Mail: [manuela.sechilariu@utc.fr](mailto:manuela.sechilariu@utc.fr) ; [fabrice.locmont@utc.fr](mailto:fabrice.locmont@utc.fr) . [hongwei.wu@utc.fr](mailto:hongwei.wu@utc.fr)

**Résumé :** Les zones urbaines présentent un grand potentiel pour la mise en place de micro-réseaux basés sur des sources photovoltaïques (PV) et cela grâce aux toitures des bâtiments. Les bâtiments tertiaires, dont la consommation est réalisée principalement pendant la journée, peuvent consommer une large part de cette énergie et contribuer au lissage des pics d'appel de puissance du réseau public. De plus, une production locale, à travers un micro-réseau, peut être mieux dimensionnée pour correspondre à la puissance nécessaire aux utilisateurs finaux qui, à leur tour, peuvent plus facilement accepter un délestage partiel des charges. Dans ce contexte, sur la base de sources PV, le micro-réseau proposé travaille en mode producteur-consommateur en respectant les exigences du réseau public, via une interface intelligente. Cette interface, en communication avec le smart grid, avec l'utilisateur final et avec des bases de métadonnées, est capable de gérer de façon optimale les flux de puissance. La question scientifique posée concerne la gestion optimale d'énergie dans un contexte de production intermittente et incertaine. Également, assurer la communication de données en temps réel et la coordination avec l'optimisation des coûts énergétiques seront des nouveaux challenges et aussi un nouveau pas vers la smart city.

**Abstract:** Urban areas have great potential for the implementation of microgrids based on photovoltaic (PV) sources, thanks to the roofs of buildings. Tertiary buildings, whose consumption is mainly done during the day, can consume a large part of this energy and contribute to the smoothing of the power demand peaks of the grid public. In addition, local production, through a microgrid, can be better sized to match the power required by the end-users, who, in turn, can more easily accept partial load shedding. In this context, based on PV sources, the microgrid works in producer-consumer mode by respecting the requirements of the power grid, via an intelligent interface. This interface, in communication with the smart grid, with the end-user, and with metadata bases, is able to optimally manage the power flows. The scientific question lies on the optimal management of energy in a context of intermittent and uncertain production. Also, ensuring real-time data communication and coordination with the energy costs optimization be new challenges and a new step towards the smart city.

**Mots clés :** Micro-réseau intégré au bâtiment, photovoltaïque, gestion d'énergie, contrôle, optimisation

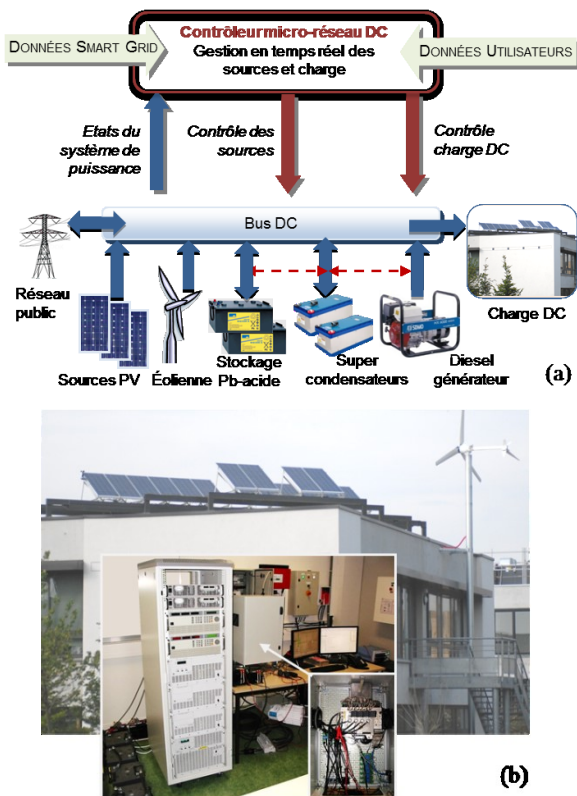
## 1. Introduction

Les accélérateurs Afin d'augmenter le niveau d'intégration des sources d'énergie renouvelable et d'obtenir un réseau électrique robuste, une intelligence est nécessaire pour assurer des flux optimaux à diverses fins, qui vont de la stabilité en fréquence et en tension à des aspects économiques en passant par une possibilité de fourniture de services système. Ainsi, les micro-réseaux en communication avec le réseau électrique intelligent (*smart grid*) sont étudiés afin d'apporter des contributions concernant la topologie, le contrôle, l'interfaçage et l'ilotage. Devant la complexité de la problématique, il y a une multitude de travaux de recherche qui tentent de couvrir tous les domaines, de la régulation centrale jusqu'à la charge intelligente communicante d'un habitat, de la communication et la transmission des données en temps réel jusqu'à la gestion et la tarification dynamique. Dans ce contexte, à la fois complexe, dense et très dynamique, notre objectif est d'étudier les micro-réseaux électriques et

leurs topologies optimales, en s'attachant particulièrement au micro-réseau intégré au bâti producteur-consommateur et représentatif au niveau de la gestion locale de production d'électricité renouvelable. La question scientifique posée concerne la gestion optimale d'énergie dans un contexte de production intermittente et incertaine.

## 2. Production locale d'électricité renouvelable

L'optimisation globale et sous contraintes d'un micro-réseau local requiert une approche systémique en intégrant les aspects liés à l'intermittence de la production, aux incertitudes, aux caractéristiques du bâtiment, à la géométrie urbaine, aux politiques urbaines et à la sociologie de l'utilisateur. La figure 1 montre le schéma bloc du micro-réseau étudié et la plateforme technologique PLER implantée en 2008 au Centre Pierre Guillaumat de l'UTC.



**Figure 1 :** Schéma bloc du micro-réseau (a) et image de la plateforme technologique PLER (b).

Nous observons que ce système comporte trois types d'énergie ; une énergie permanente (réseau public, PV, éolienne), une énergie transitoire (stockages Li-ion et Pb-acide, diesel générateur) et une énergie impulsionnelle (supercondensateurs).

L'originalité du positionnement par rapport aux travaux publiés dans la littérature est le micro-réseau urbain de type « courant continu » et son système de supervision multicouche et multi-échelle proposé dans [1]. Il s'agit d'un contrôleur intelligent se basant sur l'interaction entre les algorithmes discrets et ceux continus de commande pour une recherche de solutions optimales de la gestion d'énergie du micro-réseau. En s'appuyant sur une modélisation numérique et mathématique du système, ces travaux ont pour objectif de proposer des stratégies de gestion intelligente d'énergie. Les études portent globalement sur l'optimisation technico-économique des sources et des charges, le stockage optimisé et l'hybridation des sources, l'anticipation de la production et de la consommation pour différentes échelles, les modes de gestion de la flexibilité de production et le délestage optimisé en temps réel.

Les verrous scientifiques, technologiques et sociétaux résident dans :

- l'optimisation des flux de puissances en temps réel et la maîtrise des incertitudes (ces difficultés sont liées à l'intermittence de production et de consommation) ;
- la conception et le développement technologique des interfaces communicantes, entre le micro-réseau et le réseau électrique intelligent, adaptées aux différentes échelles (bâtiment, quartier, ville, territoire) ;
- la modélisation sociale, l'étude de l'impact sociétal et du taux d'acceptabilité de la part de l'utilisateur face à ces technologies.

Les résultats obtenus portent particulièrement sur la conception et le développement du système de gestion intelligente d'énergie électrique qui optimise les transferts de puissance au sein du micro-réseau, s'adapte aux conditions d'usage, gère efficacement les besoins, et qui tient compte des contraintes diverses afin de minimiser la consommation d'énergie en provenance du réseau public. La plateforme technologique PLER permet de tester et valider des algorithmes de commande complexes.

PLER est aussi un lieu d'expérimentation pédagogique pour les élèves-ingénieur de l'UTC. De nombreux projets d'étudiants, encadrés par les enseignants-chercheurs, sont menés chaque semestre.

### 3. Conclusion et perspectives

Les travaux décrits mettent en évidence la complexité du problème global du réseau intelligent, qui, à son tour, requiert la réalisation de micro-réseaux. L'étude du fonctionnement intégré de deux micro-réseaux en communication sera réalisée dans le futur.

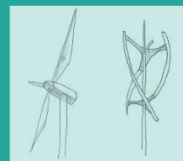
### 4. Remerciements

La plateforme PLER a été réalisée grâce aux financements propres du laboratoire et de l'UTC ; le projet de recherche a été financé par le CNRS et le CR de Picardie dans le cadre des appels à projets.

### 5. Référence

- [1] M. Sechilariu, F. Locment, *Urban DC Microgrid: intelligent control and power flow optimization*, 1<sup>st</sup> ed., Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2016.

# LycéeEole 2019



Participez au concours d'éoliennes LycéeEole  
dédié aux lycées d'Ile-de-France  
Ouvert aux équipes projet des classes de 1ere et terminale S & STIDD

Mercredi 17 Avril 2019

Pré-inscription: <https://goo.gl/forms/11bveKiwyCRFSqyv1>



Scan me



Vous pouvez avoir une idée de ce que l'on fait pendant le concours dédié au DUT GIM (Genie Industriel & Maintenance) :

[https://www.youtube.com/watch?v=z\\_9FBLycPwE&t=182s](https://www.youtube.com/watch?v=z_9FBLycPwE&t=182s)

# Abonnez vous à la Revue 3EI

Voir page 84



## BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI Année 2019

n°95 ( Janvier 2019 ), n°96 ( Avril 2019 ), n°97 ( Juillet 2019 ) et n°98 ( Octobre 2019 )

**Pour l'année 2019, nous vous proposons**

**3 formules d'abonnement :**

- Formule « papier et accès aux articles numériques au format pdf » sur le site SEE revue 3EI
- Formule « accès aux articles numériques au format pdf SEUL » sur le site SEE revue 3EI
- FORMULE ECO : Adhésion SEE + Tarif préférentiel à la revue 3E.I format papier + Accès numérique aux revues 3E.I et REE + Tarifs préférentiels conférences et journées d'études + Réduction fiscale (voir en page de couverture)

Depuis le 01/01/2017, les tarifs pour la revue 3EI sont les suivants :

➤ <u>Abonnement individuel</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	42 € TTC	53 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	
➤ <u>Abonnement « Institutionnel »</u>	France et pays de l'UE	Pays hors UE
<u>Abonnement papier et accès aux articles numériques</u>	60 € TTC	75 € HT
<u>Accès aux articles numériques</u>	30 € TTC	

L'abonnement institutionnel concerne les bibliothèques, CDI, laboratoires, entreprises, universités, écoles d'ingénieur, lycée, IUT ...). Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service).

**TRES IMPORTANT** L'adresse électronique à laquelle vous recevrez le code d'accès au site de la SEE-revue 3EI est indispensable en cas d'abonnement avec accès numérique.

<p><b>Nom :</b> ..... <b>Prénom :</b> .....</p> <p><b>Adresse d'expédition de la revue 3EI :</b> .....</p> <p><b>Rue, n° :</b> .....</p> <p><b>Code postal :</b> ..... <b>Ville :</b> .....</p> <p><b>Pays :</b> .....</p> <p><b>Adresse électronique :</b> .....</p> <p><b>Activité (pour statistiques) :</b> .....</p>
--

Adresser le bulletin renseigné, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :  
**SEE- la revue 3EI** ou d'un bon de commande pour les institutions, à l'adresse suivante

SEE-la revue 3EI 17 rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16

**Vous pouvez également vous abonner sur le site**  
<http://www.see.asso.fr/3ei>

## 15 ans d'archives 3E.I en DVD

La SEE vous propose d'acquérir le DVD « archives » 3E.I regroupant **tous les articles des numéros 0 à 59, de mai 1994 à décembre 2009, sous forme numérique** (PDF scannés/ vectoriels).

Pour toute commande merci de remplir le bulletin joint ci-dessous et de l'envoyer à l'adresse indiquée :



### BON DE COMMANDE

Raison Sociale :  
 Adresse :  
 Ville :  
 Tel. :  
 E-mail :

Nom du contact : M/Mme  
 Pays :  
 Fax :

	France et pays de l'Union Européenne	Hors Union Européenne
Tarif individuel	60 €	70 €
Tarif collectivité (CDI, laboratoires...)	100 €	110 €

**MONTANT TOTAL DE LA COMMANDE : .....€ HT soit .....€ TTC (TVA 20%).**

#### REGLEMENT:

- Par chèque bancaire à l'ordre de la « SEE »
- Par virement bancaire :  
**BNP Paribas, Paris Associations**  
**(02837)**

**RIB:** 30004 00274 00010336242 58  
**IBAN:** FR76 3000 4002 7400 0103 3624 258  
**BIC:** BNPAFRPPAA

Date, Lieu

Cachet, Signature  
 (Précédés de la mention "lu et approuvé")

**Contact : M<sup>lle</sup> Mélisande de LASSENCE**  
 Tél : 01.56.90.37.17 - [abo@see.asso.fr](mailto:abo@see.asso.fr)

