

17<sup>e</sup> année

# La Revue



# 3E.I

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



Crédit photos : Airbus - Thallès - Messier Bugatti

**Vers l'avion  
plus  
électrique**

*Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE*

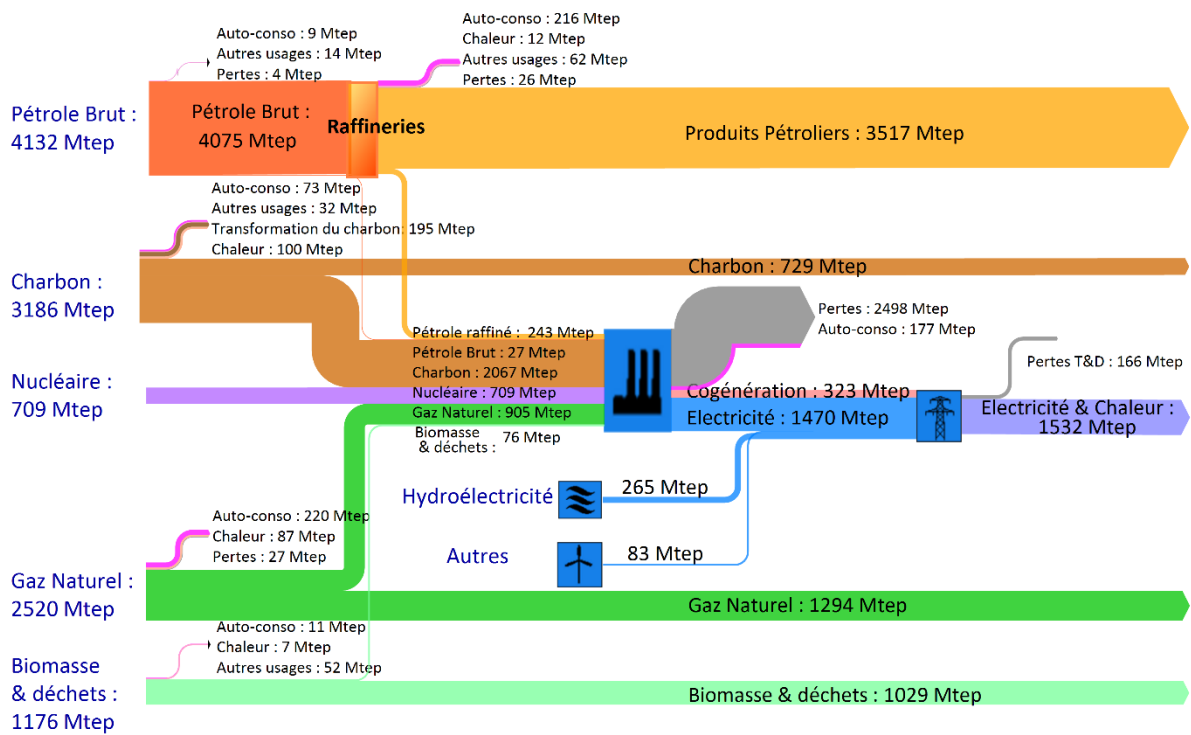
**ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**



**Société de l'Electricité, de l'Electronique  
et des Technologies de l'Information  
et de la Communication**

**N° 64 - Mars 2011**

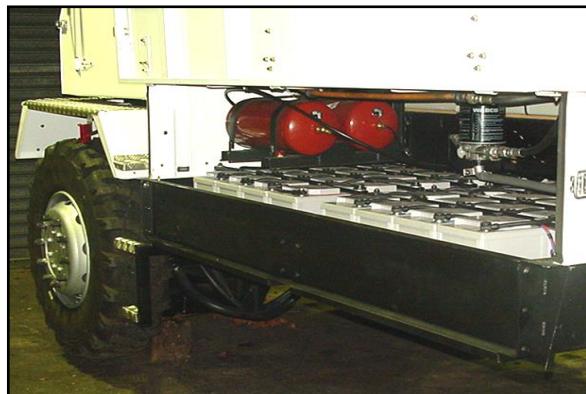




Chaine de transformation de l'énergie (année 2007)



vue du véhicule Banc d'essais ECCE



Implantation des batteries



locomotive



Stator

Rotor à cage d'écureuil



Moteur asynchrone



## La Revue 3EI

publication trimestrielle  
du Cercle Thématique 13-01  
de la SEE

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

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16  
Tél : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19  
site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

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

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

La Revue 3EI, Édition SEE,  
17 rue de l'Amiral Hamelin  
75783 PARIS Cedex 16

**Directeur de la publication**  
Paul FRIEDEL  
Président de la SEE

**Rédactrice en Chef**  
Marie Michèle LE BIHAN

Adresser les propositions d'article à :  
[revue3ei.art@voila.fr](mailto:revue3ei.art@voila.fr)

**Communication**  
Micheline BERTAUX  
[communication@see.asso.fr](mailto:communication@see.asso.fr)  
01 56 90 37 17

publicité au rapport

**Abonnement** (4 numéros par an)  
déc. 2010, mars, juin, sept. 2011.

tarifs TTC :

Individuel :

France et CEE.....38 €

Pays hors CEE.....48 €

Collectivités

France et CEE.....54 €

Pays hors CEE.....67 €

**Gestion abonnement**  
[revue3ei@see.asso.fr](mailto:revue3ei@see.asso.fr)

**Réalisation et impression**  
Repro-Systèmes  
23, rue de Verdun 77181 Le Pin

**Routage et Expédition**  
Départ Presse  
ZI les Richardets  
93966 Noisy le Grand

**Dépôt Légal : Mars 2011**

Commission Paritaire 1212 G 78028  
ISSN 1252-770X

#### Sommaire du n° 64

#### Thème : Vers l'avion plus électrique

- p. 2 Éditorial,  
p. 3 Publications, Informations  
p. 6 L'avion tout électrique, une rupture technologique crédible  
E. FOCH Engineering Electrical System R&T Group Leader –EYNE - AIRBUS  
p. 10 Evolution des réseaux et du management énergétique  
N. ROUX, X. ROBOAM, H. PIQUET UNIVERSITE DE TOULOUSE  
p. 16 Alternateurs – Démarreurs pour Aéronefs  
M. MARTINEZ THALES AES 78400 CHATOU  
p. 22 Distribution et protection des réseaux de puissance  
P. RAVEL ZODIAC AEROSPACE – ECE 75020 PARIS  
p. 28 Management des charges importantes : fonction dégivrage et ECS  
N. DUQUESNE, V. GOMEZ LIEBHERR-AEROSPACE TOULOUSE  
p. 34 Les actionneurs : commandes de vol, train d'atterrissage  
S. GRAND Goodrich Actuation Systems 78530 BUC  
P. NEVORET, F. SELLES MESSIER-BUGATTI VELIZY VILLACOUBLAY  
p. 43 Challenge et Evolution des Electroniques de Puissance  
R. MEURET SAFRAN HISPANO-SUIZA  
H. MOREL SEEDS, LABORATOIRE AMPERE

#### Hors Thème

- p. 51 RFID : Etude de la localisation des outillages mobiles par la RFID  
M. FIDELIN, P. SANSEN ESIEE- AMIENS  
p. 56 Le génie électrique en France au XXIème siècle  
M. AMIET Président du Comité Scientifique Concordat GENELEC  
p. 57 Penser le long terme du secteur électrique pour réussir son efficacité énergétique  
N. MAIZI, V. MAZAURIC  
p. 61 Machines AC : conséquences de nouvelles conceptions sur le bruit d'origine  
magnétique  
R. ROMARY, J.F. BRUDNY, B. CASSORET, J.P. LECOINTE  
Université Lille Nord de France, LILLE Université d'Artois, BETHUNES  
p. 69 S'éclairer avec des leds  
P. Mottier CEA-LETI, Campus MINATEC GRENOBLE  
p. 74 ECCE véhicule hybride : du militaire vers le civil  
J-M. KAUFFMANN, D. HISSEL, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE  
M. AMIET DIRECTION GENERALE DE L'ARMEMENT  
p. 82 La locomotive du futur  
J-C. LAMURE, P. CHAPS, S. HIBON ALSTOM TRANSPORT

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'oeuvre 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).

Nous remercions vivement **Mr Régis Meuret** pour sa prise en charge du thème sur **l'avion plus électrique** de ce numéro de Mars 2011, ainsi que toute son équipe d'auteurs d'articles, formée d'industriels et de chercheurs universitaires. Cet ensemble d'articles va permettre au lecteur de découvrir les projets et l'ensemble des travaux nécessaires à l'élaboration d'une nouvelle technologie. Ce bouillonnement d'idées et cet enthousiasme : tout ce qui se passe avant qu'une technologie arrive à maturité.

Pour la partie hors thème, nous avons une collaboration avec **Mr Amiet** de la DGA (Direction Générale de l'Armement) qui se poursuivra dans le numéro de Juin. Les interventions du **Concordat Genelec**, qui a lieu tous les dix ans, et présente l'état de l'art en Génie Electrique donneront lieu à des articles balayant tous les secteurs du Génie Electrique : Electrotechnique, Electronique de puissance, Matériaux, Composants passifs.....nous remercions **Mr Amiet** pour cette fructueuse collaboration.

De juin 2011 à janvier 2012, la prévision des thèmes abordés est la suivante :

- **CEM** en Juin 2011
- Le numéro académique de Septembre 2011 sera assuré par l'académie de Créteil
- **Défaillance et durée de vie du matériel électrique** en Janvier 2012

Pour des raisons de facilité budgétaire et de clarté de renouvellement des abonnements, nous avons décidé de décaler d'un mois les dates de parutions officielles de notre revue et de les accorder avec l'année civile. Cette année encore, le dernier numéro sera le numéro 66 de Septembre 2011. A partir de l'année 2012, les quatre numéros de notre revue paraîtront en :

**Janvier, Avril, Juillet et Octobre.**

Nous remercions les auteurs d'articles spontanés qui sont toujours de grande qualité. Continuer à nous envoyer des articles pédagogiques : fiches de TP, TD, cours...Nous sommes toujours très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire et nous serons heureux de recevoir vos articles que vous aurez déposés dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est [revue3ei.art@voila.fr](mailto:revue3ei.art@voila.fr). Nous sollicitons également la participation des amoureux de l'histoire des Sciences ; les articles permettant d'alimenter cette rubrique sont les bienvenus.

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

#### **La Revue 3EI**

##### **Comité de publication**

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Pascal LOOS

Oviglio SALA

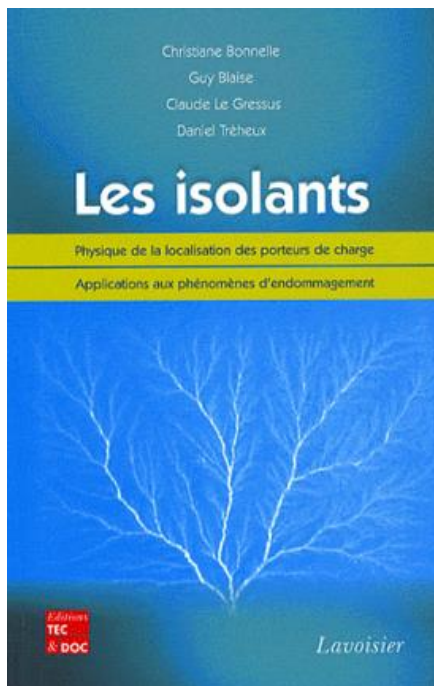
Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL

***Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,  
Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!***





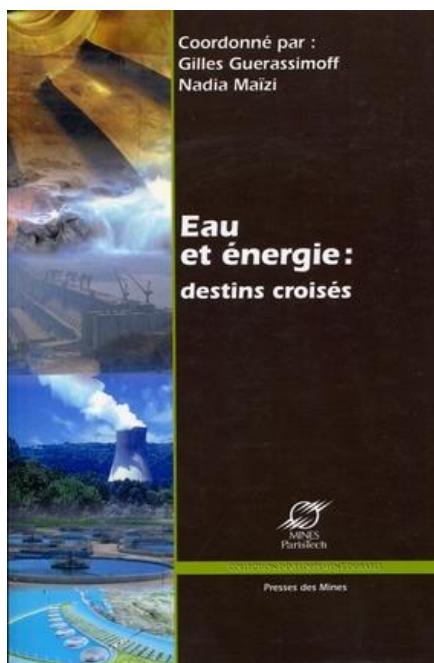
### Les isolants

Christiane Bonnelle , Guy Blaise , Claude Le Gressus , Daniel Tréheux

Editions Tec et Doc

Les problèmes technologiques associés à la fabrication et à l'utilisation des matériaux isolants demeurent nombreux et sont souvent récurrents dans beaucoup de secteurs industriels. Cette situation reflète les insuffisances des théories de l'endommagement des isolants. Cet ouvrage propose un nouveau modèle d'endommagement des isolants permettant d'en prévoir le comportement et décrit une méthode de mesures des grandeurs préconisées par ce modèle. Les phénomènes de claquage, de fracture et d'usure sont ensuite expliqués à travers ce modèle. Des applications à des problèmes technologiques variés sont présentées et plusieurs stratégies d'amélioration des matériaux y sont proposées. Les auteurs précisent les caractérisations à effectuer dans un microscope électronique à balayage pour évaluer la qualité des isolants. L'exposé de cette méthode comporte plusieurs développements originaux essentiels à la maîtrise technologique de ce type de matériaux.

Les isolants constitue un mémento original destiné à servir de guide pratique à des ingénieurs et à des chefs de projet concernés par la maîtrise technologique des isolants. Il contribuera aussi à la formation d'étudiants et à la sensibilisation de chercheurs à des nouvelles approches fondamentales des isolants.



### Eau et énergie : destins croisés

Gilles Guerassimoff , Nadia Maïzi

Editeur : Transvalor - Presses des Mines

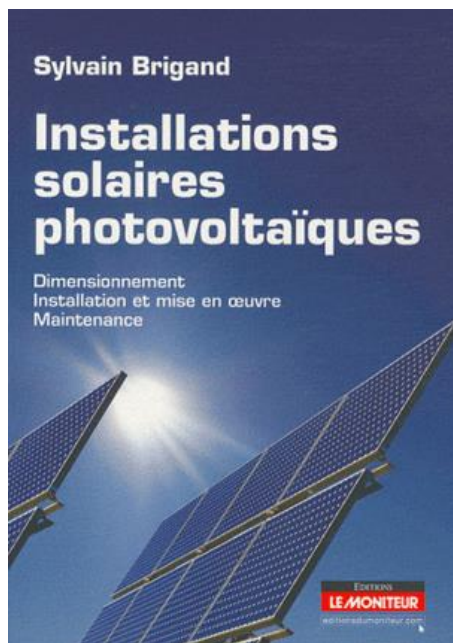
Eau et énergie : le divorce est désormais impossible pour ces deux destinées dont les trajectoires se sont imbriquées au gré de l'actualité des changements climatiques.

Car pour ces deux éléments, indispensables à nos sociétés, les synergies sont multiples. Et le débat sur les transitions énergétiques ne peut plus s'envisager sans faire référence à la question de l'eau. Une eau omniprésente pour l'énergie, et pour des volumes toujours plus importants : comment sinon refroidir les moyens de production d'électricité, produire de l'énergie hydroélectrique, des biocarburants, extraire les ressources fossiles conventionnelles voire non conventionnelles,... Une énergie indispensable pour faire de l'eau une ressource au quotidien : comment sinon pomper, traiter, dessaler, distribuer ou encore irriguer pour satisfaire nos besoins élémentaires.

Telles sont les questions qu'aborde cet ouvrage collectif décliné par 17 ingénieurs et managers qui composent la 10e promotion du Mastère OSE\* spécialisé en Optimisation des Systèmes Énergétiques de MINES ParisTech.

Après un état des lieux sur les ressources, les auteurs nous entraînent dans une description de la chaîne énergétique et de ses relations à l'eau. Puis ils nous proposent une analyse des difficultés auxquelles ces deux éléments doivent faire face de concert, à travers l'exposé des conséquences des changements climatiques et des sources de tensions liées aux conflits géopolitiques.

Alors en explorant le rôle que pourraient jouer les énergies fluviales et marines et les technologies de dessalement, ils envisagent ce que nous pourrions tirer de meilleur de cette association entre eau et énergie.



## **Installations solaires photovoltaïques**

*Dimensionnement, Installation et mise en oeuvre, maintenance*

Sylvain Brigand

Editeur : Le Moniteur

De la théorie à la pratique, l'essentiel pour dimensionner et mettre en oeuvre une installation.

Produite à partir du rayonnement solaire, l'électricité photovoltaïque est une énergie renouvelable qui présente de nombreux avantages : absence d'émission de gaz à effet de serre, production au plus près du lieu de consommation, possibilité de consommation sur place ou d'alimentation d'un réseau de distribution, fiabilité des systèmes, adaptabilité à des besoins variés. En outre, la maturité du marché et de la technologie permet des solutions architecturales et esthétiques accomplies, offrant aux concepteurs des opportunités nouvelles. Cet ouvrage vise à donner une information pratique et complète sur les aspects techniques du fonctionnement, du dimensionnement et de la mise en oeuvre de tous les types d'installations solaires photovoltaïques. Les premiers chapitres expliquent simplement les mécanismes physiques de conversion de la lumière en électricité et décrivent les différents éléments d'une installation. Sont ensuite abordés la conception et le dimensionnement de projets photovoltaïques raccordés ou non au réseau. La pose et l'entretien des différents systèmes, garants d'un fonctionnement durable et d'une production constante, font l'objet d'un chapitre détaillé. Une étude de cas permet d'illustrer la mise en place d'un projet photovoltaïque, de sa conception à sa mise en service. Enfin, la diversité des possibilités d'utilisation et d'intégration dans le bâti est illustrée au moyen d'une quinzaine de réalisations, présentées sous forme de fiches techniques. Cet ouvrage s'adresse aussi bien aux architectes et aux maîtres d'ouvrage qui souhaitent intégrer des installations solaires photovoltaïques dans leurs projets, qu'aux maîtres d'oeuvre et entreprises en charge de la conception et de la mise en place de ces systèmes.



## **Electronique et optoélectronique organiques**

André Moliton

Editeur : Springer

Ce livre présente en détail les principes et les applications de ce que l'on appelle plus généralement "électronique plastique" ou "électronique souple", en opposition à l'électronique conventionnelle ou "inorganique" qui se développe exclusivement sur des supports rigides.

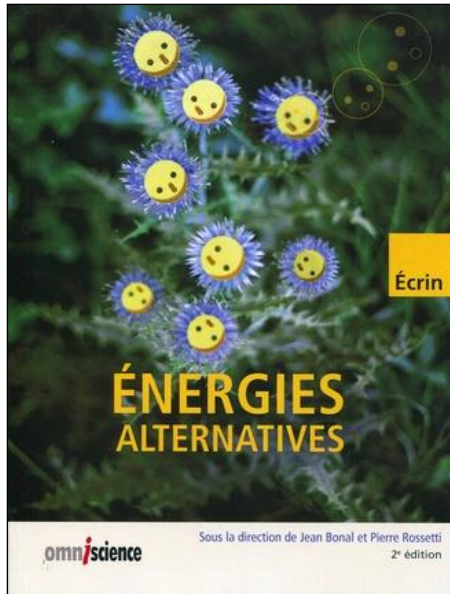
Il expose d'abord les fondements théoriques de ce domaine issus des recherches menées tout au long du XXe siècle par les physiciens et les chimistes du solide organique : on y trouve notamment les bases de la théorie des matériaux unidimensionnels et des semiconducteurs organiques

Il décrit ensuite les divers composants électroniques/optoélectroniques auxquels ces matériaux organiques ont donné naissance en à peine vingt ans après les publications fondatrices des années 1980. Nombre de ces composants ou appareils organiques sont désormais commercialisés, ou prêts à l'être, dans des produits aussi divers que les écrans à angles de vue élargis, les cellules solaires destinées à recouvrir des surfaces souples, les panneaux et dalles lumineuses, les transistors de commande des pixels, etc.

Le fonctionnement, mais aussi les améliorations successives de ces composants organiques, sont examinés dans ce livre particulièrement utile à tous ceux - ingénieurs, électroniciens ou chercheurs - qui souhaitent pénétrer le monde de l'électronique organique et se familiariser avec ses nombreuses applications industrielles.

André Moliton est Professeur émérite à l'Institut Carnot XLim de l'université de Limoges, où il a longtemps dirigé le Laboratoire d'optoélectronique plastique ainsi que le cursus de physique appliquée.





## ***Energies alternatives***

*Jean Bonal , Pierre Rossetti*

*Editeur : Omniscience*

*La Terre a mis des millions d'années à fabriquer le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium dont nous tirons l'essentiel de notre énergie. Quelques siècles suffiront à épuiser ces ressources fossiles, et quelques années seulement à leur faire atteindre des prix prohibitifs. De plus, leur consommation participe à des modifications climatiques sans précédent dans l'histoire humaine, et crée des déchets et des risques d'accidents qui sont au coeur des réflexions actuelles. Le monde va-t-il continuer sur la voie de cette boulimie énergétique ? Peut-être pas si nous réagissons dès à présent : des alternatives sont possibles !*

*Les énergies renouvelables et une bonne dose de prise de conscience citoyenne sont parmi les solutions qui s'offrent à nous pour enrayer cet engrenage infernal. Les énergies renouvelables sont inépuisables et représentent sans doute la solution la plus durable et la moins extrême. Il s'agit des énergies que le Soleil et la Terre mettent naturellement à notre disposition pour nos besoins. À nous de savoir au mieux les appréhender et mettre au point les technologies nécessaires à leur exploitation, leur stockage et leur utilisation afin de vivre demain dans un environnement plus propre. C'est à cette réflexion que ce livre nous invite.*

*À l'horizon 2020, l'Europe s'engage à produire 20% de son énergie à partir de sources d'énergie renouvelables et à porter à 10% la part des biocarburants. Mais l'alternative doit se traduire aussi par une volonté politique forte et par une remise en question de nos habitudes face à la consommation d'énergie. Cet ouvrage rassemble les informations les plus récentes et les plus pertinentes, il nous propose un état des lieux synthétique de toutes les énergies renouvelables et nous présente sans artifice leur véritable potentiel. Il développe aussi trois points stratégiques dans cette réflexion : le stockage de l'électricité, l'habitat et les transports. Ce livre est la référence de ceux qui désirent comprendre les enjeux liés à l'énergie.*

# L'avion tout électrique, une rupture technologique crédible

**Etienne FOCH**

Engineering Electrical System R&T Group Leader – EYNE - AIRBUS

[etienne.foch@airbus.com](mailto:etienne.foch@airbus.com)

**Résumé :** Comme dans d'autres secteurs industriels, la technologie du plus électrique s'impose progressivement dans les systèmes embarqués aéronautiques.

La mue du plus électrique dans l'industrie automobile n'est pas facile. Les solutions restent variées allant du micro-hybride au tout électrique. Le bénéfice écologique est mis en avant. La performance d'autonomie d'une voiture tout électrique est réduite par rapport à une voiture à moteur classique. Les investissements sont énormes.

La rationalisation des énergies embarquées pour les avions de plus de 100 places et les avancées des technologies plus électriques poussent l'aéronautique à relever le challenge du tout électrique. Ce changement ne se fera que si les solutions proposées montrent un gain par rapport à des solutions actuelles, simples et matures. Comme dans l'automobile, cette évolution demande une refonte de l'architecture des systèmes embarqués de puissance de la conception jusqu'à l'industrialisation, sans oublier l'utilisateur final, c'est à dire la compagnie aérienne.

## 1. Que signifie l'avion tout électrique ?

Tous les systèmes avion ont besoin d'électricité et deviennent de plus en plus électrique. La puissance des générateurs électriques principaux d'un A320 est de 180kVA et de 600kVA pour un A380, soit en simplifiant 1kVA par passager.

L'avion communément appelé « tout électrique » ne vise pas le remplacement de la motorisation des avions par des moteurs électriques qui entraîneraient des soufflantes dont la puissance serait de l'ordre de 10MW. Cette idée très prospective ne sera pas abordée dans cet article, nous allons rester dans des domaines beaucoup plus réalistes.

L'avion « tout électrique » consiste à électrifier tous les systèmes de l'avion. En effet, les systèmes sont alimentés par quatre réseaux de puissance de types très différents :

L'avionique, certaines pompes, les ventilateurs, l'éclairage et le commercial pour les besoins cabine sont alimentés par l'électricité

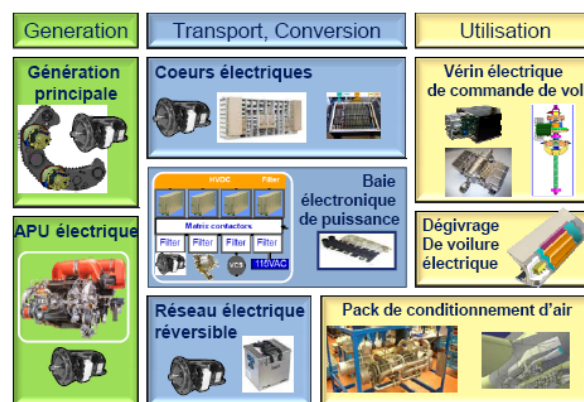
La pressurisation et le conditionnement d'air cabine utilisent l'énergie pneumatique prélevée sur les étages de compression des moteurs après avoir été recyclés dans un pack de conditionnement d'air. Le dégivrage de la voilure utilise le même prélèvement d'air chaud à la sortie des moteurs. Ce sont les plus gros consommateurs d'énergie. Le démarrage des moteurs est aussi pneumatique.

Les systèmes de commandes de vol et de trains d'atterrissage sont actionnés par des vérins hydrauliques alimentés par des pompes entraînées directement par les moteurs ou par des pompes électriques alimentées par le réseau électrique,

L'alimentation en carburant des moteurs et le système de lubrification sont fournis par des pompes entraînées par les moteurs au moyen d'un arbre mécanique,

La figure ci-dessous schématise ce que pourrait être un avion « tout électrique » :

### Une nouvelle chaîne d'énergie



**Figure 1 :** Les conséquences de l'électrification de ces réseaux de puissance dépendent de leur type.

Les conséquences de l'électrification de ces réseaux de puissance dépendent de leur type.

#### 1.1. Le remplacement du réseau pneumatique

L'air de la cabine ne vient plus des moteurs mais d'entrées d'air spécifiques alimentant des compresseurs d'air électrique qui alimentent deux packs (Pack de conditionnement d'air sur la figure précédente). Le dégivrage de la voilure (Dégivrage de voilure électrique) est fait à partir de tapis chauffants. Le démarrage moteur est réalisé électriquement à partir des générateurs qui deviennent générateur/démarrageurs (génération principale).



La puissance requise est multipliée par quatre par rapport à un avion d'aujourd'hui. Ce niveau de puissance demande d'augmenter les tensions et d'introduire de l'électronique de puissance pour contrôler les compresseurs électriques, le démarrage des moteurs et aussi la régulation en température des tapis de dégivrage de la voilure.

C'est le challenge que Boeing a relevé sur son dernier avion le 787.

### 1.2. Le remplacement du réseau hydraulique

Les avions possèdent en général trois circuits hydrauliques pour répondre aux critères de certification de redondance et de ségrégation. L'hydraulique a une très forte densité de puissance et est bien adaptée à des zones confinées comme les empennages et les bouts de voilure. Les systèmes de commandes de vol et de train d'atterrissage ont besoin de répondre rapidement à des pics de puissance lors des sorties ou des rentrées des trains ou de certaines manœuvres demandées par le pilote.

Dans les solutions électriques, les vérins hydrauliques sont remplacés par des vérins électro-hydrauliques ou électromécaniques pilotés par une électronique de puissance (Vérins électriques de commande de vol). Ces nouveaux vérins plus volumineux sont plus difficiles à installer mais permettent de remplacer les tuyauteries hydrauliques rigides par des circuits électriques plus souples à installer. La performance dynamique de ces vérins est comparable à celle demandée aux vérins hydrauliques.

Cette étape a été déjà partiellement franchie par Airbus depuis l'A380, en remplaçant un circuit hydraulique par un réseau de vérins électro-hydrauliques alimenté par le réseau électrique. La suppression du réseau l'hydraulique permettra par nature la suppression du fluide hydraulique toxique vis-à-vis de l'environnement.

### 1.3. Le remplacement du réseau mécanique des pompes carburant et de lubrification des moteurs

Ce réseau est un simple arbre mécanique qui est entraîné en général par la turbine haute pression des moteurs et qui fait tourner un boîtier d'accessoires. Celui-ci entraîne les pompes mais aussi le(s) générateur(s) électrique(s), la(les) pompe(s) hydraulique(s) et la turbine de démarrage à air des moteurs. Le boîtier d'accessoires est fixé sur le moteur.

La suppression de cet arbre demande d'intégrer les générateurs/démarrateurs à l'intérieur des moteurs pour alimenter tous les accessoires au travers d'électroniques de puissance et moteurs électriques. Un démonstrateur de cette solution a été réalisé et testé par Safran et Thales dans le projet européen POA sur un moteur Rolls-Royce Trent 500. La performance économique n'est pas démontrée.

## 2. Les challenges sur le réseau électrique

Les réseaux électriques actuels sont simples et matures. Les enjeux visés par le remplacement des réseaux pneumatique et hydraulique sont une opportunité de repenser les architectures électriques des avions.

### 2.1. Le réseau électrique actuel de l'A320

Un réseau de type A320 comprend deux générateurs principaux de 90kVA/115VAC-400Hz chacun entraîné par un moteur. Ce réseau alimente toutes les charges électriques de l'avion.

En cas de perte de la génération électrique principale en vol, un générateur de secours vient assurer l'alimentation des systèmes électriques pour assurer la continuité du vol. Ce générateur de secours est alimenté hydrauliquement par une éolienne qui fournit aussi la puissance aux vérins des commandes de vol.

Il est nécessaire de faire évoluer ce réseau pour répondre à l'avion tout électrique, en appliquant des stratégies adaptées au remplacement des réseaux pneumatiques et/ou hydrauliques.

### 2.2. Le remplacement du réseau pneumatique

Le challenge est la puissance et le contrôle de gros moteurs électriques au moyen d'électroniques de puissance à intégrer dans un avion.

Le choix d'une tension plus haute rend moins facile la compatibilité avec les groupes de parcs ou les équipements standards en particulier de la cabine, mais cela ouvre une opportunité de créer un nouveau standard. Le 230VAC est un standard terrestre suffisamment répandu pour être sélectionné. Par définition, un avion vole, les phénomènes de décharges partielles doivent être compris et maîtrisés car ils accroissent avec la tension et la diminution de pression en altitude.

Il convient aussi de regarder la haute tension continue +/-270VDC directement obtenue en redressant le 230VAC. La coupure de l'arc au moyen de contacteurs HVDC électromécaniques a été démontrée par la société Zodiac. Les problèmes de stabilité, qualité et sélectivité des protections ont été regardés avec les laboratoires de recherche. Il n'y a pas de point de blocage identifié.

L'électronique de puissance est une technologie clé. Par les travaux de recherche, une densité massique de 5kVA/kg semble déjà acquise, mais l'intégration globale qui comprend les filtres et le refroidissement peut réduire cette densité à 2kVA/kg. La recherche sur les composants hautes températures et le management thermique est déterminante pour atteindre une meilleure performance globale.

### 2.3. Le remplacement du réseau hydraulique

Les challenges sont de deux types. La fiabilité de la fourniture sans interruption de la puissance électrique et l'augmentation du risque de blocage introduit par les vérins électromécaniques.

La perte de l'alimentation des commandes de vol pendant quelques secondes doit être extrêmement improbable au sens des règlements aéronautiques. Il convient donc d'assurer électriquement le transitoire entre la perte de la génération électrique normale et la mise en route de la génération secours qui dure plusieurs secondes. Un stockage de type batteries ou super-capacités serait compatible avec le besoin des commandes de vol. Ce stockage peut aussi servir à fournir les pics de puissances demandés par les commandes de vol afin d'optimiser la taille de l'éolienne. Un réseau HVDC rend plus facile l'intégration de telles fonctionnalités.

Par expérience, un vérin hydraulique ne se bloque jamais, un vérin électromécanique est plus vulnérable à ce genre de panne. Le risque de blocage peut se minimiser par des matériaux limitant les risques de blocages et des surveillances qui permettent de les anticiper, mais il sera difficile de l'éliminer. Il faudra donc imaginer des architectures tolérantes à ce type de panne.

#### 2.4. Les autres sources électriques

Parmi les autres sources électriques étudiées, il y a les piles à combustibles. Le remplacement de générateur de secours est techniquement réalisable. Cette solution a déjà été testée sur un A320.

Le remplacement de l'APU demande une puissance importante qui imposerait soit des réservoirs d'hydrogène importants, soit un reformeur de carburant, d'où une pénalité de masse importante. L'avantage est une utilisation propre au sol. Il faut aussi noter que par nature, la pile à combustible se connecte plus facilement sur un réseau HVDC que HVAC qui imposerait d'ajouter des onduleurs.

Note : L'APU (Auxiliary Power Unit) est une turbine embarquée qui sert à fournir la puissance aux systèmes de l'avion quand celui-ci est moteurs arrêtés au sol.

### 3. L'évaluation au niveau avion

L'avion tout électrique remplace des systèmes simples et matures à faible marge de progression par des systèmes plus complexes répondant mieux aux besoins avec un potentiel d'amélioration important.

#### 3.1. L'évaluation du gain sur une mission typique

La mission d'un avion est bien caractérisée en commençant par la préparation du vol, puis le décollage, la montée, la croisière, la descente, l'atterrissage et le retour jusqu'à l'arrêt des moteurs. L'estimation de la consommation de carburant est complexe, elle dépend de la masse du système, de la trainée induite pour le renouvellement de l'air cabine et l'impact de la consommation électrique sur les moteurs.

Le gain espéré est principalement sur la consommation de carburant. Il est à la fois économique et écologique. Pour avoir un ordre d'idée, sur un trajet Paris-Toulouse, 1% de gain de consommation représente 25kg. Cela

représente 500 tonnes de carburant pour 20 000 vols, soit un an de navettes Paris Toulouse. L'estimation précise du gain est en fait difficile car l'impact d'un prélèvement air ou mécanique/électrique sur le moteur n'a pas le même effet suivant le type de moteur. De plus dans les phases de ralenti moteur au sol ou en vol lors de la descente, le type de prélèvement peut avoir un impact direct sur le régime de ralenti moteur donc de la consommation sur la mission.

#### 3.2. La prise en compte des phases sol

Sur un court-moyen courrier, la consommation lors des phases sol n'est pas négligeable.

Un APU consomme 100kg/h. Si on considère ½ heure de fonctionnement entre chaque vol, la consommation est de 50kg, soit 2% de la consommation d'un Paris-Toulouse. Les groupes de parcs électriques sont souvent utilisés. Par l'ajout de un ou deux groupes suivant la taille de l'avion, l'APU pourrait être stoppé, d'où un gain de consommation immédiat.

Les gains peuvent devenir plus significatifs si on installe dans les roues des avions des moteurs électriques qui permettent de faire rouler l'avion au sol sur APU sans les moteurs. La puissance demandée est de l'ordre de 100kW compatible avec les générations de l'avion plus électrique.

#### 3.3. Les autres perspectives de gain

Les systèmes électriques ne permettront pas de gagner en fiabilité, mais devrait permettre de gagner en disponibilité grâce à la capacité d'anticiper une panne, d'isoler une panne et de reconfigurer le réseau.

Une fuite sur un équipement hydraulique entraîne la perte du circuit et demande une réparation pour effectuer le vol suivant. La panne est dite « NOGO » en aéronautique.

Lors d'un défaut dans un équipement électrique, celui-ci est isolé par son disjoncteur de ligne. Généralement les systèmes sont tolérants à la panne d'un équipement. La panne est dite « GO ».

La panne « équivalente » à la perte d'un circuit hydraulique est la perte de barre électrique dont la probabilité est plus faible d'environ de deux ordres grandeur. D'où une meilleure disponibilité globale de l'avion.

Pour l'anticipation des pannes, la surveillance des paramètres électriques associés à des modèles comportementaux des systèmes permettra de connaître finement l'état du système et d'aider à la décision de réparer immédiatement ou d'attendre la meilleure opportunité. Un simple exemple, grâce à des dispositifs de réflectométrie, il est possible de localiser un défaut électrique sur le câblage à un mètre près. Même si ces études ne sont qu'à l'état de la recherche, elle montre ce que l'on peut attendre des systèmes plus électriques.

Il est aussi à noter qu'une première analyse de cycle de vie a montré que sur les six critères considérés comme les matériaux utilisés, le stockage ou la fin de vie,



l'avion tout électrique est soit meilleur, soit équivalent aux solutions traditionnelles.

#### **4. Conclusion**

La recherche est très active et est poussée par des acteurs majeurs comme Airbus, Liebherr, Safran, Thales et Zodiac. Les avionneurs Eurocopter et Dassault y participent aussi. Le soutien des laboratoires de recherche indispensable en vue d'un tel changement est significatif. Le projet de recherche européen CleanSky SGO (Systems for Green Operation) et le projet national GENOME proposé par le CORAC permettent une collaboration étroite entre ces acteurs. Ce thème de recherche est aussi très fort aux Etats-Unis. C'est une opportunité de gain de marché pour les industriels français.

Les avantages attendus sont une économie de carburant, une rationalisation des systèmes embarqués et une maintenance améliorée pour les compagnies aériennes. La performance des solutions proposées doit encore être améliorée. L'aéronautique devrait aussi profiter des composants automobiles car les performances demandées sont très proches. Les technologies électriques évoluent vite.

L'avion tout électrique est techniquement réalisable. Des solutions partielles sont déjà opérationnelles. C'est une opportunité de repenser les architectures électriques des avions. La rupture technologique de l'avion tout électrique est une cible crédible pour la prochaine génération d'avion.

# Evolution des réseaux et du management énergétique

Nicolas ROUX, Xavier ROBOAM, Hubert PIQUET

Université de Toulouse, laboratoire LAPLACE UMR CNRS INPT UPS),

site ENSEEIHT, 2 Rue Camichel, 31071 Toulouse Cedex 7. Email : [prenom.nom@laplace.univ-tlse.fr](mailto:prenom.nom@laplace.univ-tlse.fr)

**Résumé :** ce dossier présente certaines évolutions des architectures de réseaux électriques vers un nouveau standard «HVDC» à haute tension continue. Leurs avantages et les nouvelles contraintes posées sont illustrés, notamment en termes de qualité et de stabilité. De plus, nous montrons comment ces évolutions des réseaux offrent de nouvelles opportunités en termes de management énergétique.

## 1. Introduction

Comme cela a été introduit dans le chapitre précédent, l'énergie électrique va progressivement servir de vecteur énergétique privilégié pour des fonctions autrefois alimentées par une autre forme d'énergie (hydraulique, pneumatique, mécanique). Cette évolution se fait par étape à chaque introduction d'un nouvel appareil (B787 pour Boeing, A380 puis A350 pour Airbus).

De nombreux avantages sont attendus et une description des architectures envisagées est faite dans [Mav-07]. Ces développements sont basés sur une ossature appelée canal de génération (figure 1.1), constitué ici d'une source alimentant différentes charges à travers un réseau mixte alternatif-continu basse tension (28V). Les structures actuelles de réseau sont de type arborescent : un « cœur électrique » relie la source aux différentes charges.

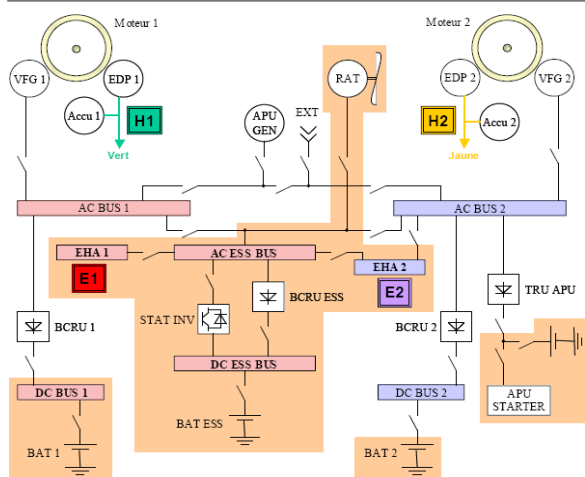


Fig 1.1. Exemple d'architecture bi-moteur

Si nous comparons ce réseau avec le réseau de transport d'électricité français, nous pouvons constater que ce dernier présente une structure maillée, c'est-à-dire qu'il y a toujours au moins deux chemins possibles

pour acheminer l'énergie d'un point à un autre. Cela permet d'améliorer la sécurité du réseau, anticipant la perte potentielle d'un ouvrage. Des travaux en ce sens ont été menés au LAPLACE dans le cadre de la thèse de C. Baumann [Bau-09] dans laquelle avantages et inconvénients d'un maillage ont été analysés.

Une autre innovation des futurs réseaux concerne l'utilisation d'une tension continue dite « HVDC » (High Voltage DC) comme réseau de puissance, contrairement aux structures actuelles qui réservent la tension continue à l'alimentation des calculateurs en 28V et alimentent les charges de puissance importante sous 230V AC (avec une fréquence comprise entre 360 et 800 Hz). Cette évolution provient de la nature de l'alimentation de la plupart des charges qui, la fréquence du réseau étant variable, nécessite l'association d'un redresseur et d'un onduleur afin de contrôler la charge. Il est alors plus intéressant de réaliser directement la distribution sous forme continue afin de supprimer les étages de redressement. D'autres avantages apparaissent, tel qu'un meilleur contrôle des flux de puissance ainsi que la possibilité d'hybridation plus aisée de plusieurs sources et éléments de stockage : ce dernier point est développé à la partie 3.

Mais de nouvelles contraintes liées à ces nouveaux standards « HVDC » apparaissent, dont certaines sont développées dans la partie qui suit.

## 2. Nouvelles contraintes pour de nouveaux réseaux

Un gestionnaire de réseau est soumis à de nombreuses contraintes. Nous pouvons citer les problèmes de fiabilité, tout comme la notion de stabilité. Sur le réseau de transport classique, ce problème est bien connu et son enjeu réside dans la nécessité d'équilibrer la production avec la consommation à chaque instant, l'énergie électrique étant difficilement stockable.



Mais un autre problème de stabilité spécifique existe pour les éléments connectés sur un réseau DC. Afin d'assurer une bonne qualité des formes d'ondes sur ces réseaux, il est courant de connecter des filtres passifs en entrée des équipements, filtres qui peuvent avoir des tailles importantes car ils sont transparents en continu. La situation est différente sur les réseaux alternatifs, car nous limitons alors la taille des filtres afin de limiter la puissance réactive brassée.

Ces filtres peuvent provoquer l'instabilité du système : nous illustrons ce phénomène à travers l'exemple d'une charge à puissance constante. Puis nous présentons une méthode qui permet de dimensionner un filtre stable en intégrant la qualité.

### 2.1 Charge à puissance constante

Aucun dipôle ne présente naturellement cette caractéristique, mais cette propriété peut être approchée quand une charge est alimentée par un convertisseur statique qui, par l'intermédiaire de ses boucles de régulation, maintient un point de fonctionnement constant. Le tracé de la caractéristique courant-tension est alors celui de la figure 2.1.

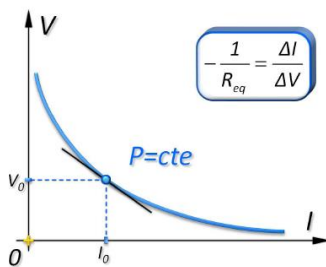


Fig. 2.1. Caractéristique courant-tension d'une charge à puissance constante

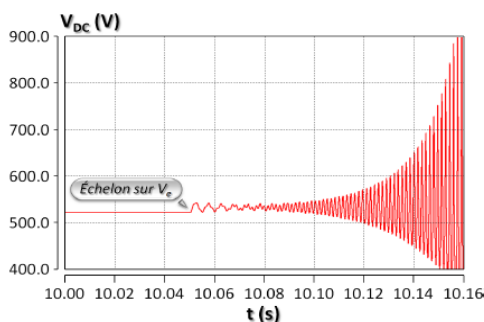


Fig. 2.2. Evolution de la tension aux bornes d'un ensemble filtre-convertisseur instable

Dynamiquement, cette charge se comporte localement comme une résistance négative [Mor-05] et, du fait de la bande passante de la régulation du convertisseur, cette propriété est vérifiée à la fréquence de résonance du filtre. Si l'ensemble charge + convertisseur est associé par exemple à un filtre passe-bas du deuxième ordre (inductance + condensateur), le système peut devenir oscillant. Un exemple (figure 2.2) montre l'évolution de

la tension aux bornes d'un équipement connecté sur un bus de 540V, suite à une perturbation sur le bus en amont du filtre. Nous obtenons une divergence de la tension qui va devenir destructrice. Il faut donc disposer d'un moyen de prévoir et d'éviter ce genre d'incident, dû à un mauvais dimensionnement ; une solution est présentée dans la partie suivante.

### 2.2 Dimensionnement de filtre stable à l'aide du critère de Routh-Hurwitz

Le critère de Routh-Hurwitz est un critère absolu de stabilité basé sur les coefficients de l'équation caractéristique du système, soit le dénominateur de la fonction de transfert, par exemple  $V_{DC}(s)/V_e(s)$  sur le schéma de la figure 2.3. Contrairement à d'autres critères, il a l'avantage d'être nécessaire et suffisant. Son utilisation permet donc de prédire le caractère stable ou non d'un système à partir du moment où sa modélisation est correcte. Un autre avantage est sa capacité à étudier analytiquement des systèmes complexes. En effet, pour l'exemple précédent, le système à étudier est du deuxième ordre, cas qui peut être traité facilement en faisant apparaître le facteur d'amortissement des pôles du système. Mais si nous prenons maintenant l'exemple d'un dispositif réel tel que celui de la figure 2.3, l'ordre du système devient bien plus élevé car il faut ajouter les dynamiques de la machine électrique ainsi que celles des boucles de régulation de l'ensemble convertisseur-machine.

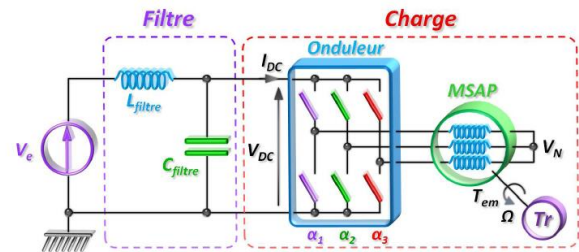


Fig. 2.3. Ensemble filtre - convertisseur - machine

L'ordre du système devenant élevé, il n'est plus possible de le traiter de manière classique. Par contre, le critère de Routh-Hurwitz permet d'analyser analytiquement la stabilité du système quel que soit son ordre. Une méthode a donc été développée afin de générer automatiquement et d'analyser l'équation caractéristique ; s'appuyant sur l'utilisation du logiciel de calcul formel Maple [Gir-10], elle produit l'ensemble des relations analytiques, couplant les paramètres du système, qui doivent être satisfaites pour garantir la stabilité.

Afin de faciliter l'utilisation des résultats, nous avons opté pour une visualisation sous forme d'abaques. Les différents paramètres du système sont fixés, mis à part deux éléments qui sont considérés variables. Par un

balayage sur ces deux éléments, nous déterminons à chaque fois si le système est stable ou non. Un exemple est donné à la figure 2.4, les deux paramètres variables étant les éléments du filtre.

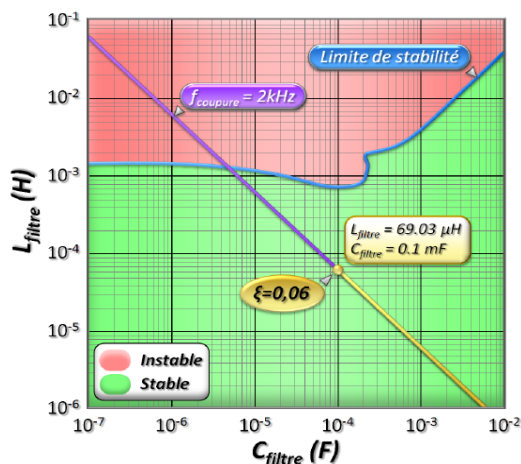


Fig. 2.4. Abaque de stabilité en fonction des paramètres du filtre, avec contraintes de qualité

Il apparaît clairement les zones stable et instable. Nous pouvons conclure que le couple de valeurs choisi ici est dans la zone assurant la stabilité du système. Nous considérons dans la suite l'utilisation des critères de stabilité, non plus pour analyser, mais pour contribuer au choix des paramètres du système (dimensionnement). Les développements suivants concernent l'association de la « performance de filtrage » aux conditions de stabilité.

### 2.3 Intégration de la performance de filtrage dans la méthode

Afin d'assurer la qualité d'un réseau, il est demandé aux équipements qui y sont connectés de respecter différentes contraintes (normes ABD100, MIL-STD-704F,...). La première contrainte est la composition spectrale du courant qui est absorbé sur le réseau. Ce premier élément dimensionnant permet de choisir la fréquence de coupure, inversement proportionnelle à la racine carrée du produit  $L_{\text{filtre}} \cdot C_{\text{filtre}}$ .

Un deuxième critère est la rapidité d'un système stable à revenir à son point de repos. Dans le cas d'un bus 270V continu, un exemple de gabarit à respecter est donné à la figure 2.5. Si nous avons un système du deuxième ordre, nous pourrions lier ce comportement à l'amortissement du système. Dans le cas d'un système plus complexe, nous pouvons nous concentrer sur le pôle dominant du système et lier le gabarit à l'amortissement de ce pôle.

Sur l'abaque de la figure 2.4 ont été ajoutées ces deux contraintes. La droite violette correspond à l'ensemble des couples  $L_{\text{filtre}}-C_{\text{filtre}}$  à iso-fréquence de coupure (échelle logarithmique). Si nous ajoutons la contrainte

d'une valeur minimale pour le coefficient d'amortissement du pôle dominant, nous restreignons les solutions possibles à la demi-droite jaune. Cela permet de mieux cerner le dimensionnement du filtre assurant la stabilité du système et les contraintes de qualité requises par le gestionnaire du réseau.

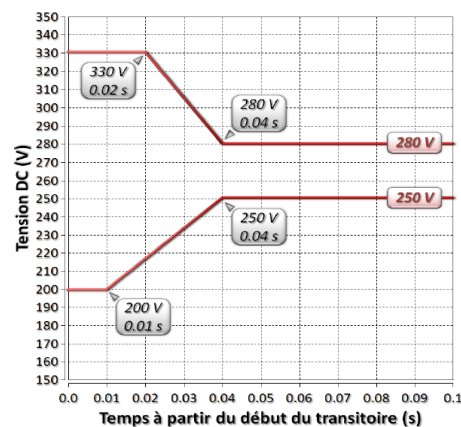


Fig. 2.5. Extrait de la norme MIL-STD-704F pour les transitoires de tension

Pour conclure, lors du dimensionnement d'un filtre, le critère prépondérant est la performance de filtrage représentée par la fréquence de coupure. Mais cela donne seulement une contrainte alors qu'il faut dimensionner deux composants ( $L_{\text{filtre}}$  et  $C_{\text{filtre}}$ ). La méthode présentée permet d'intégrer facilement la condition de stabilité du système ainsi que d'autres critères de qualité lors du dimensionnement.

Par ailleurs, les abaques utilisables ne se limitent pas aux composants du filtre : n'importe quel couple de paramètres peut être utilisé, comme ceux d'une cellule de stabilisation de filtre (structure R-C) ou les paramètres de régulation. Ces éléments peuvent avoir une forte influence sur la stabilité globale du système.

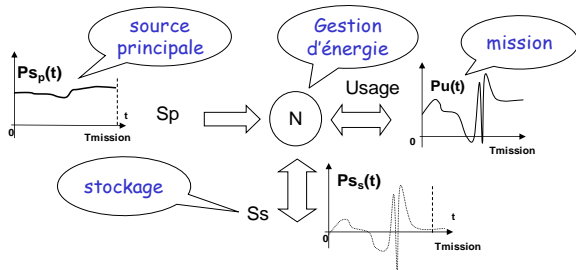
Enfin, cette méthode peut également servir à étudier l'interaction entre différents équipements connectés au même réseau. Tout ceci a fait l'objet du travail de thèse de S. Girinon [Gir-10].

## 3. Nouvelles possibilités liées au management de l'énergie

### 3.1 Vers l'hybridation et le management énergétique

A l'instar des évolutions constatées sur les véhicules terrestres, hybrides ou tout électriques, de nouvelles possibilités en termes de management énergétique apparaissent pour les futurs aéronefs. Ces opportunités passent en particulier par l'hybridation de plusieurs sources entre elles, notamment en associant sources d'énergie et tampon de stockage, ce dernier agissant, selon les phases de vol, plutôt comme un appoint de puissance. Dans les réseaux électriques actuels, une

seule source assure l'alimentation en puissance/énergie d'un ensemble de charges et ce de manière unidirectionnelle en puissance, sans possibilités de régénération vers le réseau. Comme nous l'avons indiqué au premier paragraphe de ce chapitre, la migration des réseaux électriques vers des standards dits « HVDC » (Haute tension continue) est une tendance avérée, qui devrait favoriser l'association multi-sources et en particulier l'hybridation par une ou plusieurs sources de stockage.

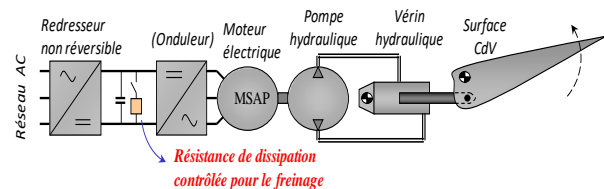


**Fig. 3.1.** Illustration de l'hybridation de sources énergie/puissance

Dans ce schéma, la source principale fournit au moins la puissance moyenne, assurant la couverture énergétique de l'ensemble de la mission. Le stockage est une source de puissance en ce sens qu'il fournit et accepte (recharge) des pointes de puissance imposées par les charges ('usage'). Les avantages de l'hybridation sont multiples, en particulier pour les systèmes à faible puissance de court-circuit tels que les réseaux embarqués :

- Dans le contexte de la 'mission', l'insertion d'un organe de stockage permet de découpler la puissance nécessaire à l'usage de la puissance fournie par la 'source principale' (cf. figure 3.1). Ce découplage permet, comme nous le verrons, d'envisager une réduction du dimensionnement de la source principale, dès lors que la source de stockage fournit une partie des pointes de puissance. De cette réduction découle, selon les applications, des gains potentiels en termes d'encombrement, de masse et de coût système. Une meilleure efficacité énergétique (diminution des pertes globales) est aussi envisageable grâce à l'optimisation de la gestion dans ce réseau hybride ;
- Selon les caractéristiques et la technologie de la source principale, l'appoint en stockage peut limiter les contraintes (intermittence, cyclage, pointes) sur la source principale et augmenter ainsi la durée de vie du système. On peut citer l'exemple d'un APU (Auxiliary Power Unit) alimenté par une pile à combustible [Gar-07] dont il est clair que l'hybridation permet d'atténuer les contraintes par un lissage de la demande de puissance ;
- La figure 3.1 illustre également le fait qu'un tampon de stockage, par nature réversible en puissance, permet

d'autoriser, dans une certaine mesure, la régénération de puissance des charges vers le réseau. Cette fonctionnalité est classiquement exploitée dans les véhicules électriques terrestres, pour la récupération au freinage. Dans un aéronef de nouvelle génération, elle peut s'avérer intéressante pour certaines charges telles que le freinage électrique ou pour les actionneurs de commande de vol à puissance électrique (EHA, EMA). En effet, les actionneurs actuels sont équipés d'un sous système de freinage rhéostatique comme le montre l'exemple de la figure 3.2. Ce freinage dissipatif est pénalisant (échauffement) sur des systèmes très fortement intégrés : la réversibilité de ce type de charge constitue donc un enjeu actuel qui pose la question de l'acceptation de la régénération dans les réseaux et remet en cause les standards actuels ;



**Figure 3.2 :** Structure d'un actionneur EHA (Electro-Hydrostatic Actuator) non réversible pour commande de vol

Enfin, sur certaines classes particulières de systèmes, lorsque la source principale est thermique, le lissage des pointes de puissance permet d'escompter un gain en consommation, donc en pollution. C'est une vertu classiquement visée dans les véhicules hybrides automobiles. Pour l'avion plus électrique, on peut envisager des gains du même type pour certaines phases de vol, en particulier au sol. Plus précisément, l'hybridation d'un APU pourrait permettre d'envisager des gains substantiels dans les phases de roulage : on parle alors de « green operation aircraft » pour illustrer ces orientations.

Les stratégies d'hybridation sont largement diversifiées et dépendent non seulement du problème global (mission à satisfaire, caractéristiques et contraintes de la source principale) mais aussi de la technologie de stockage associée. Une voie intéressante, car générique et applicable à une large gamme d'application, consiste en une approche fréquentielle de gestion qui revient à positionner les sources dans une gamme de fréquence privilégiée, bien adaptée à leurs caractéristiques. Cette approche est adoptée dans plusieurs travaux [Lan-06], [Gar-07], [Akl-08]. Ce positionnement peut être obtenu par filtrage, la source principale jouant le rôle de filtre passe bas ('LPF') tandis que la source de stockage, filtrée passe haut ('HPF'), ne fournit que les pointes de puissance avec une moyenne



nulle permettant le maintien naturel de son état de charge (cf. figure 3.5).

### 3.2 Exemple : hybridation d'un réseau dernier secours électrique

Cet exemple, ayant fait l'objet des travaux de thèse d'O. Langlois [Lan-06], puis d'expérimentation au LAPLACE [Rob-11], est typique de l'intérêt de telles approches. Le sous-réseau concerné correspond aux cas de dernier secours électrique utilisé en cas de perte totale de génération électrique ou de motorisation. Dans un tel cas, la RAT (Ram Air Turbine) alimente les charges 'essentiels' de l'avion qui se limitent à certaines charges 28V (calculateur, éclairage) ainsi qu'aux commandes de vol à puissance électrique (EHA, EMA). Ces dernières présentent un taux d'intermittence élevé ( $P_{moy}/P_{max} \sim 50\%$ , cf. figure 3.3) qui font de ce sous-réseau un « excellent candidat à l'hybridation énergétique ». La première étape en vue d'élaborer la stratégie de gestion et de dimensionner le réseau consiste à définir une mission dimensionnante.

$$\begin{aligned} & \bullet P_{RAT} \sim P_{moy} + \delta P_{ertes} \\ & \bullet P_{stock} \sim P_{mission} - P_{RAT} \Rightarrow \text{bilan énergétique du stockage globalement nul} \end{aligned}$$

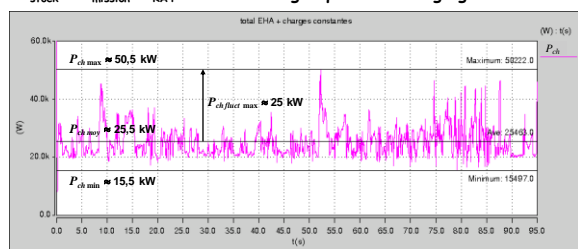


Fig 3.3. Mission dimensionnante en dernier secours

La figure 3.3 correspond ainsi à un cas critique dimensionnant (cas de manœuvre en approche) au cours de laquelle les commandes de vol sont très sollicitées tandis que la vitesse relative vue par la RAT est minimale. Dans cette application, compte tenu du caractère fortement intermittent des consommations de puissance sur de courtes durées, nous avons sélectionné des super condensateurs (modules Maxwell 15V, 58F) dont l'ensemble constitue un pack 250V-3.5F. Ce dimensionnement est obtenu en raisonnant dans le plan énergie/puissance (plan de Ragone) : il s'agit d'inscrire la mission à laquelle doit satisfaire le pack super condensateur dans le polygone correspondant au cycle limite (tension/courant maximaux) de l'organe de stockage.

Il faut noter l'existence du couplage intime entre stratégie de gestion et dimensionnement puisque ce dernier se déduit de la 'mission stockage' confiée ici au pack de super condensateurs. La séquence de conception système est donc orientée selon trois étapes :

- 1) Détermination de l'architecture candidate et de la mission dimensionnante ;
- 2) Définition de la stratégie de gestion : choix d'une fréquence de filtrage ;
- 3) Dimensionnement du pack stockage.

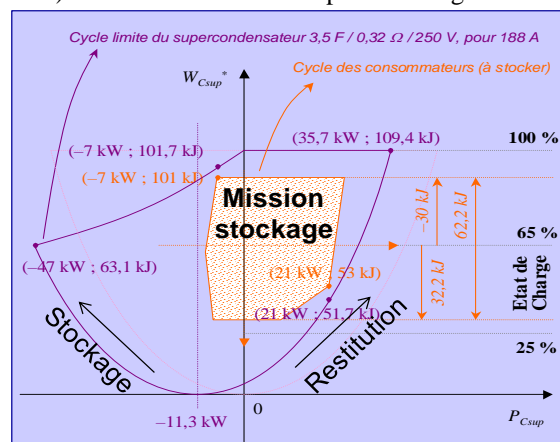


Fig 3.4 : Dimensionnement du pack de stockage

Pour la seconde étape, deux solutions sont possibles selon le caractère (tension / courant) donné aux sources principales et de stockage. La stratégie de gestion classique (cf. figure 3.5.a) consiste à assurer le maintien de la tension du bus HVDC par la RAT. L'excitation de l'alternateur est alors réglée en conséquence. Le système de stockage supercapacitif joue le rôle de source de courant 'passe haut' (HPF), c'est-à-dire qu'il fournit et accepte les harmoniques de puissance au-delà d'une fréquence de quelques mHz (typiquement 10mHz). O. Langlois a montré [Lan-06] qu'une stratégie de gestion dite 'duale' (cf. Figure 3.5.b), consistant à inverser la nature des deux sources permettait d'optimiser le comportement énergétique et dynamique du système. Dans ce cas, le système de stockage couplé au convertisseur d'interfaçage règle la tension de bus HVDC en équilibrant les puissances fournies et consommées. De son côté, la RAT fournit, autant que possible, la puissance nécessaire à l'ensemble des charges ainsi que les pertes dans le sous-système de stockage. Cette dualisation des deux sources libère un degré de liberté sur la turbine qui, à l'instar de l'éolien terrestre classique, peut fonctionner en maximisation de puissance (MPPT) dès lors que la demande des charges est importante ou que l'état de charge du stockage est insuffisant.

La simulation de la figure 3.6 illustre le partage des flux de puissances : nous vérifions que la puissance fournie par la RAT ( $P_{RAT}$ ) est nettement filtrée par rapport au besoin dû aux charges ( $P_{ch}$ ) :

$$\max(P_{RAT})/\max(P_{ch}) \sim 65\%.$$

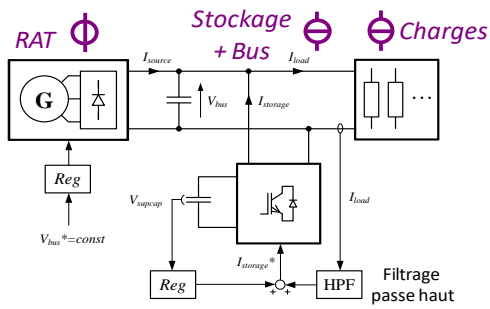


Fig 3.5.a. Stratégie de gestion "Classique"

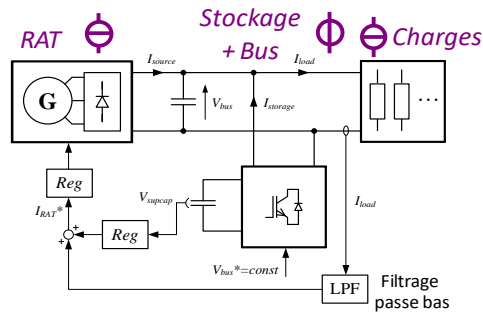


Fig 3.5.b Stratégie de contrôle "Duale"

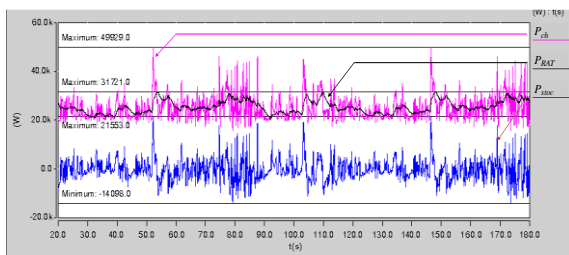


Fig 3.6 Simulation stratégie hybridation classique

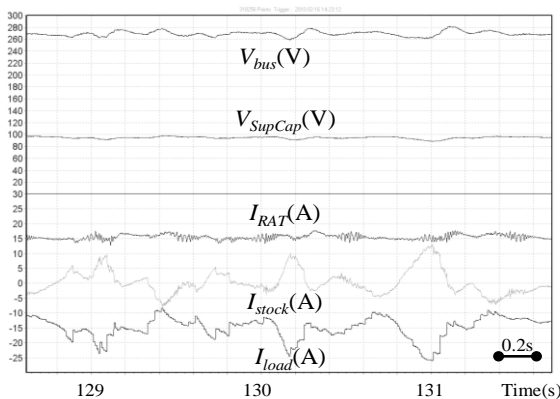
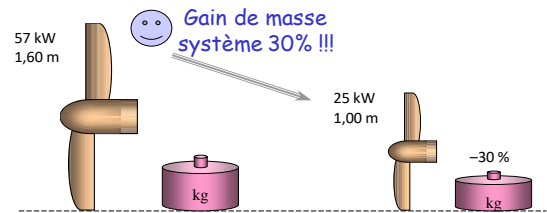


Fig 3.7 Expérimentation stratégie hybridation 'duale'

Enfin, ces différentes stratégies d'hybridation ont été testées expérimentalement sur un banc d'essai du LAPLACE [Rob-11]. La figure 3.7 illustre ainsi la stratégie d'hybridation 'duale' de la figure 3.5b : cet essai montre que la tension du bus HVDC ( $V_{bus}$ ) de même que l'état de charge des super condensateurs ( $V_{SupCap}$ ) restent stables au cours de la mission. De plus, l'intermittence du courant de charge ( $I_{ch}$ ) est quasi exclusivement fournie par le stockage ( $I_{stock}$ ) tandis que le courant de RAT ( $I_{RAT}$ ) reste quasi constant.

Au final, le gain estimé en termes d'encombrement et de masse, obtenu sur cet exemple d'hybridation, est particulièrement substantiel :



#### 4. Conclusion

Ce dossier concernant les principales évolutions vers des nouvelles architectures de réseaux HVDC a permis d'illustrer les avantages potentiels mais aussi les nouvelles contraintes de stabilité qu'elles imposent. Des outils, par exemple basés sur le critère de Routh Hurwitz, permettent d'étudier efficacement cette question de façon à optimiser le dimensionnement des filtres d'entrée des équipements. Par ailleurs, les réseaux HVDC facilitent le couplage de plusieurs sources avec des composants de stockage permettant, par une optimisation du management énergétique, de limiter l'encombrement et d'apporter de nouvelles fonctionnalités telles que la réversibilité de certains consommateurs.

#### Références

- [Mav-07] J. Mavier, 'Convertisseurs génériques à tolérance de panne. Application pour le domaine aéronautique', PhD thesis of Université de Toulouse, INPT/LAPLACE, France, March 2007, <http://ethesis.inp-toulouse.fr>.
- [Bau-09] C. Baumann, 'Architecture et gestion d'un réseau continu maillé haute-tension pour l'aéronautique', PhD thesis of Université de Toulouse, INPT/LAPLACE, France, March 2009, <http://ethesis.inp-toulouse.fr>.
- [Gir-10] S. Girinon, 'Etude de la stabilité et de la qualité des réseaux distribués de puissance', PhD thesis of Université de Toulouse, INPT/LAPLACE, France, March 2010, <http://ethesis.inp-toulouse.fr>.
- [Mor-05] J. Morren, S.W.H. de Haan, J.A. Ferreira, '(de-)stabilising effect of power electronic interfaced dg units in distribution networks', EPE 2005 Dresden, 2005.
- [Lan-06] O. Langlois, 'Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique', PhD thesis of Université de Toulouse, INPT/LAPLACE, France, June 2006, <http://ethesis.inp-toulouse.fr>.
- [Gar-07] M. Garcia Arregui, 'Theoretical study of a power generation unit based on the hybridization of a fuel cell stack and ultracapacitors. Application to the design of an aircraft emergency electrical network. Thèse de l'INP Toulouse, 4 Déc 2007.
- [Akl-08] C.R. Akli, 'Conception systémique d'une locomotive hybride autonome', Thèse de l'INP Toulouse, Juin 2008, <http://ethesis.inp-toulouse.fr/>.
- [Rob-11] X. Roboam, O. Langlois, H. Piquet, B. Morin, C. Turpin, 'Hybrid power generation system for aircraft electrical emergency network', IET Trans on Electrical Systems in Transportation

## Alternateurs – Démarreurs pour Aéronefs

**Mario MARTINEZ**

THALES AES

41, bd de la République 78400 CHATOU

**Résumé :** La conversion mécanique - électrique à bord des aéronefs est en cours d'évolution depuis quelques années :

- Sa puissance augmente considérablement afin d'alimenter de nouveaux consommateurs électriques,
- La nature de la puissance délivrée diffère de celle couramment utilisée dans l'aviation, dont la tension alternative est à la fréquence fixe 400Hz,
- La conversion devient réversible pour assurer le démarrage électrique de la turbine,
- La génération électrique est fréquemment associée à une conversion électronique de puissance.

Cette évolution entre dans le cadre d'une électrification croissante des aéronefs afin de rationaliser les puissances consommées non propulsives et réduire ainsi la consommation de carburant.

L'article est axé principalement sur la clé de voûte de cette nouvelle conversion électromécanique : l'alternateur – démarreur et son convertisseur de puissance associé. On y décrit, après une rapide introduction sur les enjeux de l'électrification des aéronefs, les caractéristiques techniques générales de ce type de système, des exemples de réalisation ainsi que sa nécessaire adaptation aux nouveaux réseaux électriques d'avion.

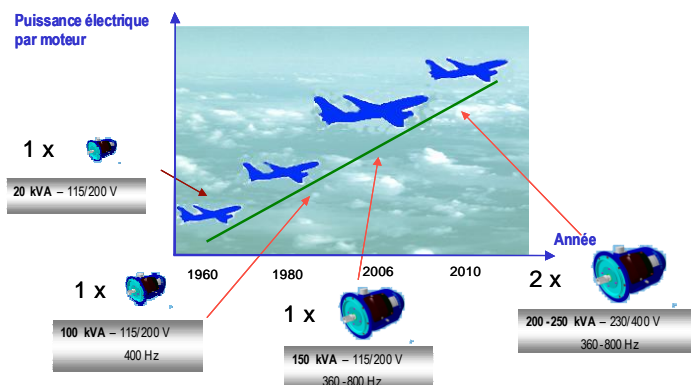
### 1 Généralités sur l'énergie électrique à bord des avions.

Les équipements électriques présentent un bon rendement, sont simples d'utilisation et leur puissance est facilement réglable. En outre les systèmes électriques sont fiables, à maintenance réduite et surveillance aisée. Ils peuvent aussi conduire à une réduction de masse des équipements embarqués si on optimise la gestion des charges. L'énergie électrique apparaît alors comme une solution privilégiée pour remplacer progressivement sur avion les énergies pneumatique, mécanique et hydraulique.

La consommation électrique sur avion va s'accroître de deux manières :

- D'une part par le remplacement de consommateurs non électriques par des consommateurs électriques comme les pompes hydrauliques et à carburant, le conditionnement d'air, le démarrage électrique des moteurs (50 à 200 kW),
- D'autre part par l'apparition de nouveaux consommateurs comme la distraction au passager (100W par siège) et la sécurité.

La figure ci-dessous montre l'évolution de la puissance électrique embarquée, par moteur, sur avion de ligne, lors des cinquante dernières années :



### 2 Générateurs-démarreurs 28 Vcc pour avions régionaux, avions d'affaire et hélicoptères.

Ce sont des machines à collecteur et balais en carbone, montées sur ce type d'avions depuis plusieurs dizaines d'années. Elles délivrent une basse tension et une puissance inférieure à 15 kW. Leur excitation de type shunt – série permet d'obtenir simplement un fort couple de démarrage et un accompagnement en vitesse de la turbine, après son démarrage.





Les caractéristiques d'un tel générateur – démarreur sont par exemple :

- Moteur: Pratt & Whitney Canada 121/127,
- Puissance en générateur: 12 kW,
- Vitesse d'entraînement: 7200 - 12000 tr/min,
- Refroidissement: Auto-ventilation au sol / air dynamique en vol,
- Expérience: plus de 10 millions d'heures de vol sur avions régionaux et plus de 3000 machines sur avions d'affaires.

### 3 Démarrage électrique sur avions de ligne.

Le démarrage des moteurs est pneumatique sur tous les avions de ligne, mis à part celui du B787 qui est électrique. Les générateurs incorporent un dispositif hydraulique qui permet de délivrer des tensions à fréquence constante. Ce dispositif rend complexe la réversibilité de la machine génératrice d'électricité et son fonctionnement en mode moteur. Mais, récemment, afin de réduire le coût de possession des générateurs, les avionneurs n'ont plus imposé des tensions alternatives à fréquence constante 400 Hz (A380, B787, A350). Les générateurs peuvent alors incorporer simplement la fonction démarrage électrique (B787), ce qui induit une réduction de la masse des conduits pneumatiques sur avion.

Différents types de machines électriques peuvent être envisagés pour remplir cette fonction :

- Les alternateurs-démarreurs à aimants permanents, que THALES AES a étudiés pour la génération auxiliaire et pour la génération principale lorsqu'elle est intégrée dans le moteur d'avion (la machine tournante est associée à un convertisseur électronique de puissance qui fonctionne durant les deux modes démarreur et générateur ; en mode générateur, le convertisseur est utilisé pour délivrer au réseau de l'avion une tension continue régulée) ;
- Les alternateurs-démarreurs à excitation bobinée, étudiés pour la génération principale lorsqu'elle est montée sur la boîte d'accessoires (en mode générateur, le convertisseur n'est pas utilisé pour la fonction génération ; l'alternateur délivre directement un système triphasé de tensions alternatives régulées, au réseau de l'avion).

### 4 Alternateurs – démarreurs à aimants permanents.

Les machines à aimants permanents sont couramment utilisées dans les actionneurs électriques, aussi bien dans la robotique depuis plusieurs décennies que dans l'aéronautique où elles sont apparues plus récemment dans les commandes de vol électriques. En mode générateur, leur puissance est restée faible sur

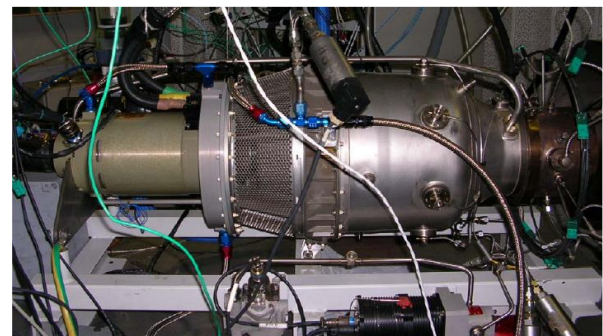
avion (de l'ordre du kW). Néanmoins des études aboutissant à des démonstrateurs essayés sur turbine ont montré que leur puissance peut atteindre facilement la centaine de kW. THALES AES a spécialement étudié ce type de machine pour deux applications: la génération auxiliaire pour avion d'affaire et hélicoptère, la génération principale intégrée à l'intérieur du moteur, pour avion de ligne plus électrique.

#### 4.1 Génération auxiliaire pour avion d'affaire et hélicoptère.

Un nouveau type de générateur – démarreur a été développé pour l'application APU (Auxiliary Power Unit). La machine est entraînée directement par la turbine, sans boîte d'engrenages intermédiaire. Elle est associée à un convertisseur électronique de puissance qui fonctionne en onduleur de tension durant le mode démarreur et délivre deux types de puissance continue en mode générateur : 28 Vcc et 270 Vcc.

Les caractéristiques principales du système sont indiquées ci-après :

- Puissance en mode démarreur : 5 kW,
- Arrêt du démarreur à 28000 tr/min,
- Puissance en mode générateur : 50 kW dans la plage de vitesse 48000 – 56000 tr/min.

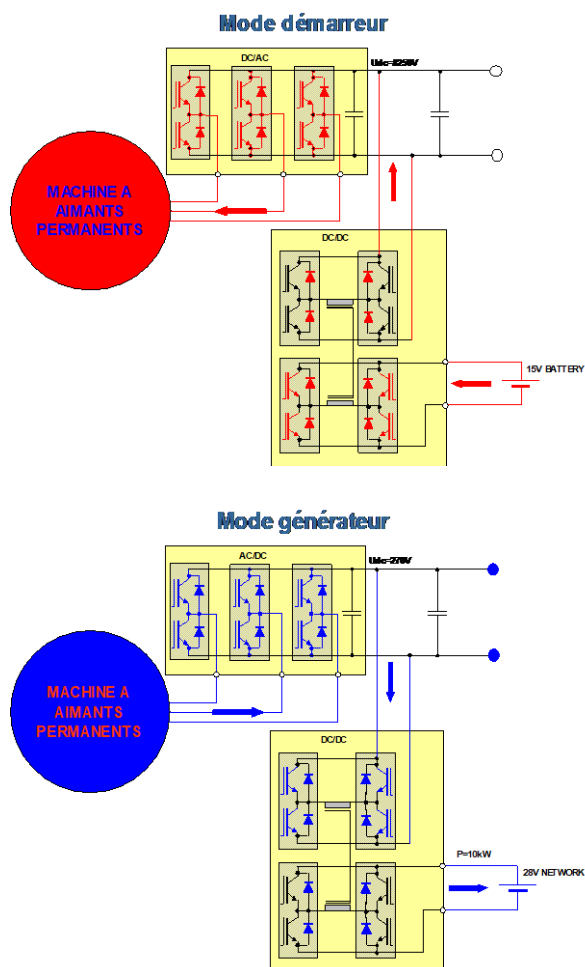


Générateur – démarreur et turbine



Maquette de convertisseur

Les schémas synoptiques dans les deux modes sont représentés ci-après :



#### 4.2 Générateur – démarreur intégré dans un moteur d'avion.

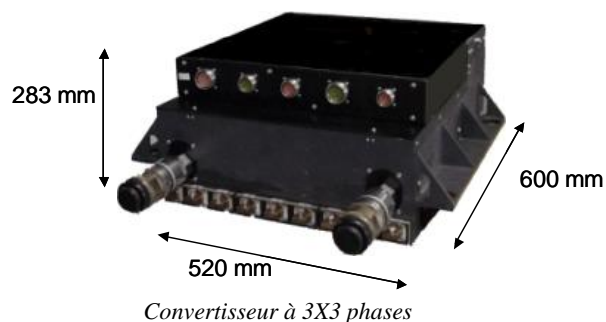
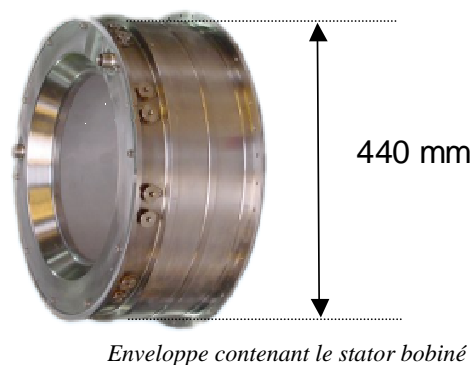
Dans le cadre du contrat européen POA (Power Optimised Aircraft), THALES AES a validé le concept d'un générateur-démarreur et son convertisseur statique associé pour être intégré dans un moteur Rolls-Royce de type TRENT 500. La machine est intégrée sur l'arbre HP (haute pression) tandis que le convertisseur est monté sur la structure de la soufflante.

Les caractéristiques principales du système sont indiquées ci-dessous :

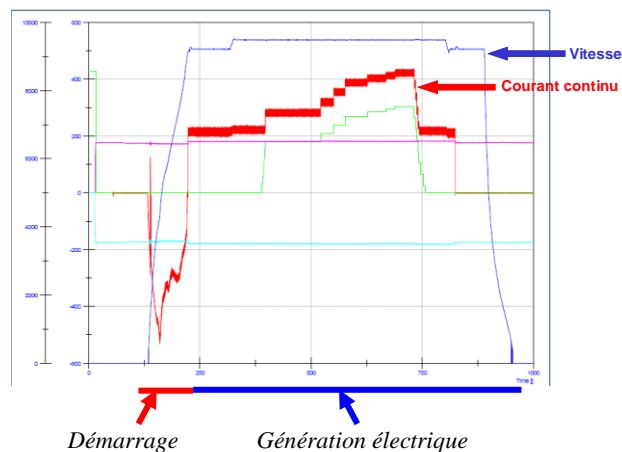
- Puissance en mode démarreur : 175 kW,
- Arrêt du démarreur à 9000 tr/min,
- Puissance en mode générateur : 150 kW sous 350 Vcc, dans la plage de vitesse 9000 – 15000 tr/min.

La machine à aimants a été retenue dans cette application, pour sa capacité à fonctionner en milieu sévère tout en gardant une puissance massique élevée et un volume adapté à une intégration au cœur du moteur. La machine a été conçue pour fonctionner dans un air environnant dont la température peut atteindre 330°C. Le stator bobiné et le rotor sont refroidis par circulation

d'huile. L'aspect sécurité de cette machine, dont l'excitation ne peut être annulée, a été traité en la dimensionnant pour qu'un court-circuit triphasé puisse être maintenu en permanence. De plus, un circuit dédié, composé de commutateurs, est intégré dans le convertisseur électronique de puissance qui lui est associé. Ce circuit peut court-circuiter les phases de la machine en cas de défaut détecté par le contrôleur. La machine et le convertisseur présentent trois canaux de puissance séparés, dont l'indépendance garantit une bonne résistance aux pannes.



Lors des essais d'intégration sur le moteur, le courant continu et la vitesse ont été enregistrés pendant un démarrage suivi d'un fonctionnement en générateur :



## 5 Alternateurs – démarreurs à excitation bobinée.

### 5.1 Généralités.

La machine synchrone à excitation bobinée est la machine retenue pour remplir la fonction de générateur principal sur avion. Elle est entraînée par la boîte relais d'accessoires et sa vitesse d'entraînement peut être soit constante, lorsqu'un dispositif hydraulique est placé entre l'arbre de sortie de la boîte mécanique et l'arbre de l'alternateur, soit variable avec le régime du moteur lorsque l'alternateur est directement entraîné par la boîte mécanique. Les générateurs principaux des avions de ligne les plus récents (A380, A350, B787) sont à vitesse variable dans un rapport voisin de deux ; ils délivrent donc des tensions alternatives à fréquence variable. Ces tensions sont régulées à une valeur fixe, quelles que soient la vitesse ou la charge : 115 Veff phase – neutre ou 230 Veff phase – neutre. Cette dernière valeur a été retenue sur les deux derniers types d'avions de ligne, compte-tenu de l'augmentation de la puissance électrique installée et pour diminuer l'impact de cet accroissement de puissance sur la masse de câblage. Un réseau électrique à fréquence variable implique la présence de convertisseurs statiques de puissance qui servent en particulier à alimenter les moteurs de pompe.

Le schéma synoptique et la coupe longitudinale ci-après montrent les trois étages de l'alternateur (machine principale, excitatrice, machine auxiliaire) :

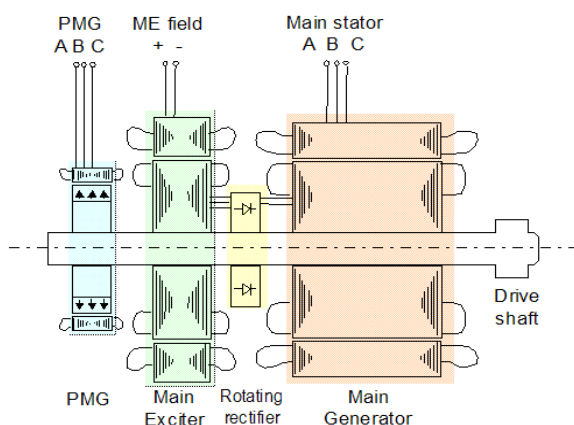
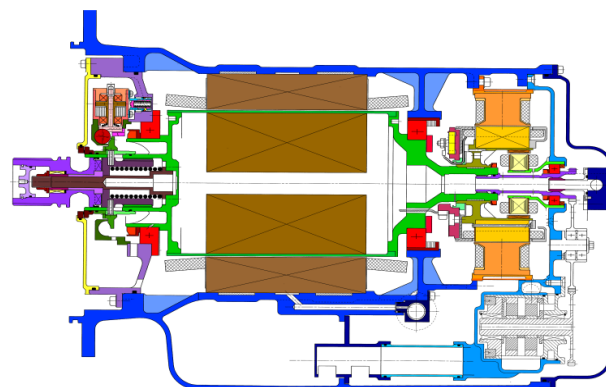
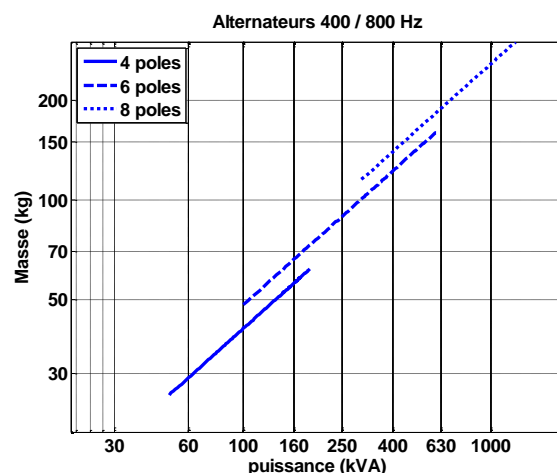


Schéma synoptique



Coupe longitudinale

La courbe ci-dessous indique la variation de la masse des générateurs à excitation bobinée en fonction de la puissance, la polarité et la plage de vitesse, dans le cas d'un réseau à fréquence variable entre 400 et 800 Hz :



- 4 pôles: 12000 / 24000 tr/min
- 6 pôles: 8000 / 16000 tr/min
- 8 pôles: 6000 / 12000 tr/min

En fonctionnement démarreur, la machine est associée à un convertisseur électronique de puissance dont le dimensionnement thermique dépend principalement du courant qui traverse les commutateurs de puissance. Afin d'optimiser la masse et l'encombrement de ce convertisseur, il faut donc minimiser le courant en maximisant le nombre de spires, à tension, couple et vitesse donnés. Comme le même bobinage est utilisé dans les deux modes et que les tensions aux bornes de la machine sont voisines dans les deux modes, cette démarche ne peut être effectuée dans le cas de l'alternateur – démarreur, le nombre de spires du stator étant fixé par les caractéristiques en mode générateur. Les deux diagrammes ci-après montrent les courants et tensions de la machine pour deux valeurs du nombre de spires :



### Cas 1: nombre de spires élevé correspondant à une impédance élevée.

En fonctionnement démarreur, la tension nominale est atteinte dès la vitesse de base pour laquelle couple et puissance sont maximum. La tension est maintenue constante dans la plage de vitesse à puissance constante, par réduction du flux magnétique. Cette configuration ne peut être retenue car elle conduit à un fonctionnement générateur non optimisé d'un point de vue thermique et magnétique.

### Cas 2: nombre de spires faible correspondant à une impédance faible.

Cette configuration correspond à la majorité des applications d'alternateur – démarreur. La tension nominale n'est atteinte qu'à la vitesse maximale du mode démarreur. A la vitesse de base, la tension est inférieure à celle du cas 1 et le courant est supérieur à celui du cas 1.

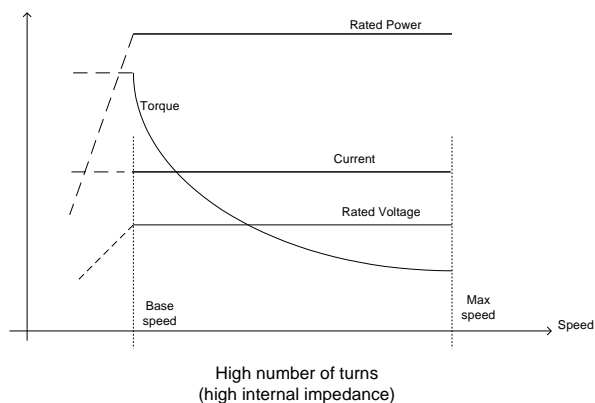


Figure 1 - case 1

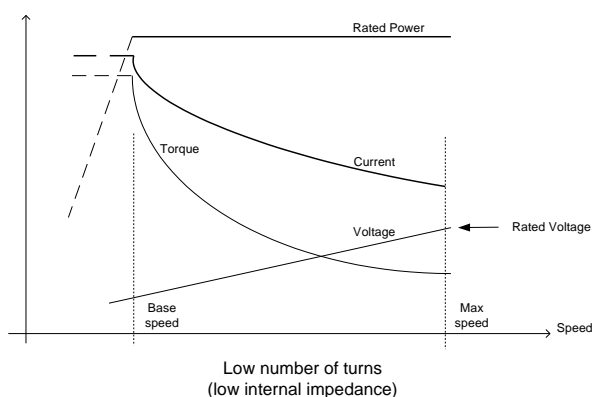


Figure 2 - case 2

## 5.2 Alternateur – démarreur 200 kVA.

THALES AES a réalisé et testé un alternateur – démarreur dont les caractéristiques techniques sont résumées ci-après :

### Machine :

- Puissance en démarreur : 130 kW,
- Couple maximum en démarreur : 300 N.m,
- Puissance en générateur : 200 kVA,
- Plage de vitesse en générateur : 7600 – 16000 tr/min,
- Refroidissement par circulation et brouillard d'huile.

### Convertisseur :

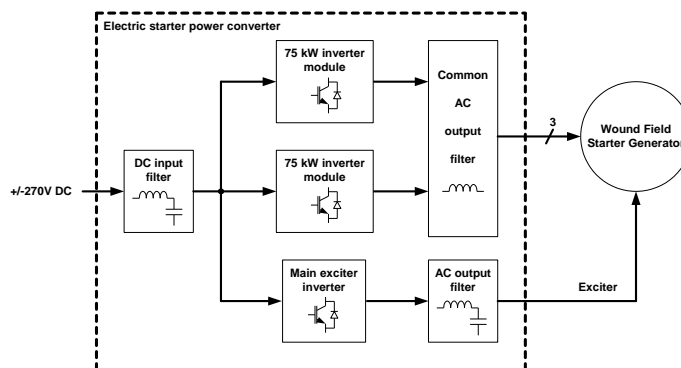
Tension d'alimentation: 540 Vcc,

Puissance de sortie: 150 kW,

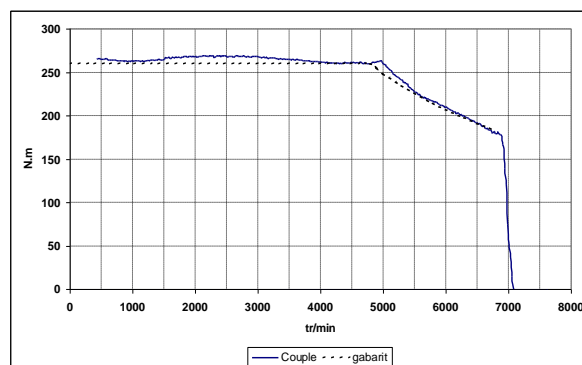
Courant de sortie : 300 Aeff,

Refroidissement par circulation de liquide,

Schéma synoptique :



Courbe couple (vitesse) mesurée comparée au gabarit théorique :



## 6 Intégration des générateurs – démarreurs dans les réseaux électriques du futur.

Compte-tenu de l'importance de la puissance électrique installée qui est envisagée à bord des avions futurs, la masse du générateur – démarreur doit être optimisée. Dans ce but, différents axes de recherche sont suivis par THALES AES :

- Détermination des caractéristiques en collaboration avec le motoriste et l'avionneur (caractéristique couple – vitesse en mode démarreur, plage de vitesse en mode générateur, valeurs des surcharges, etc.),
- Études technologiques de la machine synchrone à rotor bobiné (amélioration du refroidissement en développant le mode par conduction, amélioration du rendement, optimisation de l'excitatrice utilisée dans les deux modes, contrôle sans capteur pour la fonction démarreur),
- Adaptation du système au type de réseau électrique (établissement d'un modèle représentatif du système, permettant d'optimiser l'intégration du générateur dans le réseau électrique de bord, dès la conception ; adaptation du générateur à la conversion de puissance liée aux moteurs et aux transformateurs de tension),
- Conception d'un convertisseur de démarrage multifonction, utilisable par d'autres charges techniques en dehors des temps de démarrage,
- Adaptation du convertisseur aux futures normes de compatibilité électromagnétique.

## 7 Conclusion.

La fonction générateur – démarreur, réalisée depuis plusieurs décennies sur petits avions, commence à apparaître sur avions de ligne. Sur ce type de gros porteurs les puissances mises en jeu tant en mode démarreur qu'en mode générateur sont beaucoup plus importantes que sur les petits avions. De ce fait, la technologie de la machine électrique est complètement différente : de machine à collecteur elle passe à un alternateur dont l'excitation peut être fournie soit par des aimants permanents soit par un bobinage alimenté en courant continu. Sur Avion Plus Electrique, la puissance électrique demandée par les nouveaux consommateurs devient du même ordre que la puissance mécanique que doit fournir la machine en mode démarreur. Dans ce cas, l'ajout de la fonction démarreur n'entraîne donc pas un surdimensionnement de la machine.

En mode démarreur, la machine est alimentée en courants alternatifs par un convertisseur électronique de puissance. Les progrès récents réalisés sur les commutateurs électroniques de puissance permettent d'envisager des systèmes de conversion compacts, adaptés aux applications aéronautiques. Les différentes réalisations d'alternateurs – démarreurs présentées dans cet article ont montré que les technologies utilisées pour remplir la fonction sont au point. Les systèmes ont fonctionné correctement sur turbine et sur les bancs d'essais d'avionneurs.

Des études sont en cours afin de faciliter l'intégration de ce système dans l'avion ; elles visent à optimiser sa masse, son rendement et son adaptation aux nouvelles caractéristiques des réseaux électriques à bord des aéronefs du futur.

## Distribution et protection des réseaux de puissance

**Pierre RAVEL**

Zodiac Aerospace - ECE

129 Boulevard Davout 75020 PARIS

**Résumé :** La distribution et la protection des réseaux de puissance sont des fonctions majeures du système électrique d'un aéronaf. A partir de la définition du réseau par l'avionneur, les organes de distribution et de protections sont spécifiés et définis en collaboration avec un systémier. En aéronautique, un réseau de forte puissance atteint 50 à 250 kW par canal, soit un total de 1 MW ou plus, et aux tensions usuelles 28 VDC et 115 VAC, s'ajoutent une ou deux hautes tensions alternatives (230VAC) ou continues (270 ou 540VDC), ce qui induit des caractéristiques nouvelles. Les cœurs électriques sont des boîtiers au centre du système électrique qui assurent la connexion entre les sources et les charges, le management de la distribution primaire par la commutation des sources ou la reconfiguration des barres de distribution, et la protection des lignes. Ces dernières protègent contre les surcharges en courant, les surtensions, le défaut de courant différentiel, la fuite de courant à la masse, les défauts d'arcs. Les organes de protection disponibles pour ouvrir le circuit électrique en cas de défaut sont le fusible, le disjoncteur (CB), le contacteur avec contrôle et protection électronique (RCCB), le commutateur électronique (SSPC). Une description en est faite dans cet article, chacun ayant ses avantages et inconvénients. L'ensemble des technologies actuellement disponibles ou en développement permet de supporter la faisabilité de réseaux électriques à forte puissance pour aéronafs. Des programmes d'avions récents, comme l'A380, le B787 et l'A350, en ont déjà intégrées quelques unes avec succès.

### 1. Introduction

La distribution et la protection des réseaux de puissance sont des fonctions majeures et essentielles du système électrique d'un aéronaf.

La définition du réseau électrique, avec les sources connectées et les consommateurs à alimenter, est du ressort de l'avionneur. En particulier, l'architecture du réseau en canaux plus ou moins interconnectés entre eux ou au contraire ségrégués, est faite par lui. Se référer à l'article sur le sujet.

A partir de la définition du réseau, les organes de distribution et de protections sont spécifiés et définis en collaboration avec un systémier. ECE, du groupe Zodiac Aerospace, est l'un des acteurs majeurs dans ce domaine.

Cet article présente les principes et fonctions de ces équipements qui permettent au réseau électrique de fonctionner.

### 2. Particularité d'un réseau de forte puissance

Dans le domaine aéronautique embarqué, un réseau de « forte puissance » atteint une puissance de 50 à 250 kW par canal, soit un cumul qui peut atteindre le 1 MW ou plus.

Pour faciliter la mise en œuvre d'un tel réseau, la tension est augmentée. Les réseaux de bord classiques,

en 28 VDC et 115 VAC, sont complétés par un ou deux réseaux à plus hautes tensions alternative (HVAC) ou continue (HVDC). De cette façon, le courant nominal maximal ne dépasse guère les 400 A.

Le réseau à haute tension alternative est en 230VAC, ce qui représente un doublement de tension. Une tension homogène à la tension domestique, mais à fréquence plus élevée (360-800 Hz), et dans un environnement plus contraint (altitude, vibration ?).

Les réseaux à haute tension continue (high DC voltage HVDC) envisagés aujourd'hui sont en 270VDC ou 540VDC, avec les topologies suivantes. Pour une moyenne puissance, du 270 VDC en tension simple, le 0V servant au retour de courant, ou du +/-135V où le 0V est en référence seulement et pour la masse. Pour une forte puissance, du 540VDC, connecté en +/-270VDC, avec le 0V en référence et pour la masse.

Le réseau présentant des valeurs élevées de tension, la mise en isolation augmentée est à prévoir.

Ces réseaux de fortes puissances sont impactés par des charges aux caractéristiques nouvelles.

- Des charges ayant une grande puissance unitaire et dont le ratio puissance de charge sur puissance du canal dépasse les 50%, par exemple le système de conditionnement d'air.

- Des charges non linéaires qui induisent un contenu harmonique élevé.



- Des charges pouvant présenter des facteurs de puissance faible, notamment en cas de défaut.

### 3. Distribution

#### 3.1. Distributions « primaire » et « secondaire »

La distribution est la partie du réseau électrique de l'aéronef qui relie les sources de puissances électriques à tous les consommateurs.

Une part importante est le câblage, mais il n'est pas détaillé ici.

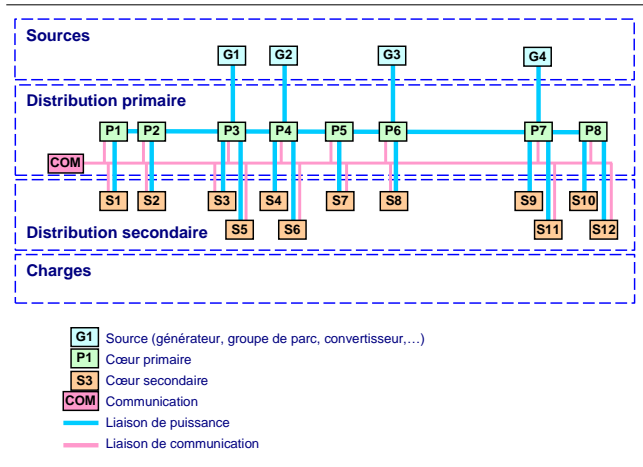
L'autre est l'ensemble des boîtiers électriques qui permettent d'assurer et gérer toutes les connexions électriques. Ces boîtiers sont appelés, boîtiers de distribution, cœurs électriques, « power centers », etc...

Deux niveaux peuvent être distingués dans le système de distribution, la partie primaire et la partie secondaire.

La partie primaire est l'ensemble reliant les sources et les barres de distribution. Une barre de distribution est un point de connexion de référence d'une tension, qui alimente un ensemble de charges.

La partie secondaire est l'ensemble du réseau en aval des barres, vers les charges.

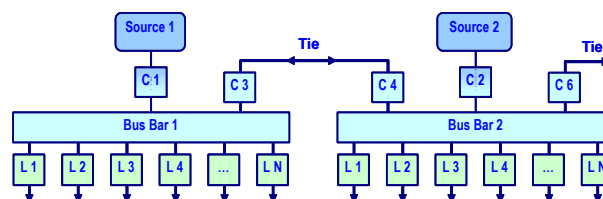
Le schéma ci-dessous illustre cette répartition, dans un cas d'école.



#### 3.2. Fonctions d'un cœur électrique

Un cœur électrique primaire est au centre du réseau électrique. Il gère une ou plusieurs sources et les liaisons avec les autres boîtiers.

#### Exemple de schéma typique :



Les fonctions principales d'un cœur électrique primaire sont les suivantes :

- La connexion entre les sources et les charges principales, qui sont notamment les cœurs secondaires.
- La gestion de la distribution primaire : commutation ON/OFF de la totalité de la puissance électrique d'un canal, reconfiguration de la distribution primaire, gestion de convertisseurs de puissance.
- La protection des lignes principales contre les défauts : surcharge en courant, défaut d'isolation, etc...

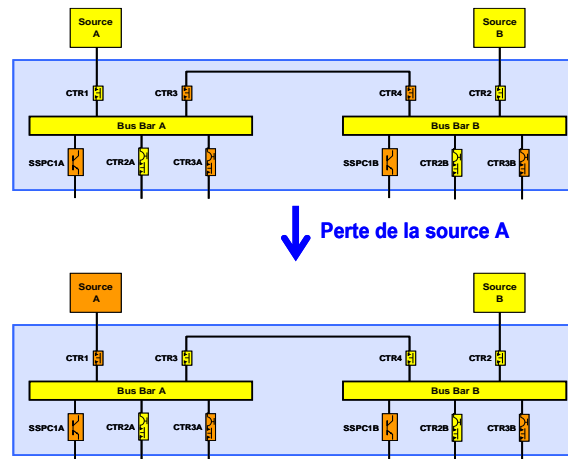
Les fonctions principales d'un cœur électrique secondaire sont :

- La connexion entre une arrivée, une barre, et un ensemble de charges.
- La protection des lignes contre les défauts : surcharge en courant, défaut d'isolation, etc...
- Eventuellement la mise en œuvre d'une fonction de gestion des charges.

### 4. Gestion des reconfigurations

Le cœur électrique gère le réseau électrique par des reconfigurations automatiques de la distribution primaire lors des différents événements qui l'impactent (présence des sources, pannes, etc...), suivant une logique définie d'avance pour assurer la disponibilité maximale de la puissance électrique sur les différentes barres de distribution.

#### Exemple de reconfiguration :



Les reconfigurations doivent se faire de la façon la plus sécurisée possible, en particulier pour ne pas propager un défaut et par-là écrouler le réseau tout entier, c'est-à-dire perdre l'ensemble du système électrique.

Le temps de transition entre deux configurations doit être le plus court possible car il correspond à une perte de puissance électrique en entrée des consommateurs impactés. Il est de l'ordre de 50 ms pour une reconfiguration simple, voire 120 ms pour une reconfiguration complexe.

## 5. Protection des lignes

Les protections des lignes d'un réseau sont décrites avec les paragraphes suivants :

- Les types de protections mis en place.
- Leur intégration dans un réseau complexe.
- Les organes de protections et leurs performances.

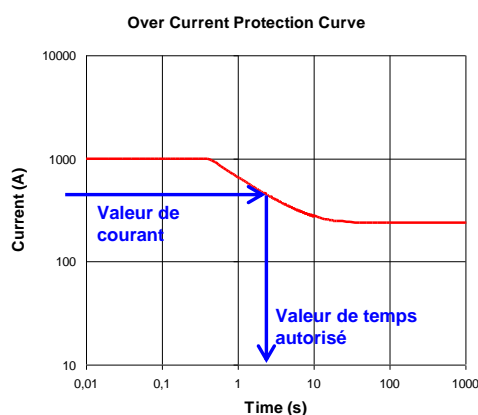
### 5.1. Les types de protection pour un réseau

Les protections mises en place dans un réseau électrique préviennent, limitent ou corrigent :

- Les courts-circuits,
- Les surcharges en courant,
- Les surtensions,
- Les effets de la foudre,
- Le défaut de courant différentiel,
- La fuite de courant à la masse,
- Les défauts d'arcs.
- Protection des personnes

#### 5.1.1. Protection de court-circuit et de surcharge

La protection de court-circuit et de surcharge en courant (OC) protège d'un échauffement dû à un courant excessif. Le court-circuit est le cas extrême où on doit ouvrir le plus rapidement possible ( $i > i_{maxi}$ ), tandis que la protection en surcharge prend en compte une « montée en température », par une intégration des pertes comparée à une référence. Le temps acceptable avant le déclenchement de la protection est déterminé selon le courant par une courbe comme ci-dessous.



#### 5.1.2. Protection de surtension (OV)

En schéma classique, la protection de surtension est assurée par le boîtier de régulation et contrôle du générateur (GCU). Dans un réseau complexe, le GCU peut ne plus avoir le contrôle direct de la tension de barre. Par exemple, en réseau HVDC, une barre de distribution après un redresseur unidirectionnel (diodes), peut avoir une montée de sa tension lors d'un transitoire de charge.

Par la protection de surtension, en cas de détection d'une tension supérieure à un seuil durant un temps donné, la barre est isolée de la source de tension.

#### 5.1.3. Protection contre la foudre (LP)

La protection contre la foudre n'est pas assurée par le système électrique de distribution.

Avec les tensions élevées, la puissance à protéger devient énorme. Aussi la protection est généralement faite au cas par cas. Pour un composant ou un équipement, soit il est surdimensionné pour tenir la tension (ex. 1500 V), soit des dissipateurs d'énergie (transorb) sont placés aux points sensibles pour écrêter la tension.

#### 5.1.4. Défaut de courant différentiel (DP)

Pour la protection contre un défaut de courant différentiel, le courant est mesuré aux deux extrémités d'un câble et une différence supérieure à un seuil pendant un temps donné, déclenche la protection (ex. 30 A / 20 ms). Elle est beaucoup utilisée pour le câblage du circuit de distribution primaire car à cet endroit les protections en surcharge sont calées à un niveau très élevé.

#### 5.1.5. Fuite de courant à la masse (GF)

L'absence de fuite de courant à la masse est vérifiée si le courant retour être égal au courant aller. Cela nécessite un câblage sans retour commun. C'est le différentiel « domestique » habituel. L'écart est comparé à un seuil durant un temps donné.

Cette protection est utilisée pour les charges, notamment celles en zone critique, comme le circuit de carburant qui est soumis à une sensibilité élevée (ex. 2 A / 2 ms), ou comme un circuit proche d'une structure carbone car un contact à la paroi ne crée pas de courant fort mais peut causer des dommages rapidement importants.

#### 5.1.6. Défaut d'arcs (AF)

Les défauts d'arcs sont de « petits » défauts électriques, en valeur de courant, qui ne déclenchent pas les protections citées précédemment, mais qui génèrent des dégâts rapidement divergents à cause d'une présence d'arcs.

Les défauts détectés sont définis par des cas typiques normalisés :

- création d'un contact par couteau entre deux câbles,
- création d'un contact mouillé,
- détérioration d'un contact desserré.

C'est un défaut entre câbles aller et retour, et pas nécessairement en relation avec la masse, avec de faibles niveaux d'altération sur le courant ou la tension. L'algorithme de détection est élaboré et complexe.

### 5.1.7. Protection des personnes

Toutes les protections précédentes participent à la protection des personnes, mais celle-ci n'atteint pas une couverture aussi complète que dans une installation domestique (protection à 30 mA).

Ainsi, la protection en surcharge laissera la personne électrocutée avant de s'actionner, vu son gabarit de courant et de temps.

Les nouvelles protections, contre la fuite de courant à la masse et contre les arcs, commencent à atteindre des valeurs efficaces (en seuil et temps) pour protéger les personnes.

Mais le souci sur avion est d'éviter un déclenchement intempestif qui ferait perdre une disponibilité précieuse d'une partie du réseau. C'est ce critère qui limite le plus la sensibilité possible donnée aux protections.

Dans les réseaux HVDC, des dispositifs complémentaires de protection sont introduits, comme les circuits de décharge des capacités présentes dans le réseau (ex. < 50V en 3 minutes).

Mais, il demeure un risque lié aux fortes puissances en jeu et à la valeur élevée de tension. Aussi les consignes de sécurité deviennent une nécessité pressante, notamment envers les opérateurs de maintenance avion qui ne sont pas tous des électriciens, mais qui peuvent intervenir à proximité d'un équipement électrique.

### 5.2. Intégration des protections dans un réseau

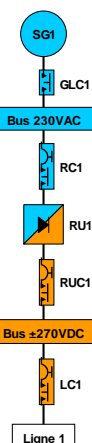
Un des objectifs principaux d'une bonne intégration des protections dans un réseau électrique est qu'un défaut qui se produit ne soit pas propagé directement ou indirectement.

Ceci est assuré par une sélectivité appropriée des protections, mais sa mise en place est d'autant plus délicate dans un réseau complexe. Lors d'un défaut, la protection la plus proche du défaut, et la plus basse en niveau, doit se déclencher. Le but est de sauvegarder le maximum du système électrique.

En corollaire de la sélectivité, la discrimination des protections doit également être effective. La protection qui correspond au défaut doit déclencher, et celle-là

seulement. Ceci permet l'analyse de la panne et l'action à associer la plus pertinente.

#### Exemple de sélectivité :



En présence d'un défaut sur la ligne 1, LC1 déclenche avant RUC1.

De façon plus générale, la hiérarchie de déclenchement est la suivante suivant la position du défaut :

- d'abord LC1,
- puis RUC1,
- puis RC1,
- et en dernier recours GLC1.

### 5.3. Organes de protections et leurs performances

Les protections pour un réseau électrique sont passives ou actives.

En protection passive, le circuit est gardé ouvert :

- Par une isolation : câblage avec fils isolés, gainage, ...
- Par un accès impossible ou limité : capots, boîtiers fermés, portes, distances de sécurité, ...

En protection active, l'organe ouvre le circuit électrique qui alimente le défaut par :

- Ouverture électro-thermique
- Ouverture électro-thermo-mécanique
- Ouverture électro-mécanique commandée
- Ouverture électronique (« statique »)

Les différentes technologies d'organes actifs sont présentées ci-après.

#### 5.3.1. Particularité de la coupure d'une ligne dans un réseau de forte puissance

En haute tension alternative, la coupure d'un circuit est aidée par le passage à zéro du courant alors que la tension est faible. Si le facteur de puissance est très faible ou la forme d'onde très dégradée, la condition précédente n'est plus vérifiée pour permettre l'extinction naturelle de l'arc.

En haute tension continue, la polarisation est unidirectionnelle, la tension ne passe pas par 0 V. La coupure du courant doit se faire avec une valeur élevée de tension aux bornes. De plus, la présence de condensateurs en parallèle sur la barre de distribution amène une faible impédance de limitation de courant et une forte énergie en réserve qui peut se libérer instantanément.

L'organe de coupure dans ces cas doit être dimensionné en conséquence et éventuellement un dispositif spécifique doit être ajouté. Ces performances



nécessaires impactent la masse et le volume du composant.

De façon générale également, la qualité de l'ouverture est sensible à l'impédance de la ligne (ex. constante de temps du circuit électrique inférieure à 3 ms). Cette donnée est importante dans la définition du système.

### 5.3.2. Protection par ouverture électro-thermique : Fusible

Le fusible est un point faible volontaire du circuit qui protège en surcharge de courant, en s'ouvrant par effet électro-thermique.

Il est peu utilisé en protection première du réseau, mais surtout mis en protection sécuritaire, de dernier secours (« fail-safe »).

On retrouve des modèles utilisés en électronique de puissance car ils ont les bonnes gammes de tensions et courants. Un avantage est qu'il existe des modèles très rapides.

Les inconvénients sont que les modèles très performants sont parfois gros et lourds (relativement à un équipement aéronautique), que les caractéristiques évoluent au cours du vieillissement, et qu'enfin en cas de fusion, la remise en état demande un accès physique à l'équipement pour changer le fusible.

### 5.3.3. Protection par ouverture électro-thermo-mécanique : Disjoncteur (CB)

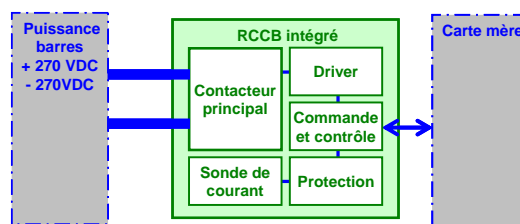
Un disjoncteur protège en surcharge de courant.

Pour des raisons historique d'antériorité, s'il y a une bonne disponibilité de modèles et normes de disjoncteurs en tensions 28 VDC et 115 VAC, en hautes tensions 230 VAC ou 540 VDC, il n'y en a peu ou pas qui soient actuellement développés en modèle « avion ».

Toutefois, il y a peu d'intérêt dans les nouveaux réseaux car les grosses charges sont protégées par des composants élaborés (cf RCCB ou SSPC décrits ci-après). Et de plus, les hautes tensions HVAC ou HVDC n'ont qu'une distribution restreinte en nombre d'utilisateurs à la différence des tensions 28 VDC ou 115 VAC.

### 5.3.4. Protection par ouverture électro-mécanique commandée (RCCB)

La protection par ouverture électro-mécanique commandée est un contacteur associé à un circuit électronique de commande comme ci-dessous.



En haute tension, le contacteur a un système améliorant l'extinction de l'arc intégré dans la chambre de coupure. Les calibres vont de 30 à 450 A.

En deçà de 30 A, l'adaptation au calibre se fait si besoin par l'électronique, mais la partie électromécanique est inchangée car il n'y aurait pas de gain en masse significatif dessus.

L'électronique de contrôle assure les fonctions :

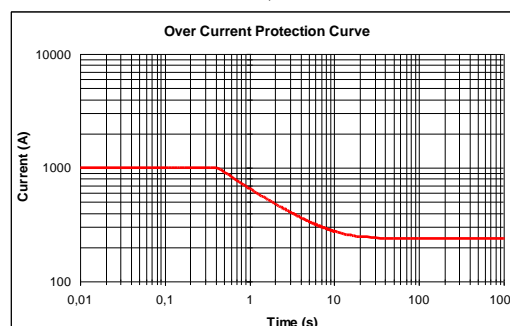
- Commande du contacteur par la bobine.
- Mesure du courant.
- Mesure de tension.
- Protections en courant ou tension.
- Reconnaissance de position dans le réseau.
- Configuration.
- Communication.
- Test intégré.

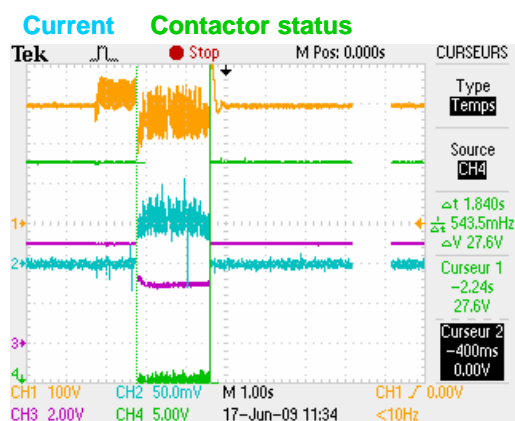
Les avantages du contacteur associé à l'électronique de contrôle sont que les protections possibles sont toutes celles listées (OC, OV, DP, GF, AF), le choix de leurs activations est entré par la configuration initiale et l'ajustement des seuils est fait par paramètres configurables.

Pour la protection en surcharge, le courant instantané intégré est comparé à une ligne de référence. Cette fonction est faite par logiciel ou en circuit analogique. Le contrôle comprend un effet « mémoire thermique » pour prendre en compte les surcharges répétitives.

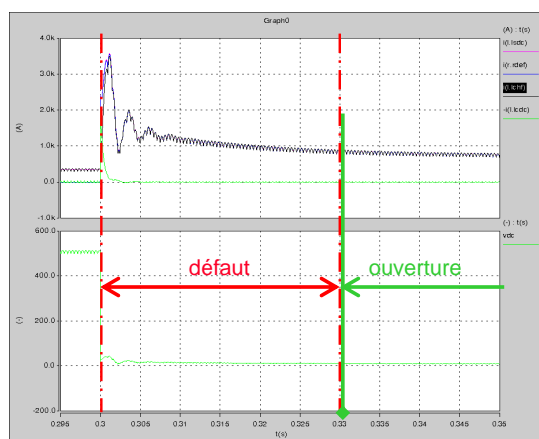
#### Exemple :

Ligne avec un nominal à 200 A, testée à 500 A : déclenchement au bout de 1,84 s





Lors d'une mise en court-circuit, le courant peut atteindre une valeur extrême, surtout en HVDC où le pic initial peut atteindre plusieurs kA en quelques dizaines de  $\mu$ s. Dans ce cas, le contacteur reste fermé le temps de l'impulsion.



En réaction à un court-circuit brusque, le RCCB est « transparent » sur les premiers pics de courant, car l'ouverture du contacteur se fait en un temps de l'ordre de 30 ms, donc sur le courant presque établi. Mais il y a un impact pour la qualité de la tension réseau car la sous-tension du court-circuit est maintenue sur la barre durant ce temps, et donc les charges en parallèle voient un trou de tension.

#### 5.3.5. Protection par ouverture électronique

##### « statique » SSPC

Le SSPC est un commutateur électronique de puissance associé à un circuit de commande.

Il s'adresse à des charges de puissance moindre que les RCCB, les calibres typiques vont de 1 à 20 A. En petits calibres, la masse est plus faible qu'un RCCB.

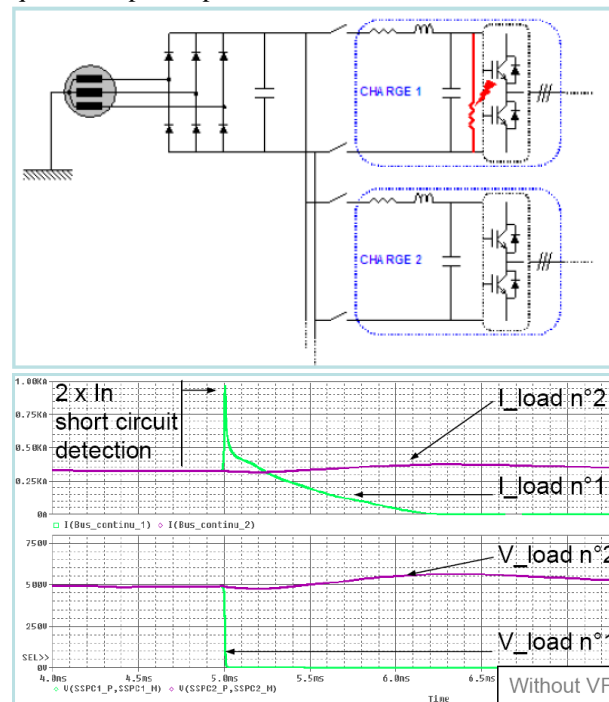
On retrouve les mêmes fonctions qu'un RCCB.

Les protections actives peuvent être suivant la configuration toutes celles listées précédemment (OC, GF, AF, toutefois OV et DP sont peu implémentées).

Le grand avantage est la plus grande rapidité de coupure qu'un RCCB. Toutefois, le grand inconvénient

de la commutation électronique est qu'elle n'assure pas l'isolation galvanique.

Lors d'un court-circuit brusque, une détection directe du défaut permet un déclenchement de l'ouverture très rapide. L'ouverture se fait lors de la montée du courant de court-circuit, avant le pic, et le courant de défaut n'a pas le temps de s'établir. Les charges saines en parallèle sur le bus ne voient quasiment pas de perturbations



## 6. Conclusion

Les réseaux de fortes puissances sont aujourd'hui possibles grâce aux évolutions des équipements et composants de la distribution électrique et aux nouveaux organes qui ont fait leurs apparitions ces dernières années.

Certains sont déjà intégrés dans des systèmes électriques d'avions déjà exploités en compagnie, comme l'A380, proche de l'être, comme le B787, ou en cours de développement, comme l'A350.

D'autres sont en développement, déjà bien avancé, en particulier tout ce qui est relatif aux réseaux à haute tension continue.

Cet ensemble de technologies présentes et disponibles permet de supporter la faisabilité de réseaux électriques à forte puissance pour aéronefs.

## Management des charges importantes : fonction dégivrage et ECS

Nathalie DUQUESNE

Vincent GOMEZ

LIEBHERR-AEROSPACE TOULOUSE

408 avenue de Etats-Unis

31016 TOULOUSE CEDEX

**Résumé :** Dans l'avion, le système de conditionnement d'air (ECS : Environmental Control System) et le système de protection au givre des voilures (WIPS : Wing Ice Protection System) sont de gros consommateurs d'énergie. Celle-ci est prélevée, dans un avion traditionnel, sous forme pneumatique (air chaud sous pression) au niveau des étages de compression du réacteur. Cet article présente des solutions pour économiser cette énergie, ainsi que des travaux sur la gestion de l'énergie électrique et thermique, dans l'avion plus électrique.

### 1. La suppression du prélèvement d'air moteur : un enjeu environnemental et économique

Avec le 787, Boeing a bousculé le monde de l'aéronautique en accélérant le mouvement vers un avion plus électrique. Aussi, même si demain les avions ne seront pas forcément « tout électrique », le « plus électrique » semble aujourd'hui inéluctable.

Seule une rupture technologique de premier plan comme l'électrique semble pouvoir permettre d'atteindre les objectifs environnementaux drastiques définis par l'ACARE au niveau européen ou le CORAC au niveau national avec une réduction de 50 % des émissions de CO<sub>2</sub>, de 80 % des émissions d'oxyde d'azote (NO<sub>x</sub>) et une réduction de moitié du bruit perçu.

Directement liées à la consommation en carburant, ces réductions passent essentiellement par l'optimisation du moteur lui-même. Cependant, une part non négligeable de la consommation peut aussi être réduite en optimisant la chaîne énergétique des charges principales de l'avion : le système de conditionnement d'air (ECS : Environmental Control System) et le système de protection au givre des voilures (WIPS : Wing Ice Protection System).

Sur un avion conventionnel, l'énergie nécessaire à ces charges est prélevée sous forme pneumatique (air pressurisé à haute température) au niveau des étages de compression du moteur. La chaîne de conversion de puissance entre le moteur et les systèmes d'air n'étant pas optimisée, une partie importante de l'énergie est dissipée sous forme de pertes.

Au niveau du prélèvement moteur par exemple, un étage de pré-refroidissement est nécessaire pour réduire la température de l'air prélevé sur les moteurs à des niveaux acceptables pour l'avion et ses systèmes (de 500°C jusqu'à 230°C environ en régime nominal). Il en est de même pour la pression qui est écrêtée au juste besoin de l'ECS alors que dans certaines phases de vol, le moteur fournit beaucoup plus de puissance que nécessaire. Ce surplus de puissance est rejeté à l'extérieur de l'avion sans avoir aucune valeur ajoutée sur le fonctionnement des systèmes.

La solution envisagée aujourd'hui consiste à remplacer la puissance d'origine pneumatique par de la puissance électrique, prélevée sur le moteur au travers de génératrices électriques. L'avantage de cette nouvelle source est que l'énergie utilisée correspondra au « juste besoin » des systèmes.

Cette mutation profonde, longtemps espérée – les premières études de l'« avion électrique » remontent aux années 60 – est aujourd'hui possible grâce aux avancées technologiques en électricité et électronique de puissance sur la dernière décennie. Les densités de puissance semblent à présent compatibles avec les attendus de masse de l'aéronautique et permettent d'envisager une approche totalement différente dans la définition et le pilotage des systèmes majeurs de l'avion.

Si l'impact environnemental est l'objectif affiché, la gestion de la réalité économique mondiale par les avionneurs majeurs et les décisions stratégiques associées pèseront lourdement dans les délais de la mise en service de ces nouvelles technologies.



L'enjeu est en effet de taille sur un marché qui devrait voir une croissance du trafic de l'ordre de 5% par an jusqu'à 2020 avec une vive concurrence entre Airbus et Boeing, modifiée par de nouveaux entrants sur le marché des avions commerciaux : Canadiens, Chinois, Russes, ...

Le coût d'exploitation de l'avion lié à la consommation en carburant et au prix, très fluctuant, du kérosène devient un des paramètres majeurs pour la définition d'un avion et de ses systèmes. Au-delà, pour l'utilisateur final, le critère de choix sera dicté par le coût de possession de l'avion, comprenant ses coûts directs d'exploitation mais aussi tous les coûts indirects liés à la fiabilité, à la disponibilité et à la maintenance de l'avion.

Le défi pour les systémiers sera de développer les systèmes pour un futur avion plus électrique en offrant une solution économiquement viable (les avionneurs et compagnies ne sont pas toujours prêts à payer des surcoûts pour une innovation ...), en garantissant un gain notable de consommation de carburant et en maintenant des niveaux de fiabilité et de disponibilité au moins équivalents à ceux des systèmes actuels basés sur des technologies éprouvées de longue date.

C'est donc cette véritable rupture technologique que Liebherr Aerospace Toulouse, premier fournisseur européen de systèmes d'air aéronautiques, prépare avec le support de ses équipes de R&D. L'enjeu est de taille pour Liebherr Aerospace car le système de « prélèvement d'air sur les moteurs » représente une part significative du chiffre d'affaires de la société ! Liebherr Aerospace doit donc offrir demain une alternative aux systèmes actuels en proposant des systèmes d'air électriques capables d'effectuer les mêmes fonctions de conditionnement d'air et de protection des voilures contre le givre.

## 2. Les impacts technologiques sur les systèmes de conditionnement d'air et de protection au givre

Comme il a été présenté au chapitre précédent, les impacts sont liés au passage de l'énergie pneumatique à l'énergie électrique comme source de puissance des systèmes.

Pour le conditionnement d'air électrique, l'air permettant la pressurisation et le conditionnement de la cabine doit être maintenant prélevé à l'extérieur de l'avion. Sur le Boeing 787, premier avion sans prélèvement d'air moteur à voir le jour, un concurrent majeur de Liebherr a proposé un remplacement de la fonction « prélèvement d'air » par des compresseurs motorisés qui alimentent un pack de conditionnement d'air conventionnel.

De son côté, partant du constat que l'avion électrique ne pourra être rentable, en termes de masse et de coût, qu'en envisageant une mutualisation des fonctions et des systèmes et non pas en « électrifiant » chaque fonction, Liebherr s'est attaché à trouver une architecture de conditionnement d'air plus optimisée.

Ainsi dans les projets européens POA (Power Optimized Aircraft de 2002 à 2006) puis MOET (More Electrical Technologies de 2005 à 2009), Liebherr a réalisé une étude comparative sur de nombreuses architectures permettant de sélectionner au final une architecture de conditionnement d'air électrique de deuxième génération réalisant à la fois la pressurisation et le conditionnement d'air de l'avion avec des turbomachines motorisées et un cycle vapeur.

Les principaux avantages de cette solution sont :

- Une masse réduite du système considéré dans son ensemble et une fiabilité augmentée du fait de la réduction du nombre de composants,
- Une consommation optimisée grâce à un dimensionnement adapté et une utilisation optimale du cycle vapeur,
- Une disponibilité accrue grâce à la redondance des fonctions sans ajout de composants supplémentaires.

Dans le cadre de MOET, Liebherr a mis l'accent sur la démonstration et la validation de cette architecture innovante pour une application de type avion monocouloir (exemple : A320-B737). Le pack de conditionnement d'air électrique Liebherr est aujourd'hui une réalisation concrète, dont le fonctionnement au sol a débuté en juillet 2009 et qui devrait être testé en vol dans le cadre du JTI-Clean Sky à horizon 2013/2014.

L'optimisation de ces architectures s'axe maintenant sur l'élargissement du périmètre considéré en intégrant les nouvelles charges thermiques générées par l'électrification de l'avion (cf. chapitre 3). Ce travail se poursuit au travers du projet européen JTI Clean Sky initié en 2008 et du projet GETI (gestion optimisée de la puissance électrique et thermique), lancé en 2009, en collaboration avec THALES et bénéficiant de soutiens nationaux via la SDC (ex-DPAC) et le FUI.

La viabilité de ces architectures cependant est indissociable de la disponibilité et de la maturité des technologies électriques nécessaires à cette rupture. Le savoir faire acquis dans l'automobile et le ferroviaire a permis une avancée rapide de Liebherr lorsque la mutation électrique en aéronautique a été amorcée.

Liebherr s'est ainsi attaché à compléter ses efforts sur les technologies au travers des programmes R&T aéronautiques majeurs.

Pour la partie conditionnement d'air, des turbomachines motorisées ont ainsi été développées pour couvrir toutes les gammes d'application des avions d'affaires (turbomachine 35 kW développée dans le projet MOET) jusqu'aux applications « long range » (turbomachine 120 kW développée dans le projet national GTR -Groupe Turbo Réfrigéré- soutenu par la DPAC et réalisé en collaboration avec THALES AES) en passant par la famille avions monocouloirs (turbomachines 70 kW développées dans le projet MOET).

Dans tous ces développements, les enjeux techniques sont similaires :

- Intégrer un moteur de forte puissance dans la turbomachine en assurant la maîtrise thermique de l'ensemble moteur/pivoterie,
- Augmenter les vitesses de rotation (pour atteindre des niveaux de vitesse de l'ordre de 50 000 à 80 000 tr/min) afin d'augmenter la compacité et réduire la masse des machines en garantissant la maîtrise de la dynamique du rotor,
- Développer des étages compresseur à fort taux de compression (jusqu'à 6) et à haute température (jusqu'à 260°C) permettant de fournir le niveau de pression requis en sortie du système, ces taux de compression étant nécessaires puisque l'air est prélevé à l'extérieur et non plus sur le moteur
- Développer des étages turbine avec section d'injection variable permettant d'assurer un contrôle optimisé du système.

Liebherr développe aussi les convertisseurs de puissance qui sont la brique technologique essentielle pour le pilotage des charges électriques majeures, comme les turbomachines motorisées.

Développé dans le projet MOET, un convertisseur de 70 kW destiné aux applications monocouloir a permis d'atteindre des densités de puissance de l'ordre de 5 kW/kg, objectif majeur pour une application aéronautique.

Ce convertisseur de puissance est aujourd'hui en phase d'optimisation :

- Dans le cadre du projet GETI, pour intégrer une capacité multi-fonction comme par exemple la fonction de pilotage du démarreur des moteurs principaux de l'avion,
- Dans le cadre du projet Clean Sky, pour le rendre avionnable et permettre sa validation en vol avec le pack de conditionnement d'air électrique.

De plus, Liebherr développe actuellement sur fond propre une électronique de puissance équivalente, destinée à la gamme des avions d'affaires, qui devrait atteindre des densités de puissance équivalentes tout en étant compatible avec un réseau haute tension alternative et une intégration en zone non pressurisée.

Enfin, dans PREMEP projet Régional labellisé Aerospace Valley et soutenu par le FUI (Fond Unique Interministériel), Liebherr optimise l'ensemble de la chaîne électrique moteur/convertisseur (minimisation des pertes électriques, optimisation des filtres, ...) et finalise un banc d'essais représentatif du comportement électrique du système de conditionnement d'air. Ce banc sera intégré sur différents bancs électriques, comme le banc AIRBUS « PROVEN » ou le Copper Bird dans le cadre du projet JTI Clean Sky, et permettra d'analyser l'impact électrique de ces systèmes sur les futurs réseaux haut voltage à courant continu.

Pour la partie cycle vapeur, Liebherr a développé dans le cadre du projet MOET un compresseur motorisé centrifuge. Basé sur les technologies éprouvées sur les turbomachines air, ce compresseur voit ses vitesses de rotation augmentées de 10 000 à plus de 70 000 tr/min permettant de diviser la masse par 2 pour des applications de puissance similaire.

Cette augmentation est rendue possible par l'utilisation de la technologie des paliers à feuilles qui permet aussi d'accroître la fiabilité du compresseur par rapport à une solution volumétrique conventionnelle (compresseur spirale, à vis, ...).

Aujourd'hui, Liebherr poursuit les travaux dans ces domaines au travers des projets JTI Clean Sky et ISS (Innovative Solutions for Systems) soutenu par la SDC. Les objectifs principaux sont axés sur

- l'intégration de ces technologies de compresseurs centrifuges dans les systèmes cycle vapeur avec les contraintes et les contrôles spécifiques associés,
- l'adaptation de ces technologies aux nouveaux fluides réfrigérants verts arrivant sur le marché,
- la montée en maturité technologique de ces solutions.

Le second système majeur impacté par le passage à l'électrique est le système de protection au givre des voilures (WIPS). La suppression de la source d'air chaud directement utilisée pour anti-givrer les bords d'attaque des ailes doit être compensée par l'emport d'un nouveau système assurant la protection de la voilure contre la formation de givre.

Le système conventionnel était un système très robuste et très léger puisque composé seulement de tuyauterie et de quelques vannes. Il offrait cependant peu de possibilité de régulation (contrôle d'une température de peau) et se révélait, à ce titre, très gourmand d'un point de vue énergétique.

En remplacement, plusieurs solutions techniques peuvent être envisagées. Les deux principales sont :

- une protection électro-thermique (solution déployée aujourd'hui sur le Boeing 787) où la protection est assurée par un élément chauffant (tapis composé de résistances électriques) intégrés dans le bord d'attaque de l'aile,
- des solutions électro-mécaniques pour lesquelles une excitation mécanique, générée par des bobines magnétiques (excitation vibratoire) ou des membranes déformables (déformation), permet de décoller la glace accrochée sur la voilure.

Des solutions hybrides, mixant ces 2 solutions, peuvent également être envisagées.

Le principal avantage de ces solutions est le gain de consommation de carburant en comparaison des solutions pneumatiques conventionnelles. Leur inconvénient est le nombre accru de composants entraînant un impact sur la masse non négligeable et une dégradation de la fiabilité du système.

Comme pour les systèmes de conditionnement d'air, l'impact et les enjeux de ce passage se situent aussi bien au niveau des architectures que des technologies permettant de les mettre en œuvre.

D'un point de vue architecture et opération sur l'avion, un des principaux défis consiste à définir les modes de fonctionnement du système dans différentes configurations. En effet, les systèmes pneumatiques étaient majoritairement des systèmes d'anti-givrage où la formation de glace était évitée en maintenant la température de la peau de l'avion au-dessus de la température d'accrétion de la glace. Les systèmes électriques eux offrent ou nécessitent (solutions électro-mécaniques) une protection par dé-givrage où on laisse une couche de glace se former sur le bord d'attaque avant de la décrocher lorsqu'elle a atteint une taille définie.

Cette deuxième approche présente un intérêt majeur car elle permet de réduire les consommations électriques d'un rapport 2 à 3 par rapport aux solutions d'anti-givrage. Elle demande cependant une maîtrise parfaite des phénomènes de givrage de la voilure et des impacts associés sur les qualités de vol de l'avion qui se verront

dégradées par la présence de cette couche de glace sur l'aile.

Le second objectif dans la définition des architectures des systèmes de protection au givre électrique consiste à trouver un optimum entre fiabilité et disponibilité. Ces systèmes étant critiques pour la survie de l'avion, ils nécessitent un minimum de redondance et ségrégation. L'idée est donc de découper l'aile en différentes zones indépendantes qui pourront continuer d'être protégées en cas de perte de parties du système. L'enjeu est ici de définir un découpage optimal pour les zones à protéger :

- les performances et donc la consommation de carburant seront fonction des séquences et cycles de dégivrage appliqués sur les différentes zones. Ce séquençage sera déterminé par les conditions givrantes et les requis aérodynamiques de la voilure (épaisseur de glace acceptable).
- L'augmentation du nombre de zones (et donc de composants associés) permet d'offrir une meilleure disponibilité du système mais engendre une fiabilité moindre des composants unitaires. Un optimum doit donc être trouvé au niveau de la partition des zones.

Le dernier enjeu porte sur la compatibilité électrique, avec le réseau avion, de ces systèmes qui peuvent être très perturbateurs (bruits électro-magnétiques). Les travaux s'axent ici sur :

- le choix du réseau électrique (alternatif ou continu) et la compatibilité des composants du système avec ce réseau,
- la définition d'une architecture de conversion de puissance, centralisée ou déportée, en fonction des objectifs de masse, de sécurité et de disponibilité des systèmes,
- la définition du type de conversion et le contrôle associé permettant une gestion plus ou moins fine de la puissance dissipée dans l'aile et donc de la consommation globale du système.

Les travaux sur les architectures ont débuté dans le cadre du projet Européen MOET mais vont essentiellement être développés dans le cadre du projet JTI Clean Sky où des démonstrateurs représentatifs des différentes technologies vont être développés. Ces démonstrateurs seront testés en conditions extrêmes dans des souffleries givrantes mais aussi en vol en conditions opérationnelles. L'objectif est de caractériser plus finement les différents modes d'opération et de

contrôle des systèmes et d'évaluer les impacts associés sur l'avion.

D'un point de vue des technologies, de nombreux travaux sont aussi en cours. Sur les composants de base des systèmes de protection, que ce soient des tapis chauffants ou des éléments actifs électro-mécaniques, d'importants efforts sont fournis pour :

- sélectionner les matériaux adéquats pour ces composants (parties actives, isolants, ...) et mettre en place les processus de fabrication associés
- optimiser la connectique entre les éléments actifs et le câblage électrique de l'avion,
- augmenter leur niveau de maturité technologique et démontrer leur robustesse face aux environnements représentatifs d'une application aéronautique,

Un autre enjeu réside dans l'intégration de ces composants et du câblage électrique associé dans la voiture. Que ce soient pour des voilures métalliques ou composites, le défi de taille consiste à trouver des solutions radicalement innovantes permettant d'assurer les performances requises, compatibles avec les spécificités des matériaux de la structure avion et garantissant une maintenabilité optimale du système. La maintenabilité est un objectif majeur pour ces systèmes potentiellement soumis à de fréquents dommages (les bords d'attaque des voilures étant des zones particulièrement exposées aux chocs aussi bien au sol qu'en vol). Enfin, dans le cas de protection de zones mobiles comme des becs déployables par exemple, des systèmes mobiles de transfert de puissance doivent être développés pour garantir le déploiement des becs sans endommager le câblage électrique permettant d'alimenter les zones protégées.

Enfin, des améliorations sont attendues sur la surveillance et l'instrumentation de ces systèmes:

- localement pour le contrôle et la protection des éléments actifs (contrôle en température des éléments chauffants par exemple),
- au niveau de l'avion pour améliorer la détection des conditions givrantes et éventuellement en définir précisément la sévérité pour permettre un pilotage précis des systèmes de protection et limiter ainsi leur consommation électrique au juste besoin.

Comme pour les aspects architectures, les technologies requises seront développées et éprouvées dans le cadre de projets européens comme le JTI Clean Sky ou de projets régionaux focalisés sur la maturité de

certaines technologies comme le projet ICE-ELEC appuyé par la Région Midi-Pyrénées.

Demain, tous ces travaux devraient se poursuivre dans le cadre de la plate-forme de développement GENOME du CORAC qui offrira un cadre unique permettant aux équipementiers, systémiers et avionneurs français d'optimiser, ENSEMBLE, l'avion plus électrique en intégrant les visions de la génération à la distribution en passant par les consommateurs. Ce projet s'inscrit dans la continuité des efforts déjà engagés par Liebherr et lui permettra de progresser vers la sécurisation de son positionnement de leader sur les futures plateformes monocouloirs et avions d'affaires. Les principaux axes de progrès seront :

- Accroître la maturité technologique des technologies présentées précédemment et notamment valider leur maturité et leur robustesse vis-à-vis des contraintes environnementales (tenue à la foudre par exemple) pour atteindre des TRL élevés ;
- Poursuivre les travaux pour augmenter les densités de puissance des électroniques avec des objectifs de 7-8 kW/kg,
- Développer des solutions de production et de transport de froid optimisées par rapport aux besoins et exigences des différentes plateformes visées.
- Optimiser l'intégration dans l'environnement avion des solutions technologiques et des architectures envisagées.

### 3. Une vision plus large : la gestion de la puissance électrique et thermique

La gestion de la puissance électrique au niveau global impose plusieurs constats :

- Une évolution du périmètre du domaine de puissance trans-chapîtres ATA
- L'introduction de nombreuses charges thermiques qui nécessitent une gestion spécifique
- Un lien fort entre la gestion de puissance électrique et la gestion thermique
- Des interactions beaucoup plus importantes entre les différentes architectures et des potentialités pour mutualiser et optimiser les solutions envisagées.

Pour être viable, l'avion plus électrique ne peut plus être envisagé sans une maîtrise globale de la gestion de



puissance électrique et thermique, en intégrant les consommateurs majeurs de l'avion.

Depuis plus de 10 ans, Liebherr et Thales ont fourni des efforts de R&D conséquents autour des thèmes électriques. Liebherr Aerospace Toulouse a renforcé ses compétences autour des architectures de systèmes de conditionnement d'air électriques, de gestion thermique et des composants associés : machine motorisée forte puissance, électronique de puissance, compresseur cycle vapeur ; Thales a renforcé ses compétences en ingénierie des systèmes avancés, développement d'électronique de puissance, générateur/démarrreur et gestion de puissance électrique.

Face au constat que les systèmes d'air sont les plus gros consommateurs de puissance électrique, le rapprochement Liebherr/Thales autour d'un même projet de la gestion de puissance à bord est apparu évident ; le projet GETI (gestion optimisée de la puissance électrique et thermique), projet commun Liebherr/Thales a été lancé dès Juillet 2009 avec pour objectifs de:

- Développer de nouvelles architectures génériques et ouvertes capables de répondre aux besoins d'optimisation de l'utilisation de l'énergie électrique et thermique.
- Valider les outils de conception (analyse fonctionnelle axée sur des points de vue comme la performance, la sécurité ou la disponibilité) et de choix (outil d'évaluation du coût de possession) des architectures.
- Réaliser une démonstration générique d'une plate-forme intelligente de gestion des énergies électriques et thermiques sur le banc GETI dans le nouveau centre d'essais ISA (cf. chapitre suivant). La vision système de cette démonstration se détachera des contraintes historiques (Chapitres ATA) sans préjuger de son périmètre final.
- Démontrer des scénarios de gestion de puissance électrique et thermique en intégrant les consommateurs majeurs de l'avion (démarrage des systèmes en conditions extrêmes, délestage des charges sur des modes dégradés, ...).

Dès 2013, Liebherr et Thales pourront proposer une solution viable aux avionneurs (outils de conception et d'aide à la décision, solutions architecturales génériques, ...) pour les accompagner dans la conception d'un futur avion plus électrique, permettant ainsi de contribuer significativement aux objectifs environnementaux à atteindre.

#### 4. Centre d'essais ISA : des moyens à la hauteur des objectifs R&D

ISA (Intégration de Systèmes d'Air) est le nouveau centre d'essais de développement de 9000 m<sup>2</sup> construit par Liebherr Aerospace Toulouse pour un investissement de près de 30 millions d'euros.

ISA est un centre d'essais conçu pour répondre aux besoins actuels et futurs des avionneurs. Les installations permettront de tester à la fois les technologies pneumatiques (avec prélèvement d'air) et les nouveaux systèmes plus électriques sans prélèvement d'air sur les moteurs. ISA permettra, de plus, d'intégrer des systèmes d'air complets et de les valider entièrement avant de les livrer aux avionneurs pour essais en vol.

Une zone est ainsi entièrement dédiée à l'intégration et aux essais des nouveaux systèmes plus électriques avec notamment une qualité de réseau électrique équivalente à celle du réseau de bord d'un avion. La salle d'intégration systèmes permettra notamment de tester la compatibilité des systèmes d'air avec la génération électrique d'un avion.

C'est dans ce nouveau centre d'essais que les premiers systèmes Liebherr/Thales de gestion électrique et thermique, issus du projet GETI (cf. paragraphe précédent), seront testés dès 2011 démontrant la capacité de Liebherr Aerospace Toulouse et Thales AES dans le domaine de la gestion de la puissance.

## Les actionneurs : commandes de vol, train d'atterrissage

**Serge GRAND**

Goodrich Actuation Systems  
106, rue Fourny  
78530 BUC

**Patrice NEVORET / Franck SELLES**

Messier-Bugatti  
Zone Aéronautique Louis Bréguet  
78140 VELIZY VILLACOUBLAY

**Résumé :** Depuis les débuts de l'aéronautique, les avions civils évoluent avec le progrès scientifique, mais les avancées à chaque pas sont très prudentes afin de maintenir le haut niveau de sécurité des transports aériens. Actuellement les architectures des systèmes de commandes de vol se tournent vers le tout électrique et tendent à supprimer toute source d'énergie hydraulique centralisée. Dans l'état actuel des études, les actionneurs électromécaniques n'ont pas encore atteint le niveau de sécurité et de fiabilité requis pour les fonctions critiques des avions. Les nouveaux projets de développement technologiques doivent nous amener à démontrer un niveau de maturité technologique suffisant pour pouvoir installer des actionneurs électromécaniques dans les systèmes de commande de vol des futurs avions en toute sécurité, avec un gain de coût justifiant l'introduction de ces nouvelles technologies.

### 1. Commandes de vol

#### 1.1. Introduction

La trajectoire d'un avion est contrôlée par le positionnement de ses gouvernes ou surfaces aérodynamiques mobiles.

Les gouvernes sont classées en deux catégories :

- les gouvernes primaires qui servent à contrôler la trajectoire et l'attitude de l'avion. Ce sont les ailerons, profondeurs, direction et spoilers.
- Les gouvernes secondaires qui permettent d'améliorer la qualité du vol. Ce sont les becs, les volets et le plan horizontal réglable.

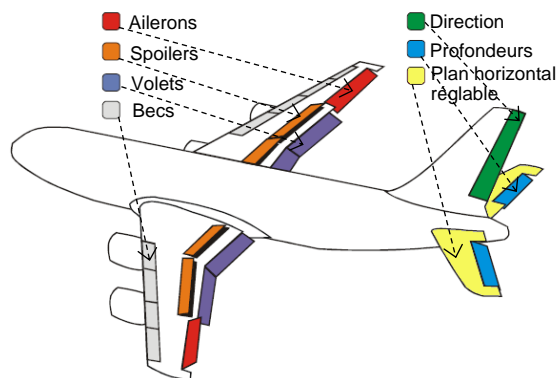


Figure 1. Surfaces de contrôle d'un avion

Dès l'origine de l'aéronautique les gouvernes sont manœuvrées par le pilote à l'aide de câbles puis de tringleries mécaniques.

Certains avions modernes comme l'ATR42-72, ont conservé de telle disposition pour les commandes primaires : direction et profondeur.

L'augmentation de la masse des avions a considérablement accru les problèmes d'inertie et en conséquence de manœuvrabilité. Il a donc fallu développer des dispositifs d'assistance.

Très vite s'impose l'asservissement hydraulique ; une servocommande hydraulique prend en charge la totalité de l'effort de manœuvre. Une faible pression au niveau du levier du pilote suffit à fournir une force de travail considérable sur les gouvernes. Ce sont les servocommandes à puissance hydraulique et ordre d'entrée mécanique (levier du pilote), ce dispositif équipe les avions depuis le Latécoère 631 à l'Airbus A330-A340 (servocommande de direction.), les hélicoptères de l'Alouette 2 au Tigre.

A la fin des années 50, les grands pays industrialisés se lançaient dans la course à l'espace.

Or le pilotage des lanceurs exige une commande asservie, puissante, précise et surtout douée d'une très grande rapidité de réponse. De plus, il n'est plus question d'ordre d'entrée mécanique ; on ne dispose pour la commande que d'un signal électrique à bas niveau de puissance.

La solution universellement retenue est celle de l'asservissement électro-hydraulique à servovalve. Sur avion, les systèmes mécaniques classiques de

transmission de l'ordre du pilote (bielles, tringles, câbles) sont remplacés par des signaux électriques (Fly By Wire) à partir des poignées pilotes ou mini-manches. Ces servocommandes à ordre d'entrée électrique et puissance hydraulique sont montées sur les missiles MSBS : S3, M4, les avions Concorde, Airbus A310, A320, A330, A340 et l'hélicoptère NH90.

La recherche permanente de réduction de la masse des systèmes embarqués au profit de la charge marchande a conduit avionneurs et équipementiers à gagner du poids sur la partie hydraulique. Une solution consiste à réduire la tuyauterie hydraulique en générant sur l'équipement, l'énergie hydraulique dont il a besoin par l'intermédiaire d'une électropompe, ordre de commande et puissance d'alimentation sont alors électriques. L'ensemble est appelé EHA (Electro-Hydrostatic Actuator.)

L'évolution des architectures avion vers une réduction de la consommation de carburant et une réduction de l'impact de l'avion sur l'environnement conduit de plus en plus vers l'utilisation d'actionneurs électromécaniques (EMA).

Cependant la commande des gouvernes est essentielle à la survie de l'avion. En particulier l'avion ou l'hélicoptère ne peut être piloté que s'il existe un minimum de gouvernes opérationnelles. Autrement dit la perte de contrôle doit être un événement extrêmement improbable. C'est à dire que la probabilité doit être inférieure à  $10^{-9}$  défaillance / heure de vol. Ce qui conduit à des concepts propres à l'avion ou à l'hélicoptère par la multiplicité des chaînes de commande et de puissance : duplex, triplex voire quadruplex. Par exemple hélicoptères, avions d'entraînement et avions d'affaires ainsi que les avions sans pilote (exigence de survol des populations civiles).

### 1.2. Avion à énergie optimisée

La notion d'avion plus électrique ne concerne pas la propulsion, mais vise principalement à réduire la consommation en énergie non propulsive à bord des aéronefs.

L'utilisation de sources d'énergie électrique au lieu d'hydraulique permet de réduire les temps d'intégration du réseau dans l'avion. Il est plus aisé de faire circuler un câble électrique contenant deux conducteurs entre les longerons de la structure que deux tuyauteries hydrauliques.

Le rendement global des équipements de la chaîne énergétique allant de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur de propulsion à la puissance mécanique appliquée à la gouverne, est amélioré par la réduction du nombre de transformations d'énergies. Sur un aéronef classique, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique puis en énergie

hydraulique avant d'être convertie en énergie mécanique au niveau de l'actionneur de gouverne. Sur un avion plus électrique l'énergie électrique fournie par l'alternateur est directement utilisée par l'actionneur.

L'amélioration du rendement global se traduit par une réduction de la masse de carburant consommée, et donc une réduction de l'emport de carburant, permettant ainsi de réduire la masse de la structure. Ceci permet de diminuer la taille des surfaces et donc les dimensions et la consommation des actionneurs. Cette diminution se répercute sur la consommation de carburant créant ainsi un effet de cercle vertueux.

### 1.3. Spécificité de chaque type de surface et de sa commande

Chaque type de servocommande a ses propres spécificités en fonction de la surface contrôlée. Une servocommande d'aileron ou de profondeur participe à l'effort de portance de l'aile, et donc doit fournir un effort permanent significatif. En cas de panne, la servocommande doit amortir le flottement de la surface induit par les efforts aérodynamiques.

Une servocommande de direction est très peu sollicitée en vol nominal, mais doit être capable de compenser par un braquage important de la gouverne, une poussée dissymétrique en cas de panne d'un moteur de propulsion. En cas de panne de l'actionneur, la gouverne doit rester autour de la position centrale.

Les actionneurs de spoiler servent à contrôler le roulis de l'appareil en complément des ailerons, et, après avoir touché le sol à l'atterrissage, ils sont utilisés pour casser la portance de l'aile et plaquer l'avion au sol. En cas de panne d'un actionneur de spoiler, il faut interdire toute sortie intempestive de la surface qui doit rester plaquée sur l'aile.

Les actionneurs de bec ou de volet ne servent que lors des décollages ou des atterrissages. Ils sont utilisés afin d'augmenter la portance de l'aile à faible vitesse, permettant de décoller ou d'atterrir à des vitesses réduites. Il faut assurer la symétrie de comportement gauche-droite de l'avion, et donc en cas de panne d'un actionneur de bec ou de volet, la meilleure stratégie consiste à figer tous les actionneurs dans la position atteinte.

L'actionneur de plan horizontal ne sert qu'à ajuster l'équilibre en tangage de l'avion. En cas de panne, la position actuelle de la surface doit être verrouillée.

Ces différences font que chaque surface requiert la conception d'un actionneur spécifique même si la technologie (hydraulique ou électromécanique) est commune.

#### 1.4. Actionneur à puissance électrique

Un actionneur à puissance électrique se compose d'un coffret électronique chargé de réguler la puissance transmise au moteur électrique, d'un moteur électrique piloté en vitesse et d'un moyen de transformation de l'énergie mécanique de rotation fournie par le moteur en énergie mécanique de translation appliquée à la gouverne.

Dans le cas d'un EHA (actionneur électro-hydraulique) la transformation de mouvement se fait à l'aide d'une pompe et d'un vérin. Lorsque le moteur électrique tourne, il entraîne la pompe qui aspire l'huile dans une chambre du vérin et la renvoie dans l'autre chambre provoquant le déplacement du piston et donc de la surface aérodynamique.

Dans le cas d'un EMA, (actionneur électromécanique) la transformation de rotation à translation se fait par une vis à bille ou à rouleaux.

#### 1.5. Actionneur électro hydraulique

L'actionneur électro hydraulique a permis d'introduire sur les avions la technologie de l'actionnement à source de puissance électrique, sans abandonner les avantages de l'actionnement hydraulique de la gouverne. Nous disposons d'une expérience de plus de 70 ans dans l'utilisation des vérins hydrauliques, et donc d'une très bonne connaissance des modes de défaillances et des moyens de s'en protéger.

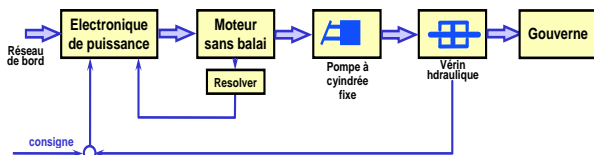


Figure 2. Synoptique d'un EHA

Comme tout autre actionneur hydraulique, l'EHA réclame également des interventions de maintenance préventive pour changer les joints hydrauliques quand ils arrivent en fin de vie. Mais le principal défaut de l'EHA est la durée de vie de la pompe qui est limitée par rapport à la durée de vie attendue de l'avion. C'est pour cette raison que Airbus, sur l'A380, n'utilise les EHA qu'en seconde ligne. En fonctionnement normal, ce sont les actionneurs électro hydrauliques qui assurent le contrôle des gouvernes de l'avion. Les EHA n'interviennent qu'en mode secours, en cas de défaillance d'un circuit hydraulique ou d'un actionneur électro hydraulique.

#### 1.6. Actionneur électromécanique

La tendance actuelle est d'orienter les développements vers les actionneurs électromécaniques, délaissant les actionneurs hydrauliques.

##### 1.6.1. Architecture d'un actionneur électromécanique :

Dans le cas des actionneurs électromécaniques, la transformation du mouvement rotatif en mouvement rectiligne se fait par l'intermédiaire d'un système vis / écrou. Afin d'améliorer les rendements et la réversibilité du système on utilise de préférence des systèmes de vis à bille ou de vis à rouleaux.

Trois concepts d'actionneurs électromécaniques sont actuellement à l'étude :

- L'actionneur à entraînement direct dans lequel le moteur électrique est directement accouplé à la vis à bille ou à rouleaux. Il a l'avantage du faible nombre de pièces et sa simplicité lui apporte un taux de défaillance faible. Par contre, compte tenu des couples mis en jeu, et de la faible vitesse de rotation du moteur, ce dernier a un volume significatif.

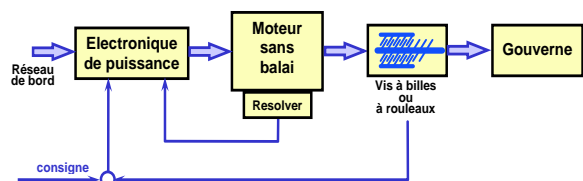


Figure 3. Synoptique d'un EMA linéaire à entraînement direct

- L'actionneur à moteur déporté dans lequel le moteur entraîne la vis à travers un réducteur composé d'un certain nombre de trains d'engrenages. La présence d'un réducteur va permettre de faire tourner le moteur électrique à plus grande vitesse avec un couple plus faible que précédemment, réduisant ainsi l'encombrement du moteur. Par contre, l'ajout d'un réducteur entraîne l'apparition de risques de défaillance supplémentaires.

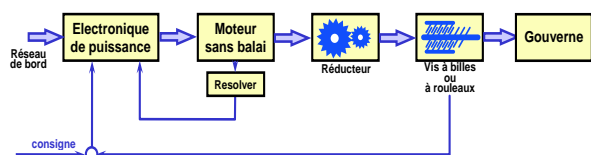


Figure 4. Synoptique d'un EMA linéaire à moteur déporté

- L'actionneur rotatif de charnière dans lequel le moteur électrique entraîne un réducteur qui actionne directement la gouverne en appliquant un couple au niveau de la charnière. La suppression de transformation du mouvement rotatif en mouvement rectiligne va permettre un gain en complexité du mécanisme, mais il



reste toujours l'inconvénient du réducteur et de ses engrenages qui accroissent les risques de grippage.

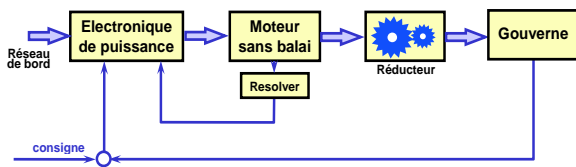


Figure 5. Synoptique d'un actionneur rotatif de charnière

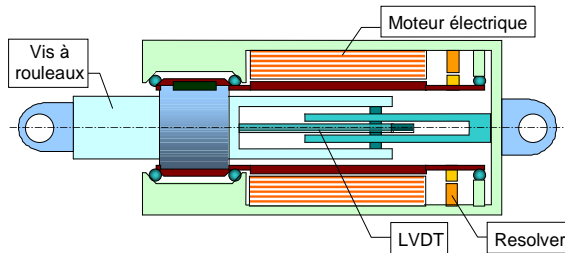


Figure 6. Schéma d'architecture mécanique d'un EMA linéaire

#### 1.6.2. Avantages

Les principaux avantages d'un actionneur électromécanique par rapport à un actionneur hydraulique sont les suivants :

- Suppression des fluides hydrauliques très néfastes pour l'environnement.
- Consommation d'énergie uniquement lorsque l'on utilise l'actionneur, contrairement à un actionneur hydraulique qui consomme en permanence l'énergie correspondant aux débits de fuite des servovalves.
- Réduction du coût de possession du système car sur un actionneur électrique, il n'y a que très peu de maintenance ( pas de joints à changer régulièrement, bonne durée de vie des roulements, des moteurs électriques ...)
- Réduction de la masse du réseau de transport de l'énergie, en effet des câbles électriques haute tension sont plus légers que des tuyauteries hydrauliques utilisées pour transporter la même puissance.
- En cas de panne, il est plus facile d'isoler une branche d'un réseau électrique qu'une partie d'un réseau hydraulique.

#### 1.6.3. Inconvénient

- Dans un actionneur hydraulique, il n'y a pas de contact métal / métal, toutes les pièces en mouvement relatif sont séparées par des joints ou des patins. Dans un actionneur électromécanique, de nombreuses pièces en métal, en mouvement relatif, sont en contact (engrenages roulements à bille, rouleaux, et vis, ...) entraînant un risque de grippage accru.

▪ Pour des actionneurs ayant des efforts permanents à fournir, l'utilisation de la technologie hydraulique se traduit par l'apparition d'une différence de pression statique de part et d'autre du piston, sans dissipation d'énergie. La tenue d'un effort permanent par un actionneur électrique entraîne la dissipation d'une énergie thermique significative par effet Joule dans les bobinages du moteur électrique.

▪ Le coût d'un actionneur électromécanique est supérieur au coût d'un actionneur hydraulique. Par contre, il convient d'ajouter au coût d'un ensemble d'actionneurs hydrauliques le coût de la génération hydraulique centralisée embarquée dans l'avion pour alimenter les actionneurs hydrauliques.

#### 1.6.4. Les challenges

Les défis qui restent à relever sont principalement les suivants :

- L'étude d'architecture d'actionneur permettant la transmission de la puissance vers la gouverne par des liaisons mécaniques redondantes permettant de maintenir l'actionneur opérationnel en cas de grippage d'une des liaisons. De telles solutions sont très gourmandes en volume et en masse (duplication des fonctions) alors que l'encombrement disponible dans une aile pour loger un actionneur d'aileron est très réduit. De plus, dans les nouveaux avions, les concepteurs mettent à profit l'utilisation de matériaux composites pour créer des ailes plus fines, ayant un meilleur comportement aérodynamique, et réduisent ainsi notablement l'espace disponible pour installer les actionneurs de commandes de vol.

Une autre solution pour la prise en compte du risque de grippage consiste à utiliser un système électronique de surveillance de l'actionneur. En mesurant l'évolution d'un nombre de paramètres caractéristiques de l'usure de l'actionneur, il va être possible de pronostiquer l'arrivée d'un grippage quelques heures de vol avant que la panne n'advienne, permettant ainsi aux équipes de maintenance de remplacer l'actionneur défectueux avant qu'il ne soit complètement bloqué. La sécurité de l'avion dépend alors de la fiabilité des algorithmes de pronostic, et il reste encore beaucoup de travaux d'étude avant de pouvoir obtenir un taux de sécurité du système de pronostic pouvant satisfaire les exigences de la certification.

- L'optimisation des rendements directs et indirects des systèmes de transformation du mouvement rotatif en mouvement linéaire, et la maîtrise de leur valeur afin de pouvoir aisément contrôler l'effort maximal transmis à la structure par un simple contrôle du couple du moteur électrique sans avoir recours à un capteur d'effort.

- La lubrification, qui est également un point critique, car contrairement à un actionneur électro hydraulique dans lequel l'huile circule, évacue les calories et lubrifie les organes internes en mouvement, dans un actionneur électromécanique, le produit de lubrification (huile ou graisse) est enfermé et ne se renouvelle pas. Une des voies en cours d'investigation est l'utilisation de lubrifiants solides, ou la construction des pièces mécaniques avec des matériaux pouvant glisser sans avoir besoin de lubrification.

- L'étude de nouveaux moyens d'évacuer les calories générées par l'électronique de puissance et surtout par le moteur électrique lors du fonctionnement en maintien de la charge statique. Une solution pourrait être l'emploi d'un frein électromagnétique, mais les constantes de temps de serrage et desserrage d'un frein ne sont pas compatibles avec les petits mouvements qu'une servocommande effectuée en permanence pour contrer les perturbations aérodynamiques et maintenir stables la trajectoire et l'attitude de l'avion, sous les ordres des calculateurs de vol.

- L'amélioration des coûts par création de modules standards réutilisables sur la plus part des actionneurs électromécaniques aéronautiques, quelle que soit le type d'application. Ces modules peuvent constituer par exemple une famille de sous-ensembles d'électronique de puissance servant à piloter les moteurs des actionneurs, ou une famille de moteurs standards.

### 1.7. Projets technologiques européens

La commission européenne finance des projets ayant pour but d'améliorer les conditions de fonctionnement des moyens de transports, et parmi les projets concernant l'aéronautique, on peut citer les projets suivants qui ont eu une répercussion sur les actionneurs de commande de vol :

- AWIATOR

Etude d'un vérin électromécanique de « trim » pour commande de vol

- CREAM

Etude d'utilisation de composants électroniques haute température dans les électroniques de puissance pour les actionneurs

- POA

Développement d'un banc de test et évaluation des performances d'un réseau de bord haute tension continue

- MOET

Etude de l'impact d'un réseau de bord en tension alternative sur l'architecture d'un avion et, au niveau actionneur, étude des organes mécaniques d'un EMA.

- Clean Sky

Projet orienté vers l'écodesign d'un avion plus « vert »

### 1.8. Le futur

Les études avancées actuellement s'orientent vers la suppression des surfaces mobiles, pour les remplacer par des ailes à évolutions de forme dynamique, modifiant ainsi les caractéristiques aérodynamiques de l'avion afin d'influencer sa trajectoire et son attitude.

De nombreux travaux de recherches s'orientent vers des matériaux « intelligents » tels que des matériaux piézoélectriques, des matériaux magnétostrictifs ou des matériaux à mémoire de forme. De tels matériaux pourront être noyés dans la structure qui compose l'aile. Lorsqu'ils seront excités, ils entraîneront une déformation de l'aile pour en modifier le comportement aérodynamique.

Commencent également à apparaître des études sur les actionneurs à plasma dont le rôle est de contrôler l'écoulement d'air le long des bords de fuite de l'aile, allant jusqu'à créer des décollements de la couche limite pour modifier le comportement aérodynamique.

Les actionneurs à source d'énergie électrique sont actuellement l'objet d'une attention particulière en vue de leur emploi sur la prochaine génération d'avions civils. Toutefois, la maturité de ces technologies n'est pas encore assez avancée pour pouvoir les embarquer dans un programme de production de série. Les travaux à venir ont pour but d'acquies cette maturité, tant pour les actionneurs électro hydrostatiques que pour les actionneurs électromécaniques.

## 2. Train d'atterrissage

### 2.1. Introduction

Les trains d'atterrissage comportent 3 systèmes différents pouvant bénéficier de la plus grande électrification de l'avion :

- Système d'Extension/Rétraction électrique : actionnement des trains avant et principaux, des trappes et de leurs crochets associés
- Système de Steering électrique : orientation du train avant pour diriger l'avion
- Système de freinage électrique ou plutôt freinage actionné électriquement. En effet, le principe de friction est conservé pour la transformation de l'énergie cinétique de l'avion, mais les pistons hydrauliques pressant les statots et les rotors du frein sont remplacés par des actionneurs électromécaniques.

## 2.2. Historique des technologies des avions commerciaux en exploitation

Les systèmes de manœuvre et steering de l'A300 étaient à entrée mécanique, et puissance hydraulique.

Le système de freinage des A300/310 était à entrée hydraulique et puissance hydraulique

Les systèmes train de l'A320 sont à entrée électrique et puissance hydraulique

Le système de freinage du B787 est à entrée électrique et puissance électrique

## 2.3. Avion à énergie optimisée

Le développement du train d'atterrissage électrique ne peut être dissocié du contexte général de l'avion électrique.

En aviation, les énergies dites de servitudes, qui ne servent pas à la propulsion de l'avion, sont indispensables. Elles permettent d'actionner les commandes de vol, d'alimenter les équipements électroniques de navigation, d'assurer un confort auprès des passagers. Ces énergies auxiliaires s'appuient actuellement sur trois vecteurs énergétiques : les fluides hydrauliques, l'air comprimé, l'électricité.

Le concept d'avion électrique vise à remplacer les deux premiers par le troisième. Certaines innovations apportées par l'avion électrique ont déjà été mises en œuvre sur certains appareils comme l'Airbus A380. D'autres innovations sont actuellement étudiées et seront déployées sur les avions de prochaine génération.

D'un point de vue technique, les avantages de l'avion électrique sont multiples. Celui-ci permet :

- De réduire les redondances entre les différents vecteurs énergétiques et par conséquent de réduire la masse de l'avion et la consommation de carburant
- De réduire la pollution liée aux fuites de liquides toxiques des fluides hydrauliques
- De réduire la masse et par conséquent la consommation de carburant et les émissions polluantes liées

Ces nombreux avantages ont fait de l'avion électrique un sujet majeur d'innovation dans le monde de l'aéronautique pour les dix prochaines années.

Alors que les systèmes à puissance hydraulique et pneumatique sont intégrés et maîtrisés depuis longtemps, les systèmes électriques posent un certain nombre de défis à relever.

## 2.4. Actionneurs électromécaniques

### 2.4.1. Avantages

L'arrivée de technologies électriques et écologiques dans les avions et en particulier dans les systèmes de train a un effet direct sur leur coût en permettant :

- De réduire le délai et le coût de la maintenance (les systèmes électriques sont plus faciles à maintenir que les systèmes hydrauliques équivalents)
- De réduire les délais et le coût de conception (le déploiement d'un réseau électrique à l'intérieur de l'avion est plus discret que celui d'un réseau hydraulique)
- De réduire les coûts induits par la pollution (pour faire face aux nouvelles contraintes réglementaires en matière de pollution, les industriels du secteur ayant développé des avions plus écologiques dépenseront moins d'argent sur les marchés du CO2).

Le développement des systèmes de train électriques sont aussi l'occasion de développer et d'intégrer des capteurs dans les systèmes pour mieux maîtriser leur sécurité et leur maintenance. Ces capteurs et le traitement des informations qu'ils donnent sont regroupés sous le terme de « Health Monitoring ». L'installation de capteurs au niveau des systèmes de train permet d'obtenir des informations sur leur état de santé et leur usure. Des opérations de maintenance peuvent alors être programmées en avance et durer moins longtemps, réduisant ainsi la durée d'immobilisation des appareils pour les compagnies aériennes.

### 2.4.2. Inconvénients

Le principal défaut des équipements électriques vient de leur pénalité de masse par rapport aux équipements hydrauliques équivalents. Le gain de masse des systèmes électriques ne pourra ainsi s'obtenir qu'à travers une refonte complète des systèmes et grâce à des architectures innovantes. Il devra également profiter des gains de masse que permettent par exemple les matériaux composites.

Un autre défaut de l'électricité par rapport à l'hydraulique est le coût des équipements, rendant nécessaire d'importants travaux pour développer la modularité, la mutualisation ainsi que la standardisation des composants utilisés sur les actionneurs.

Enfin pour des aéronefs à fort nombre de cycles journaliers, les fiabilités actuelles des équipements électroniques sont insuffisantes pour une exploitation commerciale.

### 2.4.3. Les challenges

Les challenges à relever pour les systèmes d'atterrissage plus électriques sont nombreux, entre autre il s'agira de :

- Gérer les cas de grippage des EMA pour répondre à la criticité de la fonction extension des trains d'atterrissage.
- Maîtriser l'impact des actionneurs électriques de Steering (EHA ou EMA) sur le comportement du train « avant » par rapport au phénomène de Shimmy.
- Offrir une solution d'actionnement EMA à masse compétitive par rapport à l'hydraulique, en particulier sur les actionneurs de forte puissance tels que la rétraction de train principal.
- Atteindre le niveau de maturité nécessaire à coût objectif sur l'ensemble des systèmes permettant aux avionneurs de sélectionner ces technologies pour bâtir leur architecture avion.

### 2.5. Projets technologiques passés et présents

La notion d'actionnement électrique est apparue dès le début des années 90, dans le cadre des programmes de recherche et de réflexion lancés par les avionneurs. L'un de ces programmes, EGIDE, entrepris par Aérospatiale, avait entre autres objectifs de déterminer si les nouvelles technologies d'alors, actionneurs de type EHA (Electro-Hydraulic Actuator) ou EMA (Electro-Mechanical Actuator), pouvaient s'appliquer au freinage ou à l'extension/rétraction des trains. Toutes ces réflexions s'inscrivaient dans le projet de développement d'un avion "Plus électrique", voire "Tout électrique". Elles étaient motivées par les avantages attendus, liés à l'élimination des nombreux circuits hydrauliques de l'avion : suppression des fuites hydrauliques et diminution des risques de feu (45% des feux de fluide hydraulique sont liés au frein), gain de masse, simplification de la maintenance par élimination de la purge (23% des actions de maintenance des freins sont liés aux systèmes hydrauliques).

#### 2.5.1. Freinage électrique

Messier-Bugatti a continué de travailler sur le freinage électrique, à travers un projet de recherche s'étant terminé par des essais en vol sur A340-600 et un développement en cours pour le Boeing 787-Dreamliner, Messier-Bugatti a développé une première génération de frein électrique performante et mature. Néanmoins, cette première génération reste à améliorer pour être compétitif avec du freinage hydraulique sur les aspects : masse, coûts et fiabilité des équipements électroniques notamment.



Figure 7. Frein électrique de 1<sup>ère</sup> Génération

Cette première expérience a permis d'évaluer les choix architecturaux permettant une optimisation au niveau du système. Messier-Bugatti développe ainsi une deuxième génération de système de freinage électrique adressant plusieurs problématiques décrites dans les paragraphes suivants.

La localisation des boîtiers de puissance (aujourd'hui en soute pressurisée avion) est un degré de liberté intéressant sur lequel il nous faut savoir jouer. Ainsi le projet SEFORA (Smart EMA For Operations in Rough Atmosphères) adresse la problématique d'intégration de l'électronique. Le rapprochement de l'électronique de la soute vers le frein permet de s'affranchir de câbles lourds le long du train et des problématiques de compatibilité électromagnétique complexes. L'enjeu est alors de concevoir une électronique robuste aux conditions environnementales sévères du frein : thermique ( $>100^{\circ}\text{C}$ ), vibrations, dimensions réduites, ... Cet axe de recherche est primordial même si l'électronique n'est finalement pas intégrée sur le frein. En effet, une augmentation de la tenue en température peut être transformée, à iso-température, soit en augmentation de la fiabilité de l'équipement, soit en compacité, avec un packaging moins favorable à la dissipation thermique.

La compacité de l'actionneur est nécessaire pour adresser les marchés d'avion militaire, d'avion d'affaire et de drone qui deviennent des cibles potentielles pour le frein électrique. Des études de faisabilité sont en cours sur des freins de petites tailles.

L'optimisation de l'intégration des systèmes, l'amélioration de la maturité des technologies et l'attractivité du freinage électrique intéressent les avionneurs qui n'hésitent plus à s'engager dans des projets de R&T conjoints.



Ces études ont pour objectifs de valider et d'étendre la technologie « frein électrique » de l'avion d'affaire jusqu'aux avions commerciaux.

### 2.5.2. Extension/Rétraction et Steering électriques

Messier-Bugatti a développé et continue de développer dans le cadre des projets MELANY et CISACS des solutions d'actionnement électrique pour adresser les systèmes d'Extension/Rétraction et Steering sur un train avant par 2 concepts différents :

- EHA distribués, en utilisant un seul et même groupe motopompe pour l'ensemble des actionneurs du train avant.

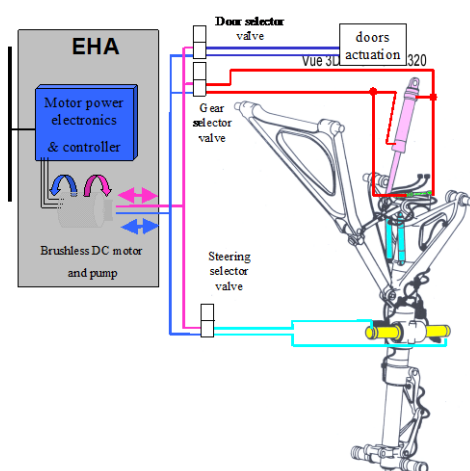


Figure 8. Schéma d'architecture EHA distribué pour train avant (Extension/Rétraction et Steering)

- EMA à électronique de puissance mutualisée entre les 2 systèmes.

Par la maîtrise de l'ensemble du panel des solutions électriques et hydrauliques, Messier-Bugatti peut accompagner les avionneurs pour la comparaison des différentes options pour leur architecture avion.

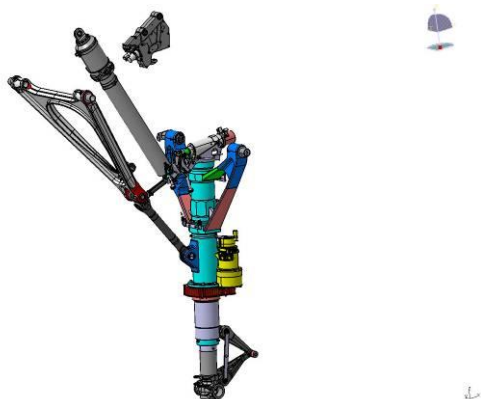


Figure 9. Schéma d'une architecture EMA pour train avant (Extension/Rétraction et Steering)

L'actionnement électromécanique permet une implémentation plus aisée de la redondance sur la fonction Steering. Ceci a été démontré dans le cadre du projet Européen DRESS, dans l'optique d'autoriser des atterrissages sans visibilité même en cas de panne simple sur le Steering.

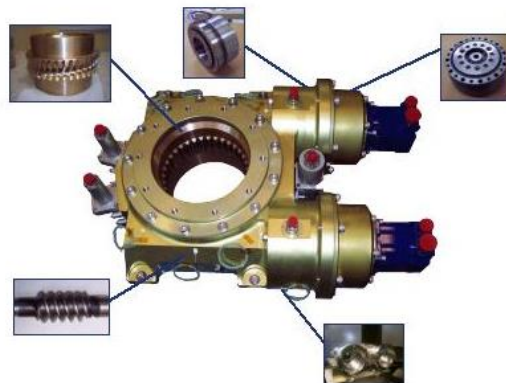


Figure 10. Actionneur de Steering EMA DRESS

### 2.6. Le futur

Les programmes passés ont montré l'intérêt de poursuivre les travaux de recherche dans le domaine du plus électrique. Ils ont également permis de mettre au point des technologies de train électrique à un niveau TRL 4.

Les projets futurs doivent permettre d'aboutir à une nouvelle génération de trains d'atterrissages, plus électriques, plus respectueux de l'environnement (à la fois en termes de pollution et de nuisances sonores) et moins coûteux, qui soit poussée à un niveau de maturité TRL6/7.

Notamment le projet ACTUATION 2015 permettra de fédérer l'ensemble des acteurs européens de l'actionnement aéronautique en vue de réduire drastiquement les coûts et augmenter la fiabilité des EMAs, en travaillant les concepts de modularité, mutualisation et surtout standardisation des composants majeurs de l'actionneur que sont les électroniques de puissance et leur contrôle, ainsi que les moteurs et organes de transmission.

Le projet AFUE<sup>3</sup> (Atterrisseur du FUTur Electrique, Ecologique, Economique) prévoit des progrès majeurs au niveau de la maturité des systèmes électriques de train d'atterrissage. Il permettra d'optimiser et d'atteindre la maturité nécessaire sur les sujets suivants :

- Une structure de Train optimisée pour des fonctions d'actionnement électrique
- Un système de manœuvre de Trappes et Train à actionnement électrique

- Un système d'orientation à actionnement électrique
- Un système de Freinage à actionnement électrique
- Un système embarqué de Traction autonome au sol
- Une électronique de contrôle et de puissance mutualisée, modulaire et générique
- Un Réseau local d'alimentation électrique à récupération d'énergie
- Une fonction de Health Monitoring prédictive, générique et paramétrable pour des actionneurs de Train critiques et complexes, basée sur des réseaux de capteurs de nouvelle génération 4G sans fil (vitesse, effort, couple, pression...)
- Des actionneurs électriques intégrant des matériaux composites pour réduire leur masse.
- La validation de l'endurance du concept de famille de moto-pompes modulaires à durée de vie augmentée (EHM Long Life)

# Challenge et Evolution des Electroniques de Puissance

**Régis MEURET** : SAFRAN HISPANO-SUIZA

**Hervé MOREL** : SEEDS, LABORATOIRE AMPERE

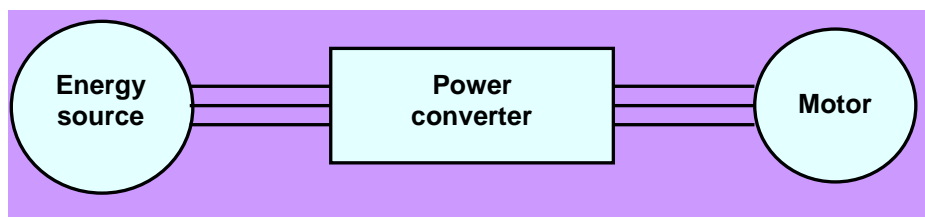
**Résumé** : Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance destinés à être intégrés dans la structure électrique d'un avion doivent faire face à un grand nombre de contraintes : compacité, conditions sévères de fonctionnement, fiabilité. L'efficacité d'intégration demande des progrès dans trois domaines : le cœur du convertisseur avec le module de puissance, le filtrage et ses éléments passifs et la thermique de refroidissement

## I. INTRODUCTION

### 1) Le contexte aéronautique actuel :

La thématique de la conversion d'énergie dans l'aéronautique est actuellement en pleine croissance et l'électronique de puissance y prend une place de plus en plus importante. Elle intervient dans la chaîne de

transmission de la puissance pour convertir l'énergie provenant du réseau électrique afin d'alimenter le moteur électrique qui lui même la convertira en une énergie mécanique pour mouvoir directement ou indirectement la charge (ex : actionneur, commande de vol, pompe hydraulique ,...)



De nombreux programmes de recherche ont montré l'intérêt des systèmes électriques au niveau maintenance, disponibilité, installation, capacité d'optimisation mais ils ont montré aussi qu'il fallait améliorer les performances actuelles et gagner au niveau masse, volume et fiabilité. De nombreux gains se feront en ayant une vue globale sur le système et de son intégration dans l'avion. SAFRAN et SPEC (SAFRAN POWER ELECTRONIC CENTER) travaillent très activement sur ce sujet et spécialement sur le sujet des électroniques de puissance en environnement sévère, et très sévère pour les applications réacteur et frein. Dans ces conditions, il peut être intéressant d'avoir des électroniques à haute température, non pas pour réduire le besoin de refroidissement ou lié à la contrainte d'intégration mais aussi en fonction de l'environnement dans lequel on souhaite mettre cette électronique de puissance pour éviter d'avoir des câbles blindés entre le convertisseur et le moteur .

De nombreuses applications sont en exploitation ou vont l'être très prochainement. On peut citer les commandes de vol (zone aile) , l'inverseur de poussée (zone nacelle réacteur), l'actionneur de frein (zone fuselage pressurisée), les ventilateurs (zone fuselage pressurisée), les pompes carburants.... Ces applications montrent des besoins dans une gamme de puissance

variant de quelques centaines de Watt à plusieurs dizaines de kilo-Watt mais montrent aussi des environnements très différents et donc des contraintes très variables en température de  $-55^{\circ}\text{C}$  à plus de  $100^{\circ}\text{C}$ , ainsi que des contraintes en pression et dépression, humidité, vibration, radiation. Ces contraintes vont nécessiter d'avoir des électroniques qui leur résistent et qui tiennent dans le temps. Elles ont un impact sur la fiabilité et sur les technologies à mettre en œuvre pour résister aux agressions et donc sur le coût. De nombreux programmes de recherches sont en cours ou sont proposés via le grand emprunt pour apporter des solutions d'amélioration de la fiabilité mais aussi de standardisation pour la réduction des coûts.

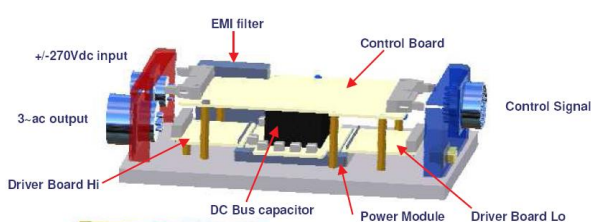
### 2) Les verrous technologiques associés

Pour que les bénéfices identifiés au niveau avion soient réels, il convient de maîtriser la masse, la fiabilité et la qualité d'intégration des équipements. Si l'électrification des équipements industriels a bénéficié des progrès considérables des convertisseurs statiques de puissance, leur conférant un meilleur rendement, une souplesse de commande, un contrôle incomparable et au total des avantages économiques indéniables, il n'en est pas de même pour les systèmes embarqués pour lesquels la masse et l'encombrement sont comptés.

L'environnement est d'une sévérité accrue et, plus que tout autre s'agissant d'un aéronef, la sécurité ne peut être obtenue au prix d'une simple interruption de mission. Des verrous technologiques subsistent qu'il convient de faire sauter à moyen terme avec des difficultés supplémentaires : de faibles quantités et une multitude d'applications.

### L'efficacité d'intégration concerne trois domaines :

- le cœur de puissance avec le module de puissance et l'intégration de son driver, la commande de l'onduleur : pour les puissances de l'ordre de 2 à 5 kW. La partie commande est la partie prépondérante du convertisseur (Figure 1).



**Fig. 1:** Convertisseur dans la gamme 2 à 5 kW

- le filtrage et les éléments passifs qui le composent (le filtrage en entrée, le filtrage en sortie si nécessaire) : une part importante du convertisseur qui peut dépasser les 30 % du coût.
- la thermique des électroniques de puissance dans un environnement où les sources froides sont peu efficaces ou gourmandes en masse et qui pourtant reste indispensable pour une intégration optimale et indispensable pour les puissances supérieures à 10 kW.

## II. L'INTEGRATION DU CŒUR DE PUISSANCE, DU DRIVER ET DE LA COMMANDE DE L'ONDULEUR

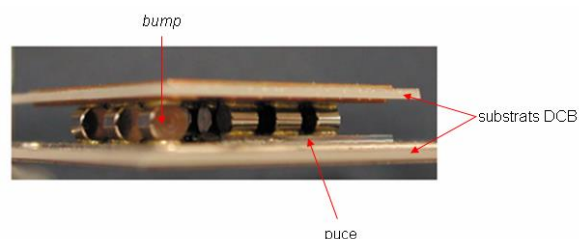
Parmi les voies d'amélioration, deux sont décrites ci-dessous :

- la première vise à la compacité des convertisseurs
- la seconde vise le fonctionnement à plus forte température

### 1) Convertisseurs compacts

La réduction de la masse et du volume, et l'amélioration de la fiabilité des convertisseurs, pour les prochaines applications, passe par l'amélioration des technologies d'assemblage et de la tenue en tension et en température des isolants des modules. Ainsi la

technologie bump, développée notamment par le laboratoire PEARL, est une technologie d'alternative au bonding qui est prometteuse (Figure 2).



**Fig. 2:** Assemblage double-face avec la technologie bump [1]

Elle améliore les performances des modules IGBT et leur intégration en terme de :

- Compacité du module,
- Performances électriques : réduction des inductances et résistances parasites,
- Performances thermiques : augmentation de la surface d'échange (diminution de  $R_{th}$ ) grâce à un refroidissement double face.

Elle est complétée par l'intégration des capteurs de courant et de température et sera suivie par l'intégration du driver car à ce jour la fonction driver représente les 2/3 de la surface du cœur de puissance pour les faibles puissances (gamme 2-5 kW) ce qui n'est plus le cas pour les fortes puissances (supérieures à 10 kW) (Figure 3).

**Fig. 3:** Amélioration de la compacité d'un convertisseur faible puissance

La réussite de cette intégration passe par la maîtrise de la compatibilité électromagnétique de l'ensemble, la tenue mécanique de cette fonction driver en fonction des stress liés à l'application et de la capacité de l'électronique bas niveau à supporter des températures plus grandes tout en garantissant un bon niveau de fiabilité.

Il est courant de parler de module de puissance et de technologie MCM pour le bas niveau (multi-chip module), pour ces nouvelles réalisations nous parlerons de MCPM : multi-chip power-module.

### 2) L'électronique de puissance haute température

La limite en température d'utilisation des composants de puissance à semi-conducteur est essentiellement définie par la caractéristique d'emballage thermique du semi-conducteur. La figure. 4 montre les limites d'emballage thermique des principaux semi-conducteurs utilisés ou envisagés



pour les composants de puissance. C'est une limite infranchissable. C'est cette limite qui est franchie quand

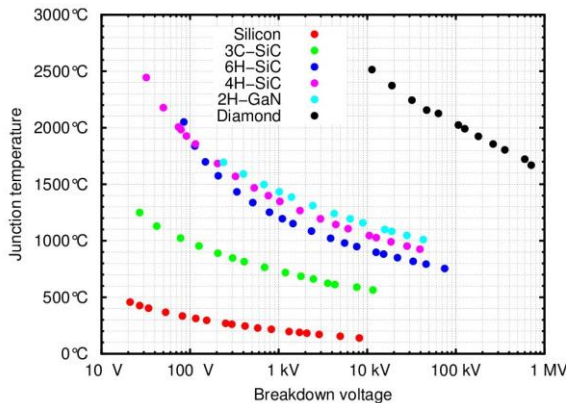


Fig. 4: Limites d'emballement thermique des principaux semi-conducteurs utilisés pour les composants de puissance

un IGBT meurt en court-circuit.

Les matériaux à large bande interdite améliorent sensiblement cette limite. Les principaux matériaux étudiés ces dernières années ont été le carbure de silicium SiC, le nitrure de gallium GaN, voire le diamant. Le diamant est de loin le meilleur matériau mais la maturité technologique est assez lointaine. Des prototypes de composants de puissance en GaN ont été réalisés. Le GaN et le SiC sont assez voisins en termes de propriétés sauf pour la conduction thermique très en faveur du SiC. C'est pourquoi le GaN, par rapport au SiC, vise plutôt des tensions (jusqu'à 1200V), des puissances, et des températures plus modérées. Le GaN est toutefois susceptible à terme d'être moins coûteux. Le SiC est toutefois plus mature. Les diodes en carbure de silicium sont commercialisées par différents fabricants (INFINEON, CREE...). L'intérêt des transistors JFET et MOSFET en SiC a été démontré au niveau recherche. A ce jour, les JFET en SiC sont facilement disponibles sous forme d'échantillons. Enfin la commercialisation par INFINEON du JFET SiC est annoncée pour fin 2011.

Le SiC permet des pertes en conduction et en commutation réduites par rapport au silicium. Le SiC permet aussi une grande rapidité en commutation et des densités de courant plus importantes. Aussi, les puces sont-elles plus petites. Le JFET SiC d'INFINEON possède une diode interne de bonne qualité. L'onduleur ne nécessite pas de diode en anti-parallèle, donc le gain en volume est important. Les premiers résultats sont prometteurs et démontrent bien l'intérêt de ces nouveaux composants. Le SiC apportera aussi d'autres avantages grâce à son aptitude à résister aux SEU (Single Event Upset) du fait de sa plus grande bande interdite.

Un module de puissance intégré (onduleur de 5 kW) dédié aux applications hautes températures a été réalisé. Il utilise des JFET SiCED 15 A /1200 V. Il s'agit d'un démonstrateur qui doit permettre de mettre en évidence les limites extrêmes de fonctionnement en température dans un boîtier adapté, mais également de servir de véhicule de tests pour des essais de fatigue et

pour des considérations de fiabilité (cyclages thermiques en cours  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $200^{\circ}\text{C}$ ).

Les matériaux du module ont été choisis pour satisfaire à la contrainte de fonctionnement à haute température. La sélection des constituants ne s'est pas faite sur la seule optimisation de la résistance thermique entre la puce et le boîtier, mais aussi sur l'homogénéisation des coefficients d'expansion thermique pour minimiser au mieux les contraintes thermomécaniques, et ainsi optimiser la fiabilité de l'assemblage. Le module de puissance intégré décrit ci-dessous est employé comme véhicule de tests pour les caractérisations électriques en régimes statique et dynamique.

Pour les drivers, le choix des composants se portera sur des composants SOI (Silicon On Insulator). En effet, beaucoup de dispositifs SOI ont été testés avec succès à Haute Température (de  $75$  à  $300^{\circ}\text{C}$ ). La technologie SOI est plus compacte que le Si grâce à sa meilleure isolation et a moins de courants de fuite à tension donnée grâce à la réduction de la capacité parasite.

### III. LES PASSIFS : ETAT DE L'ART ET TRAVAUX D'INTEGRATION

La réduction de la taille, le coût, l'amélioration de la fiabilité mais aussi de l'efficacité énergétique des produits sont depuis de nombreuses années les préoccupations majeures des concepteurs de systèmes d'électronique de puissance. Malgré tout, si l'on observe un convertisseur de puissance réalisé aujourd'hui, le premier constat que l'on fait est, que dans la majorité de cas, il est constitué d'un assemblage d'un nombre important d'éléments discrets ayant nécessité un grand nombre de technologies pour les réaliser. Pour améliorer

#### Three-Phase SiC Motor Drives



SiC Multichip Power Modules

- 600 V DC bus
- 3-phase 4 kW operation
- $250^{\circ}\text{C}$  baseplate temp
- $300+^{\circ}\text{C}$  SiC junction temp
- 5% to 95% PWM duty cycle
- SOI HTMOS control
- SiC SICEED JFETs
- Cree Schottky's



Fig. 5: Exemple de réalisation en cours de test aux USA (source APEI)

cet état, plusieurs solutions ont été apportées. Concernant les passifs, outre les progrès considérables qui ont été faits sur leur modélisation et leur dimensionnement, une évolution importante dans leur technique de réalisation a été l'apparition des composants planars qui a permis de reconsidérer la conception des composants bobinés. Les avantages de cette technique sont nombreux. Elle permet la

conception de composants de très faible hauteur bien adaptés aux contraintes des systèmes embarqués. La réalisation des bobinages sur circuit imprimé présente, d'autre part, bien des intérêts car en permettant un meilleur contrôle de leur géométrie elle autorise une meilleure détermination des éléments parasites et une meilleure reproductivité des caractéristiques des composants réalisés. De plus, grâce à la fabrication collective et/ou simultanée avec le circuit comportant le composant bobiné, elle devrait permettre, à terme, des gains sur le coût des produits. L'utilisation simultanée de ces différentes solutions a permis des gains importants en terme de compacité et de coût.

Plusieurs pistes sont explorées par différentes équipes dans le monde (le CPES aux US et l'Université de Delft en Hollande [2], le GdR SEEDS/ISP3D en France [3], ...) afin de mener à bien cette intégration. Plus récemment des projets complètent ces études notamment les projets FEMINA et EPATH financés par la FRAE. Les moyens mis en œuvre sont différents mais tous convergent vers les mêmes principes de base.

## 1) Multifonctionnalité des matériaux et des fonctions

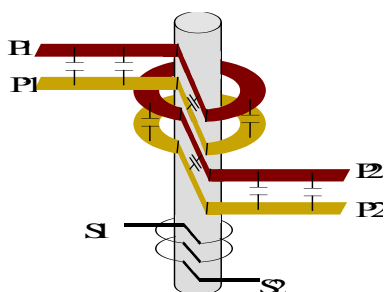
La réalisation de systèmes d'électronique de puissance nécessite la mise en œuvre de matériaux

divers, magnétique, diélectrique, conducteur, semi-conducteur. Pour autant, si cette réalisation s'effectue avec un souci de forte intégration, il est important de voir que le concepteur ne pourra pas se contenter de regarder les caractéristiques principales de chaque matériau mais devra essayer de coupler plusieurs propriétés afin d'assurer une meilleure compacité de l'ensemble. Par exemple les propriétés mécaniques ou thermiques d'un matériau diélectrique peuvent être exploitées pour réaliser un transfert de chaleur ou assurer une tenue mécanique à un PCB (Printed Circuit Board). Il en va de même avec les matériaux magnétiques pouvant être tour à tour conducteur, refroidisseur ou support. Cette approche ne doit pas être limitée aux seuls matériaux et doit s'étendre aux fonctions réalisées. Un bobinage peut par exemple servir simultanément à la réalisation d'une inductance et d'un condensateur. C'est cette technique qui est développée dans les composants LCT pour lesquels les effets magnétiques et diélectriques sont créés par des bobinages réalisés sur des supports présentant des caractéristiques diélectriques intéressantes tels que les films HK04 de Dupont ou C-Ply de 3M afin de créer C (Tableau 1).

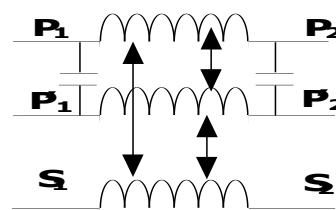
	Epaisseur d'isolant (μm)	Epaisseur de cuivre (μm)	Rigidité diélectrique	Facteur de dissipation	Permittivité relative	Capacité surfacique (nF/cm <sup>2</sup> )
Dupont HK04	25	18 à 72	6 à 7kV	0,003 (1MHz)	3,5	0,12
3M C-Ply	16	35	100V	0,006 (1kHz)	16	0,9

**Tableau 1:** Caractéristiques des nouveaux matériaux disponibles pour l'intégration des capacités dans les circuits imprimés.

La disposition du bobinage secondaire permet ensuite de régler les fuites et donc la valeur de L enfin les nombres de spires règlent le rapport de transformation de T (Fig. 6 et Fig. 12).



**Fig. 6:** Principe du LCT. Deux primaires isolés par un matériau à fort diélectrique sont bobinés sur un même noyau magnétique.



**Fig. 7:** Modélisation associée au LCT

## 2) Fabrication collective

La fabrication collective et simultanée des composants et de leurs interconnexions permettra à l'intégration de s'imposer en proposant des coûts de réalisation attractifs. Malgré tout, cela va nécessiter une très bonne connaissance des procédés mis en œuvre et de leurs enchaînements afin de contrôler la qualité et la fiabilité de la fonction réalisée.

Deux familles d'intégrations existent : hybride et monolithique, faisant référence non seulement à des puissances des convertisseurs réalisés différentes, mais aussi à des techniques de fabrication différentes. L'intégration hybride, en permettant d'associer différents matériaux par un procédé commun dans des objets en trois dimensions, permet la réalisation de convertisseurs de puissance moyenne ou forte puissance (Figure 8).

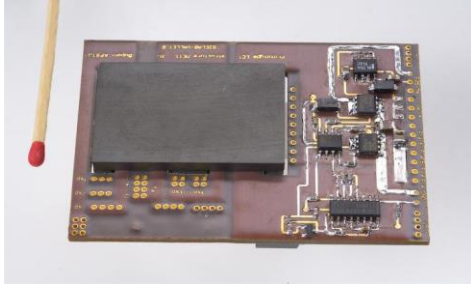


Fig. 8: Alimentation 250kHz, 60W 10V/6A à commutation douce intégrant un LCT réalisé sur circuit HK04 24 couches (G2ELab 2007).

Plusieurs techniques permettent d'accéder à cette intégration où les contraintes liées aux pertes et à leur évacuation vont guider le concepteur.

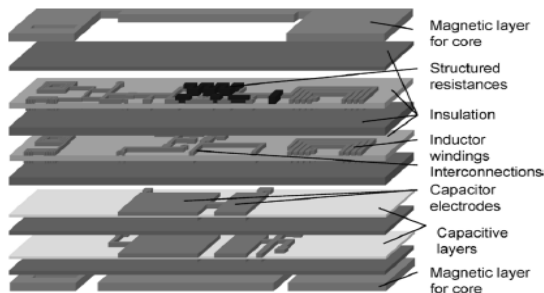


Fig. 9: Exemple d'intégration hybride d'un convertisseur proposée par l'équipe du Pr J.A. FERREIRA Université de Delft Pays-Bas [4]

#### IV. LE MANAGEMENT THERMIQUE

Les objectifs du refroidissement des électroniques sont :

- de maintenir la température des composants en dessous de leur température limite de fonctionnement,
- de limiter les gradients thermiques (éviter les dilatations différentielles),
- d'atteindre les objectifs de fiabilité en optimisant les masses et les volumes.

Deux voies complémentaires doivent permettre d'atteindre ces objectifs :

- diminuer les pertes en améliorant les rendements sur les Electroniques de Puissance

(EP). Actuellement les rendements des EP sont de l'ordre de 95%.

- augmenter la puissance dissipable pour réduire le volume du convertisseur.

La puissance dissipable peut être augmentée de diverses façons. Par exemple, l'utilisation des composants « haute température » en SiC ou GaN qui peuvent fonctionner à des températures bien plus élevées que les composants classiques à base de silicium, permet d'augmenter la température de jonction maximale et donc la puissance dissipable. L'autre solution est d'améliorer le transfert de chaleur entre le composant actif et le milieu ambiant. Le texte qui suit permet d'identifier les contraintes apportées par les composants actifs et de montrer de nombreuses solutions envisageables dans ce contexte.

#### 1) Particularité des composants actifs de puissance

Les composants actifs de puissance ont une structure verticale : le courant les traverse toujours dans le sens de l'épaisseur lorsqu'ils conduisent (Figure 10).

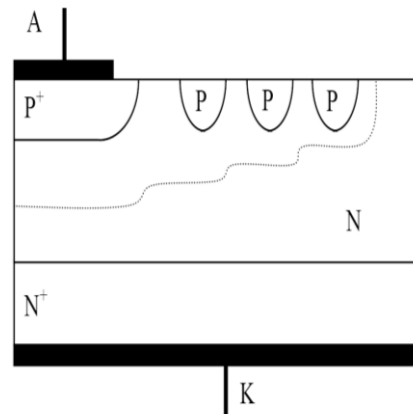


Fig. 10: Structure d'une diode de puissance avec des anneaux de garde [5]

Ils ont donc obligatoirement au moins une électrode sur chaque face. L'évacuation des pertes ne pouvant se faire que par au moins une des faces de la puce, il faudra que cette (ces) face(s) serve(nt) à la fois de contact électrique et de contact thermique.

En conséquence, une isolation électrique est nécessaire avec le système de refroidissement soit au niveau du substrat (modules de puissance) soit au niveau du liquide de refroidissement (press-pack). Mais ces deux solutions apportent des problèmes thermiques :

1. dans les modules, l'isolant doit être un très bon conducteur thermique et garantir une bonne fiabilité face aux contraintes thermomécaniques
2. dans les press-pack, la résistance thermique de contact entre puce et substrat est assez importante et la mise en œuvre par pression reste assez complexe. De plus cette technique exige un entretien régulier pour vérifier les bons niveaux de pression.

Cela fait naître une problématique importante de gestion du contact électro-thermo-mécanique (ETM) entre la puce et le substrat qui doit comporter des résistances électriques et thermiques les plus faibles possibles et qui garantissent un maintien pérenne de la puce dans le temps. Actuellement, ce contact est pris en compte au niveau de l'encapsulation de la puce lors de la conception du module. D'autre part, même si ceci n'est encore qu'au stade des études de laboratoire, l'amélioration du contact ETM peut également passer par une remise en cause de la géométrie actuelle des puces de puissance. Pour exemple, la figure 11 présente un composant IGBT pour lequel la métallisation d'émetteur a été conçue afin d'être associée à une électrode massive permettant par la suite de faire un refroidissement double-face.

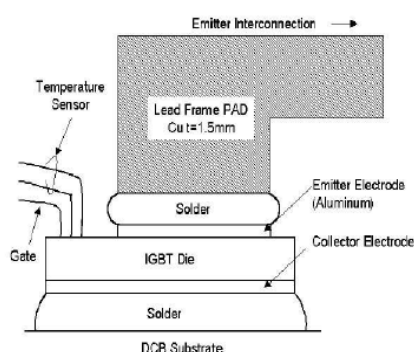


Fig. 11: IGBT avec un lead frame [6]

## 2) Vers une meilleure gestion thermique des modules de puissance

Au niveau du contact puce-substrat :

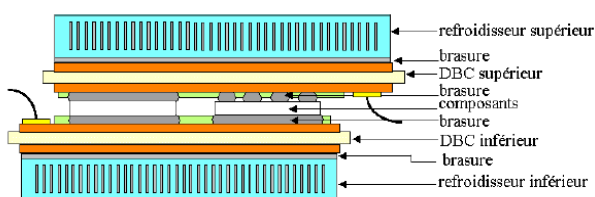


Fig. 12: Utilisation de bumps [7]

Pour améliorer le refroidissement d'un composant, l'idéal est de pouvoir extraire la chaleur sur la plus grande surface possible donc par ses deux faces. Comme nous l'avons dit plus haut, le challenge consiste donc à isoler électriquement les électrodes du système de refroidissement tout en gardant un accès à toutes les électrodes en surface des composants (électrodes de commande et de puissance). De nombreuses solutions ont été ou sont étudiées. La figure 12 présente une solution aujourd'hui industrialisée : les bumps.

Au niveau du substrat :

On essaye en général de placer un substrat très bon conducteur de la chaleur entre la puce et le liquide de refroidissement. Outre l'isolation électrique qu'il doit réaliser dans certain cas, ce dernier permet d'épanouir le flux de chaleur afin de limiter le gradient de température dû à l'échange convectif avec le fluide de refroidissement. Des travaux sont menés pour réaliser des diffuseurs thermiques ayant à la fois une bonne conductivité thermique et des CTE (coefficient of thermal expansion) proches de ceux du silicium et des céramiques afin de garantir une meilleure fiabilité des systèmes. D'autre part, il est également possible d'utiliser des chambres vapeur qui sont en réalité des caloducs plats directement intégrés dans le substrat. Des études ont montré qu'il était possible de les intégrer directement dans des substrats DBC (direct bonded

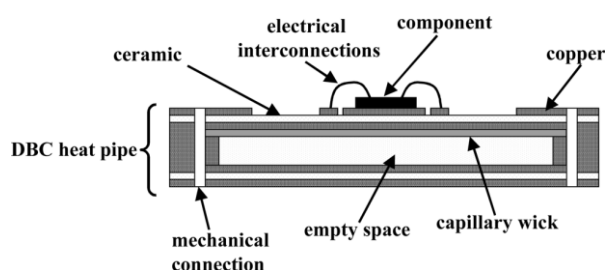


Fig.13: Caloduc intégré dans un substrat DBC [8]

copper) (Figure 13).

Pour les systèmes fonctionnant sur des régimes transitoires assez courts, il est envisagé d'utiliser des substrats comportant en leur sein des matériaux à changement de phase (des paraffines) qui peuvent absorber la chaleur pendant la phase de dissipation des composants et ainsi limiter la température.

Au niveau des interfaces :

La résistance thermique d'un boîtier dépend beaucoup des matériaux d'interface. On essaie au maximum de les diminuer.

Au niveau de l'échange convectif :

Pour améliorer l'échange convectif entre le substrat et le liquide, la solution actuelle consiste à utiliser des systèmes très efficaces comme les microcanaux, les jets ou les sprays qui sont intégrés au plus près de la puce. Dans ces solutions, le fluide n'est en général pas en contact avec le silicium mais peut l'être avec une électrode ce qui implique une isolation électrique. Dans la microélectronique, nous voyons apparaître la notion de refroidissement direct (le fluide est en contact avec le composant) mais ceci reste assez difficile à faire en électronique de puissance à cause du contact électrique qui est omniprésent sur les deux faces.



### 3) Refroidissement du module

La puissance évacuée par la semelle des modules de puissance peut être facilement de plusieurs kW. La surface nécessaire pour évacuer cette chaleur dans le milieu ambiant est donc très importante et le dissipateur ne peut pas toujours être fixé directement sur la semelle. Il est alors nécessaire d'utiliser un fluide caloporteur intermédiaire qui absorbe la chaleur (élévation de température ou changement de phase) à proximité des composants et la distribue (diminution de température ou condensation) au milieu ambiant par l'intermédiaire d'un dissipateur à ailettes.

La mise en mouvement du fluide est en général effectuée par une pompe qui peut poser des problèmes de fiabilité, de maintenance et de bruit. On préfère alors très souvent utiliser des systèmes passifs comme les caloducs.

Malheureusement, ces derniers fonctionnent très difficilement contre la gravité (source chaude en dessus de la source froide), la distance entre évaporateur et condenseur est limitée à une longueur de l'ordre du mètre et ils ne sont pas souples ce qui pose des problèmes pour l'intégration dans certains systèmes.

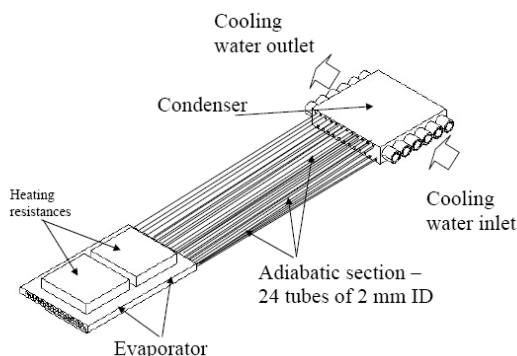


Fig. 14: Caloduc pulsé (M. Vassilev et coll.) [9]

Pour résoudre ces défauts, on parle aujourd'hui de caloducs pulsés (Figure 14) qui offrent un meilleur comportement contre la gravité et sont plus souples, mais leur fonctionnement se révèle très difficile à modéliser. Leur utilisation passe par un prototypage préalable.

Enfin, la technique la plus prometteuse est la boucle à pompage capillaire (Figure 15) qui permet de travailler sur plusieurs mètres et peut fonctionner contre la gravité.

Enfin, pour rendre le fonctionnement à haute température possible, il est nécessaire de travailler sur les liquides à haute température. Certains auteurs présentent des circuits hydrauliques avec des fluides métalliques (alliage gallium-indium) ce qui apporte l'avantage supplémentaire d'augmenter les coefficients d'échange [11].

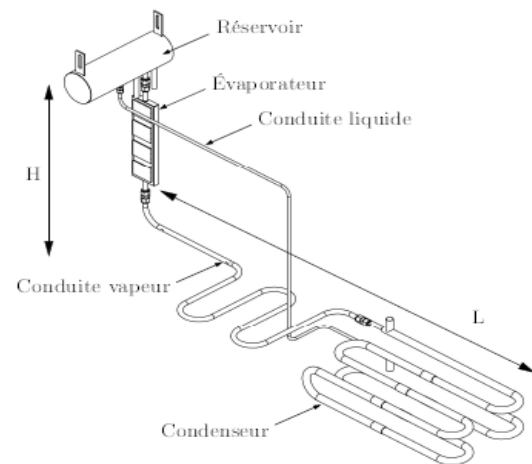


Fig. 15: Principe d'une boucle à pompage capillaire [10]

## V. CONCLUSION

L'intégration des électroniques de puissance dans le cadre de l'avion plus électrique a pour objectif de diminuer le volume, la masse et la fiabilité de ces systèmes. Cette intégration passe par la prise en compte de critères multiples (CEM, mécanique, connectique, thermique). Comme nous l'avons vu, plusieurs voies sont aujourd'hui à l'étude :

- l'intégration du driver,
- l'amélioration de la connectique,
- l'utilisation de composants semi-conducteurs haute température,
- l'amélioration des passifs (couplage des phénomènes physiques mais aussi utilisation de nouveaux matériaux permettant de travailler à température et fréquence plus importante),
- l'amélioration des transferts de chaleur dans les modules,
- l'utilisation de boucles de refroidissement plus fiables.

Ainsi, l'électronique de puissance est devenue encore plus un sujet pluridisciplinaire. La recherche sur ce domaine demande donc une forte coordination pour arriver à des progrès significatifs et s'appuie aujourd'hui sur des plateformes technologiques ou des projets de recherche multi-pluridisciplinaires.

## REFERENCES

- [1] B. Boursat, « Comprendre les problèmes de procédé de l'électronique de puissance », Alstom PEARL, Janvier 2006.
- [2] I.W. Hofstajer, J-A. Ferreira, J-A., J-D. van Wyk, « Design and analysis of planar integrated L-C-T components for converters », *IEEE Transactions on Power Electronics*, Nov 2000.

- [3] F. Forest, T.A. Meynard, E. Labouré, V. Costan, E. Sarraute, A. Cunière, T. Martiré, « Optimization of the Supply Voltage System in Interleaved Converters Using Intercell Transformers », *IEEE-Transactions-on-Power-Electronics*, May 2007; 22(3): 934-42
- [4] E. Waffenschmidt, B. Ackermann; J.A. Ferreira, « Design Method and Material Technologies for Passive in Pinned Circuit Board Embedded Circuits », *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 20, no 3, MAY 2005
- [5] H. Garrab, « Contribution à la modélisation électro-thermique de la cellule de commutation MOSFET », Thèse INSA de Lyon, 2005.
- [6] S. Zhao, J. Sin, « Double-side packaged high power IGBTs for improved thermal and switching characteristics », *Congrès ISPSD*, 22-25 mai, Toulouse, 2000.
- [7] C. Gillot, C. Schaeffer, C. Massit, L. Meysenc, « Double-sided cooling for high power IGBT modules using flip chip technology », *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 24, pp. 698-704, 2001.
- [8] M. Ivanova, Y. Avenas, C. Schaeffer, J-B. Dezord, J. Schulz-Harder, « Heat Pipe Integrated in Direct Bonded Copper (DBC) Technology for Cooling of Power Electronics Packaging », *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 21, pp. 1541-1547, 2006.
- [9] M. Vassilev, Y. Avenas, C. Schaeffer, J.L. Schanen, « Experimental Study of a Pulsating Heat Pipe with Combined Circular and Square Section Channels », *42d annual Industry Applications Society Meeting and Conference*, New Orleans, USA, Sept. 23-27, 2007.
- [10] D. Lossouarn, « Etude théorique et expérimentale du refroidissement diphasique à pompage capillaire de convertisseurs de puissance à haute densité de flux de chaleur pour la traction ferroviaire », thèse de l'Université de Poitiers, 2008.
- [11] Ghoshal U., Grimm D., Ibrani S., Johnston C., Miner A., "High-Performance Liquid Metal Cooling Loop", 21st IEEE SEMI-THERM Symposium, 2005.

# RFID : Etude de la localisation des outillages mobiles par la RFID

Mélanie FIDELIN, Pascal SANSEN

ESIEE-Amiens, 14 quai de la Somme  
80082 AMIENS

**Résumé :** La technologie RFID, née il y a environ 70 ans pour usage militaire, est actuellement en pleine expansion dans de nombreux domaines, notamment pour répondre à la problématique de traçabilité de plus en plus présente dans l'industrie. Mais il est également possible de l'utiliser dans une problématique de localisation d'objet. C'est de ce point que traite particulièrement l'article. En effet, même s'il existe la technologie GPS pour résoudre des problèmes de localisation, le fait d'utiliser la RFID offre l'avantage de répondre en même temps au besoin de traçabilité, car la technologie RFID a la capacité de stocker des données.

## 1. Introduction

Dans le monde industriel, les outillages sont présents en grand nombre et il en existe de nombreuses variétés différentes. Ce sont des ensembles mécaniques qui permettent aux ouvriers d'effectuer leur travail. Ces outillages sont présents dans de nombreux secteurs d'activité différents, et interviennent de l'extraction de matières premières jusqu'à la finition de produits finis, et même dans la phase d'emballage et d'expédition de ces produits. Ces outillages se décomposent en deux groupes principaux :

Les outillages fixes : ils restent constamment en place, comme les bâtis de soutien de pièces à assembler, les convoyeurs qui permettent de faire passer les pièces en cours de fabrication d'un poste à l'autre, les chaudrons de fusion de métaux, ...

Les outillages mobiles : ils peuvent être utilisés sur différents postes, comme des chariots de transport, des moules pour pièces en composite, des échelles, ...

De plus, il faut bien voir que dans l'industrie, les bâtiments peuvent avoir des tailles considérables. Il n'est pas rare qu'ils atteignent des superficies de milliers de mètres carrés et que des entreprises soient composées de plusieurs bâtiments de cette taille. Il est donc facile de s'imaginer qu'il arrive que des outillages mobiles soient parfois égarés, voire perdus. En effet, les outillages mobiles peuvent avoir différentes tailles, mais même lorsqu'ils font des dimensions de deux mètres sur trois, par exemple, ils peuvent être difficiles à retrouver dans des bâtiments tels que ceux évoqués ci-dessus. Etant donné que ces outillages sont mobiles, il peut

arriver qu'un ouvrier en déplace un sans prévenir et oublie de le remettre à sa place.

Il est donc important de pouvoir les retrouver rapidement en cas de besoin. Ceci étant d'autant plus vrai lorsqu'il s'agit d'outillages de petite taille. En effet, tout le temps qu'un ouvrier passe à chercher un outillage est du temps qu'il perd pour la réalisation de son travail. Cela fait donc perdre de l'argent à l'entreprise, et elle en perd encore plus dans le cas où l'outillage n'est pas retrouvé et où il faut en commander ou fabriquer un nouveau.

Il y a également une autre problématique qui se pose de plus en plus dans le monde industriel, celle de la traçabilité, et entre autres celle des outillages utilisés dans la réalisation de l'activité de l'entreprise. En effet, on veut pouvoir connaître toute la vie de l'outillage, de sa fabrication jusqu'à sa fin de vie, en passant par toutes les étapes de maintenance qu'il aura subies.

Pour cela, il faut trouver un moyen de stocker des données concernant l'outillage. On a d'abord utilisé le code à barre pour cette problématique de traçabilité, mais il s'avère limité dans le nombre d'informations qu'il comporte. On a alors créé des codes à barre en 2D, mais le nombre d'informations disponible reste encore limité, et ces deux types de code à barre posent certains autres problèmes, comme la distance de lecture très réduite, la nécessité de propreté de l'étiquette afin d'effectuer sa lecture, ... Une nouvelle solution est donc apparue sur le marché, celle de la technologie RFID.

## 2. La technologie RFID

La RFID (Radio Fréquence Identification) est une technologie qui fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, tant dans le monde industriel que dans le monde académique, sa mise en place est, en effet, actuellement en pleine expansion dans le monde industriel.

L'origine de cette technologie remonte à la seconde guerre mondiale, lors de laquelle elle était utilisée pour différencier les avions alliés des autres. Les avions alliés, pourvus de tags RFID, apparaissaient « amicaux » lors de l'interception radar. Le contrôle aérien est toujours, à l'heure actuelle, basé sur ce principe. La technologie RFID est restée à usage uniquement militaire jusqu'au début des années 80, où l'invention de microsystèmes et les avancées technologiques ont permis l'utilisation de tag passif dans le secteur privé. Sa première utilisation européenne sera l'identification du bétail. Les années 90 marquent le début de la standardisation du système RFID, dans le but d'obtenir une interopérabilité des équipements, en commençant par les cartes à puces, puis les systèmes étiquettes-lecteurs en général. Enfin, depuis 2000, beaucoup de tests ont été effectués pour déployer cette technologie à grande échelle, que ce soit dans le domaine de la distribution ou de l'industrie.

De nos jours, son utilisation est très diversifiée. Elle est utilisée dans le domaine de la distribution, pour le suivi de la chaîne de froid des aliments, ou la traçabilité de la viande et du poisson, mais aussi pour la gestion des stocks et de l'approvisionnement en magasin. Dans le domaine de la logistique, ce système est également utilisé pour la gestion de stock et le suivi de la chaîne complète d'approvisionnement. Le « grand public » peut retrouver ce système sur les produits qu'il achète, tels que les vêtements, les CD et DVD, il sert à ce moment de référence pour le magasin et de système antivol, ou bien sur ses animaux de compagnie. C'est, en effet, une puce RFID qui est implantée sous la peau pour remplacer le tatouage. Deux autres utilisations de la technologie sans contact, RFID, sont les pass autoroutiers du télépéage, ou le pass Navigo de la RATP.

Comme le montrent les exemples précédents, le système RFID offre de multiples possibilités d'utilisation. Cela est dû notamment au fait qu'il y ait deux types de tags, les tags passifs et les tags actifs. Mais avant d'expliquer la différence entre ces deux types d'étiquettes, rappelons le fonctionnement de cette technologie. Tout d'abord, le système fonctionne à partir

de fréquences radio sur la plage allant de 30 kHz à 30 GHz et se classe selon trois catégories principales :

- Les Basses Fréquences BF : 30 kHz à 300 kHz
- Les Hautes Fréquences HF : 3 MHz à 30 MHz
- Les Ultra Hautes Fréquences UHF : 300 MHz à 3 GHz

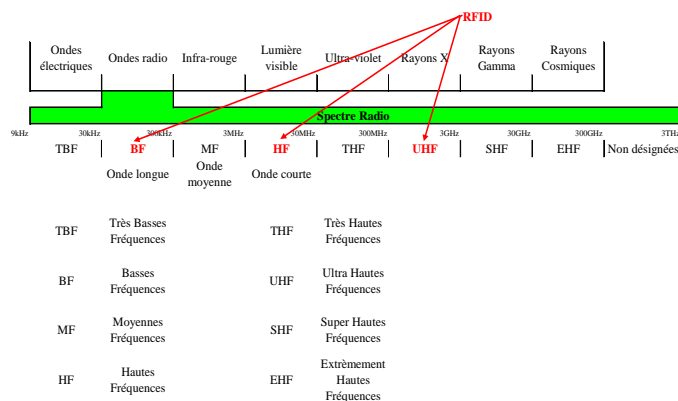


Figure 1 : Fréquences dédiées à la RFID

L'une des différences entre les tags passifs et actifs est la plage de fréquences utilisée. Les étiquettes passives fonctionnent principalement en BF et HF, alors que les tags actifs eux fonctionnent principalement en UHF. Le principe de fonctionnement d'une puce RFID est schématisé sur la Figure 2.

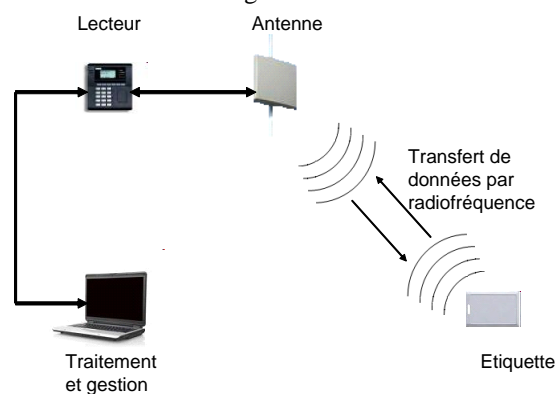


Figure 2 : Réseau complet d'un système RFID

Le système complet est donc composé d'un lecteur, qui, par le biais d'une antenne, émet un signal radio, celui-ci est reçu par l'étiquette, qui lui répond. L'information récupérée par le lecteur est ensuite renvoyée au logiciel qui va traiter et gérer l'information. Le transfert de données entre le lecteur et le tag peut se faire de deux manières, correspondant aux deux types de tag, soit de façon inductive ou magnétique, soit de façon radiative ou électromagnétique. Le couplage inductif correspond aux étiquettes passives, alors que le couplage radiatif correspond aux étiquettes actives. Le tableau 1 présente les principales différences qui existent entre les tags passifs et actifs.



	Tag actif	Tag passif
Alimentation	Batterie interne	Sans batterie
Type de couplage	Radiatif	Inductif
Fréquences utilisées	UHF principalement	BF et HF principalement
Portée	10 à 100 m	0 à 1,5 m
Fonction de décroissance du champ	1/d	1/d <sup>3</sup>
Fonction de perte d'énergie	1/d <sup>2</sup>	1/d <sup>6</sup>

Tableau 1 : Différences entre les tags actifs et passifs

Le choix du tag à utiliser doit donc se baser sur les distances de détections, les vitesses de détection, ainsi que l'utilisation qui en est faite. Dans notre cas, nous avons trois fonctions principales à réaliser : identifier un objet, stocker et gérer des données lui étant propres et localiser le dit objet. Or actuellement, le stockage de données et la localisation d'objets ou produits sont faits par des systèmes différents. En effet, le stockage et la gestion de données sont réalisés par l'utilisation de puces RFID, alors que la localisation d'objets est prise en charge par d'autres technologies, telles que le Wifi, le GPS, ...

Le but final de cette étude est donc de pouvoir à terme utiliser uniquement un système RFID pour effectuer ces deux fonctions. Ceci bien entendu, dans le cas où la localisation d'un objet ne nécessite pas une très grande précision.

Le paragraphe suivant précise le principe de fonctionnement d'une puce RFID active, tandis que le quatrième expose, lui, le principe utilisé pour pouvoir faire de la localisation grâce à une puce RFID active.

### 3. Principe de fonctionnement d'une puce RFID active

Nous avons vu précédemment qu'une étiquette active fonctionne en mode radiatif, c'est-à-dire que les ondes émises sont des ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques sont composées d'un champ électrique oscillant transversalement et d'un champ magnétique oscillant aussi transversalement, à la même fréquence, mais dans une direction d'oscillation perpendiculaire, comme le montre la Figure 3.

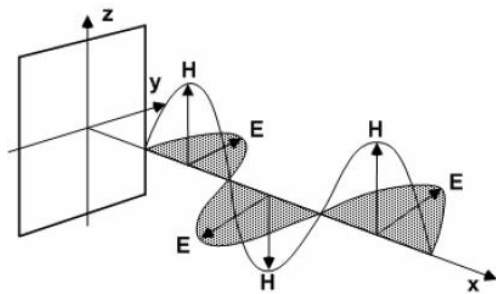


Figure 3 : Direction d'oscillation des champs électrique et magnétique

Les équations qui régissent ces ondes sont les équations de Maxwell généralisées :

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (3.2)$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (3.3)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

$\vec{E}$  est le champ électrique (V/m),  $\vec{B}$  est l'induction magnétique (T),  $\vec{H}$  est le champ magnétique (A/m),  $\vec{D}$  est le déplacement électrique,  $\vec{J}$  est la densité de courant et  $\rho$  est la charge volumique (C/m<sup>3</sup>).

Ces lois sont complétées par les relations matérielles magnétique, électrocinétique et diélectrique suivantes :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.7)$$

$\mu$ ,  $\sigma$  et  $\varepsilon$  sont respectivement la perméabilité (H/m), la conductivité (S/m) et la permittivité (F/m) du milieu.

Dans le cas des puces RFID, les ondes se propagent dans l'air, que l'on peut assimiler à un milieu linéaire, homogène et isotrope. Pour connaître les valeurs des constantes  $\mu$  et  $\varepsilon$ , il faut multiplier les constantes relatives à l'air par celles du vide, on a donc les relations suivantes :

$$\varepsilon = \varepsilon_r * \varepsilon_0 \quad (3.8)$$

$$\mu = \mu_r * \mu_0 \quad (3.9)$$

Où les constantes d'indice  $r$  sont les valeurs des constantes relatives au milieu, alors que celles d'indice 0 sont celles des mêmes constantes dans le vide. Or dans le cas de l'air, les constantes  $\mu_r$  et  $\varepsilon_r$  sont égales à 1. On remplace donc  $\mu$  et  $\varepsilon$  par  $\mu_0$  et  $\varepsilon_0$  dans les équations. De plus, on remplace aussi  $\vec{D}$  par  $\vec{E}$  en utilisant la relation 3.7. On obtient donc :

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.10)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.12)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.13)$$

On utilisera par la suite uniquement les équations 3.12 et 3.13. De plus, lorsqu'une onde électromagnétique est éloignée de sa source d'émission, on peut considérer que la densité de courant de la source n'a plus d'influence sur l'onde. Le terme en  $\vec{J}$  disparaît donc de l'équation 3.13.

Plaçons les champs magnétique et électrique dans un repère orthonormé euclidien  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  appartenant à  $\mathbb{R}^3$ , tels que :

$$\vec{H}(0,0,H) = \frac{B}{\mu_0} \cdot \vec{k} \quad \text{et} \quad \vec{E}(0,E,0) = E \cdot \vec{j}$$

**Remarque :** Ne pas oublier que dans ce qui suit  $H$  est la composante sur  $\vec{z}$  de  $\vec{H}$  et  $E$  celle de  $\vec{E}$  sur  $\vec{y}$ .

Lorsque l'on calcule les équations 3.12 et 3.13 en tenant compte de ce qui précède, on obtient :

$$\text{rot} \vec{E} = \frac{\partial E}{\partial x} \cdot \vec{z} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \text{et} \quad \text{rot} \vec{H} = -\frac{\partial H}{\partial x} \cdot \vec{j} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \cdot \vec{j}$$

Donc on a :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\mu_0 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} \quad \text{et} \quad -\frac{\partial H}{\partial x} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \Rightarrow -\frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

Par identification, on trouve l'équation de propagation du champ électrique dans l'air :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = 0 \quad (3.14)$$

De la même façon, on trouve l'équation de propagation du champ magnétique dans l'air :

$$\frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = 0 \quad (3.15)$$

Ces ondes se propagent à la vitesse  $v$ , telle que :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \mu_r \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \quad (3.16)$$

Où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

Les équations 3.14 et 3.15 ont pour solutions particulières, les fonctions suivantes :

$$\begin{cases} E(x, t) = E \sin(kx - \omega t) \\ B(x, t) = B \sin(kx - \omega t) \end{cases}$$

Où  $E$  et  $B$  sont les amplitudes maximales de leur fonction respective,  $\omega$  est la pulsation de l'onde et  $k$  est le nombre d'onde, tel que :

$$k = \frac{\omega}{c}$$

On constate donc que dans le cas d'un besoin de lecture à grande distance, les puces actives sont toutes indiquées, ce qui est le cas lorsque l'on souhaite faire de la localisation d'un objet portant la technologie RFID.

#### 4. Principe utilisé pour la localisation d'un outillage mobile

Comme indiqué précédemment, on peut avoir besoin de localiser un outillage mobile dans un atelier, s'il ne se trouve pas à sa place habituelle par exemple. Pour le localiser, on va utiliser une méthode de triangulation, c'est-à-dire que l'intersection des trois signaux nous donnera la position de l'objet. En effet, on a vu précédemment que les lecteurs RFID émettent des ondes électromagnétiques, or les antennes isotropiques émettent un champ magnétique identique sur une sphère centrée sur elles-mêmes, c'est-à-dire que le signal émis est identique, à une distance donnée de l'antenne,

quelque soit la position angulaire dans laquelle on se trouve, comme le montre la Figure 4.

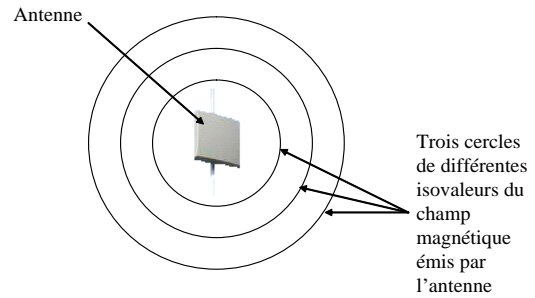


Figure 4 : Forme du signal magnétique émis par une antenne

Pour réaliser la recherche par triangulation, il faut installer des antennes dans tout(s) le(s) bâtiment(s), afin d'être sûr que toute la zone soit quadrillée. On fait alors émettre un signal par toutes les antennes, et on regarde ensuite quelles sont les antennes qui reçoivent les signaux de réponse les plus forts. Pour évaluer la distance entre l'antenne et l'objet on utilise la puissance reçue  $P_r$  (en dBm) qui correspond au passage en dB, de la puissance mesurée en mW, qui s'exprime par la formule suivante :

$$P_r(\text{dBm}) = 10 \log_{10} P_r(\text{mesurée(mW)}) \quad (4.1)$$

Cette puissance correspond à la puissance ( $P_e$  en dBm) du signal émis par le tag, qui a perdu de la puissance lors de son transfert dans le milieu ambiant. On note  $P_p$  (dBm) cette perte de puissance et on a donc :

$$P_r = P_e - P_p \quad (4.2)$$

La perte  $P_p$  de la puissance est fonction de la distance  $d$  entre l'antenne et l'objet recherché et varie selon les caractéristiques du milieu que le signal traverse. Ces caractéristiques sont prises en compte au travers du coefficient  $n$  de propagation du signal, ainsi que par  $A$ , qui est en fait la mesure du signal de retour pris à un mètre de la source et dans des conditions idéales (sans obstacle et dans des conditions normales). Cette perte s'exprime donc par la formule qui suit :

$$P_p = 10n \log_{10} d + A \quad (4.3)$$

D'après les expressions (3.2) et (3.3), on peut dire que la puissance reçue est telle que :

$$\begin{aligned} P_r &= P_e - (10n \log_{10} d + A) \\ P_r &= P_e - 10n \log_{10} d - A \quad (4.4) \end{aligned}$$

Il en découle donc que la distance entre l'antenne, ayant reçu le signal de réponse, et l'objet recherché se calcule d'après l'équation :

$$d = 10^{\left(\frac{P_e - P_r - A}{10n}\right)} \quad (4.5)$$

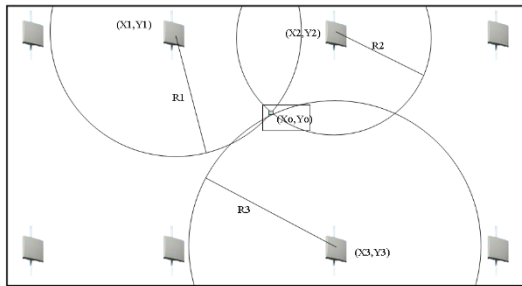
Pour trouver l'objet souhaité, on commence par prendre en compte les trois signaux de retour les plus forts, car plus le signal est fort plus l'objet recherché est proche et plus l'imprécision diminue.

On a ensuite, grâce à l'expression (4.5), trois distances  $d_i$ , qui correspondent aux rayons  $R_i$  de trois cercles, centrés sur chaque antenne prise en compte, comme le montre la Figure 5.

On associe au bâtiment, dans lequel on recherche un objet, à un plan orthonormé. On connaît donc les coordonnées  $(X_i, Y_i)$  de chaque antenne.

On note,  $(Y_o)$  les coordonnées de l'objet recherché. On obtient donc la position de l'objet, grâce au système d'équations suivant :

$$\begin{cases} (X_o - X_1)^2 + (Y_o - Y_1)^2 = R_1^2 \\ (X_o - X_2)^2 + (Y_o - Y_2)^2 = R_2^2 \\ (X_o - X_3)^2 + (Y_o - Y_3)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (4.6)$$



**Figure 5 :** Localisation d'un objet par triangulation

Cette méthode nous donne donc la position approximative de l'objet recherché, cela permet de déterminer une zone en fonction de la précision des données fournies par la technologie RFID. La personne cherchant l'objet peut ensuite se rendre dans la zone

déterminée pour trouver l'objet. Il peut éventuellement le faire à l'aide d'un lecteur mobile, en se dirigeant dans la direction de la puissance du signal la plus forte, dans le cas d'un objet petit dans une zone très encombrée, par exemple.

## 5. Conclusion

La problématique qui a mené à cette étude était donc de trouver un moyen de pouvoir identifier un outillage mobile, stocker des informations le concernant, ceci dans un souci de répondre aux besoins actuels de traçabilité, et de le localiser, dans un souci de gain de temps et donc d'argent. Et tout ceci par le biais d'une solution technique unique.

La technologie RFID convenant très bien aux deux premiers besoins et étant déjà utilisée à ces fins dans l'industrie, il semblait donc logique d'essayer de répondre au dernier besoin en utilisant également cette technologie.

On peut conclure que l'utilisation de la RFID, pour localiser un objet dans un bâtiment, est possible. De cette façon, on pourra, dès qu'on le voudra, localiser très rapidement un objet. La seule restriction étant bien sûr que l'objet se trouve dans le bâtiment dans lequel on le recherche.

Pour compléter cette étude, on pourrait lancer une nouvelle étude qui aurait pour but de contrôler les entrées et sorties d'objet, et de coupler le résultat au système présenté ci-dessus. Ainsi, on pourra commencer par vérifier si l'objet recherché est sorti du bâtiment. Cela permettrait donc de vérifier la présence de l'objet dans l'enceinte du bâtiment, avant même de lancer la recherche avec le système présenté dans cette étude pour connaître sa localisation plus précise.

## Le génie électrique en France au XXI<sup>ème</sup> siècle

**Michel AMIET**

Président du Comité Scientifique  
Concordat GENELEC

Le génie électrique français a trouvé son second souffle en 1985 avec la constitution par le ministre Monsieur Hubert Curien d'une Mission Interministérielle. Forte de 120 experts, elle a permis d'établir un bilan des moyens et des connaissances nationales dans ce domaine et de présenter les pistes d'évolution à court et moyen terme qui devaient placer notre industrie en leader européen, voire mondial.

Aujourd'hui le constat est positif, le potentiel des centres de recherche et de développement académiques et industriels, associé à un fort soutien des institutionnels a permis à la France, malgré une période difficile, de conserver une croissance de plus de 6% par an, une balance commerciale excédentaire, 900 000 salariés pour un chiffre d'affaires de 110 milliards d'euros, ce qui lui permet d'occuper une place privilégiée parmi les « grands » mondiaux de génie électrique et de l'industrie en général.

Alors que les évolutions et révolutions qui ont marquées la fin du XX<sup>ème</sup> siècle concernaient l'abandon du produit pour s'intéresser au Système, avec l'association de l'électrotechnique, de l'électronique de puissance et de l'électrochimie, le XX<sup>ème</sup> siècle est plus sensible à l'aspect environnemental, ce qui pourrait le conduire à être le siècle de l'écologie, avec la réduction des consommations d'énergie et des gaz à effet de serre, des effets de bruit et de pollution. Cette sensibilité à l'environnement profite à l'électricité avec une forte poussée de son intégration dans de nombreux domaines comme les transports, l'habitat, l'agriculture, le médical et l'industrie lourde.

Le Concordat GENELEC, est la manifestation du génie électrique en France, elle est née de la Mission interministérielle, elle présente tous les dix ans l'état de la France et les perspectives scientifiques, technologiques et industrielles. Cette année, le Concordat, 3<sup>ème</sup> du nom, a eu lieu dans les locaux de l'école d'ingénieurs ESME Sudria, elle fut organisée conjointement par la Direction Générale de l'Armement (DGA) et le Centre National de la

Recherche Scientifique (CNRS) et présidée par l'Académie des Technologies. Elle a rassemblé près de 200 représentants des institutions, des académies, et des industriels (Grands groupes comme PME).

Au cours des quarante deux exposés traitant des trois disciplines du génie électrique, une place importante a été réservée aux systèmes, aux énergies renouvelables, aux réseaux et aux matériaux.

Deux numéros de la revue 3EI vont reprendre certains de ces exposés. Qu'elle soit ici remerciée de cette initiative, car dans sa conclusion, le Président a fortement insisté sur la nécessité d'intéresser les jeunes à ce domaine. C'est un domaine interdisciplinaire, donc difficile à appréhender, mais qui offre de nombreux secteurs de débouchés et combien de satisfactions.

Que retenir de cette manifestation, en dehors de son succès ? Tout d'abord que le temps des évolutions et des révolutions est bien dépassé, par nécessité on est passé au temps des ruptures. Ruptures dans les concepts, avec comme exemple le banc mobile ECCE (Evaluation des Constituants d'une Chaîne Electrique). Ruptures dans les architectures, avec comme exemple la constitution de convertisseurs électroniques à base de « briques », éléments assemblages qui assurent fiabilité et rendement élevés. Ruptures dans les matériaux avec comme exemple le carbure de silicium (SiC) pour l'électronique, ou encore comme la supraconductivité pour les machines, les câbles et les bobines de stockage. Ruptures enfin dans l'électrochimie avec les accumulateurs à base de lithium et les supercondensateurs ou les piles à combustible.

Toutes ces ruptures permettent de répondre raisonnablement et positivement aux besoins futurs, besoins où le génie électrique est omniprésent et où la France possède un fort potentiel et un dynamisme exceptionnel. Donnons-lui les moyens d'intéresser les jeunes, de les former pour qu'elle reste une des quatre puissances industrielles dans ce domaine, la concurrence sera rude.



# Penser le long terme du secteur électrique pour réussir son efficacité énergétique

Nadia MAIZI, Vincent MAZAURIC

MINES ParisTech, Centre de Méthématiques Appliquées, 06907 Sophia Antipolis, France  
Schneider Electric, Strategy & Innovation, 38TEC, 38050 Grenoble Cedex 9, France

**Résumé :** Alors que les préoccupations liées au développement durable remettent en cause l'architecture des systèmes d'énergie, il est indispensable de reconsidérer le vecteur électrique à travers une approche intégrant toutes ses dimensions, depuis la description physique jusqu'aux enjeux stratégiques.

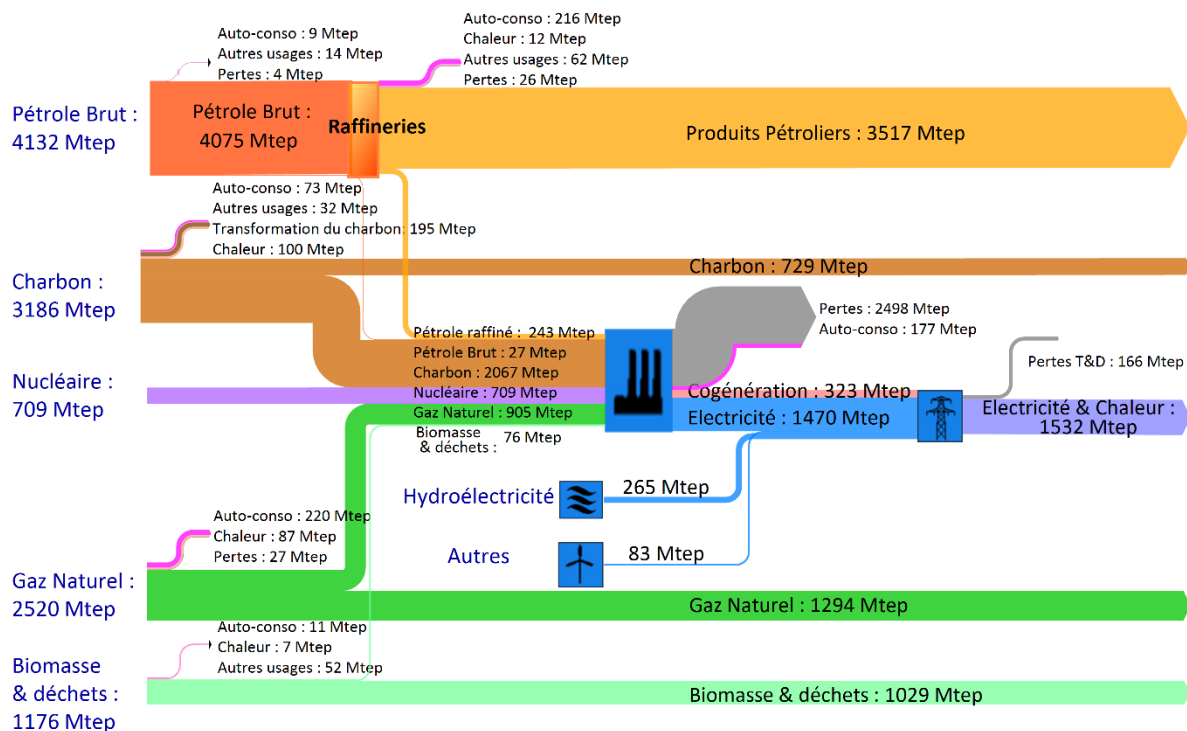
## 1. Introduction

Face à la densification de la population urbaine, la déplétion des ressources naturelles et la limitation des gaz à effets de serre, le vecteur électrique est souvent cité pour répondre conjointement aux défis énergétiques et environnementaux à venir. Néanmoins, l'exploitation actuelle de l'énergie électrique ne correspond pas à cette description puisqu'elle :

- est à l'origine de 45% des émissions de CO<sub>2</sub> mondiale (en dépit de la place singulière de la France en raison de son parc de production électro-nucléaire);

- s'accompagne d'une perte de valeur de 65% entre l'énergie primaire et l'énergie finale (figure 1), voire 75% si l'on intègre la vétusté des équipements d'usage [1].

Ces caractéristiques modestes des systèmes électriques, observées depuis les premières périodes de l'électrification pour couvrir les usages spécifiques (éclairage, contrôle, informatique, force motrice...), ne permettent pas d'envisager une simple substitution aux dépens des autres vecteurs énergétiques mais présage plutôt d'une mutation d'ampleur de l'ensemble du système énergétique pour lequel l'électricité constituerait le vecteur universel.



**Figure 1.** Chaîne de transformation de l'énergie (année 2007, compilée d'après [1]): Pour 1.470 Mtép d'énergie électrique produite mondialement, l'énergie primaire consommée est de 4.027 Mtép (on rappelle le taux de conversion de la tonne équivalent pétrole : 1Mtép =  $4,1868 \times 10^4$  TJ = 11.630 GWh).

On assisterait ainsi à une compétition pour privilégier :

- des modes de génération (par l'introduction massive d'énergies renouvelables ou décarbonées); et
- des technologies d'usage (comme le véhicule électrique);

plus respectueux de l'environnement, augmentant la chaîne de valeur des équipementiers de systèmes électriques dans toutes les directions de la chaîne énergétique.

Il s'agit ici d'introduire les éléments permettant d'évaluer un système énergétique basé sur le vecteur électrique, depuis la propriété fondamentale de réversibilité jusqu'à son évaluation technico-économique optimale.

## 2. L'électromagnétisme retrouvé

Pour décrire un système complexe dont le nombre de particules en interaction est de l'ordre du nombre d'Avogadro, on adopte une description statistique. Dans ce formalisme, l'information manquante sur un système est procurée par son entropie de Shannon  $S$  et son état d'équilibre satisfait au maximum de l'information manquante respectant la connaissance macroscopique [2], à savoir :

- l'énergie moyenne  $U$  – également appelée énergie interne – pour un système échangeant de la chaleur avec un thermostat et du travail avec l'extérieur ;
- le flux magnétique  $\Phi$  et la charge  $Q$  soutirée à la masse dans le contexte spécifique de l'électromagnétisme.

Une description équivalente consiste à décrire le système par ses variables d'état naturelles, respectivement la température  $T$  du thermostat, les courants débités par les générateurs  $I$  et le potentiel de la masse  $V_0$  (figure 2).

Le premier principe de la thermodynamique impose que la variation d'énergie interne du champ électromagnétique couplé à ses générateurs s'écrive :

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} = P_{\text{méca}} - T \frac{dS_{\text{th}}}{dt} \quad (1)$$

où :

- $E_{\text{cin}}$  désigne l'énergie cinétique acquise par les différents organes constituant le système dans le référentiel d'étude supposé galiléen ;
- $P_{\text{méca}} = \sum \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}$  correspond à la puissance mécanique reçue par le champ électromagnétique ( $\mathbf{V} = d\mathbf{x}_{dt}$  désigne la vitesse des parties mobiles des actionneurs et  $\mathbf{F}$  la force qu'ils exercent sur le champ);

- $T \frac{dS_{\text{th}}}{dt}$  désigne l'énergie que le champ électromagnétique dégrade en chaleur vers le thermostat en provoquant un accroissement de son entropie  $S_{\text{th}}$ .

Pour être complète, une approche thermodynamique doit permettre également de décrire l'évolution du système sous des variations de ses variables d'état. Afin de rester cohérent avec l'hypothèse d'information manquante maximale caractérisant les états d'équilibre, l'entropie du système isolé global ne peut que croître au cours du temps. Invariant par renversement du temps, l'effet Joule est la manifestation de l'irréversibilité dans le contexte particulier de l'électromagnétisme. Pour une transformation monotherme quelconque, on retrouve ainsi que la puissance mécanique transmise au système est supérieure à sa variation d'énergie libre  $F = U - TS$  [3]:

$$P_{\text{méca}} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} - \frac{dF}{dt} = -T \left( \frac{dS}{dt} + \frac{dS_{\text{th}}}{dt} \right) = P_{\text{Joule}} > 0 \quad (2)$$

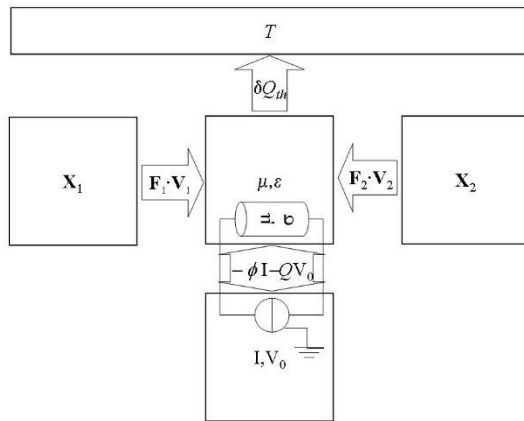
où  $P_{\text{méca}} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt}$  est la puissance mécanique opposée par le système.

Pour assurer l'évolution la plus réversible possible, une première condition d'optimalité consisterait à minimiser les pertes Joule:

$$P_{\text{méca}} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} - \frac{dF}{dt} = \min(P_{\text{Joule}}) > 0 \quad (3)$$

Cependant, la condition précédente n'est pas suffisante pour retrouver la loi de Faraday. L'expérience montre que l'on doit également tenir compte de l'inertie du champ aux variations que lui imposent ses sources (loi de Lenz) et considérer l'énergie séquestrée dans les couplages pour rechercher une condition de réversibilité. En formant l'enthalpie libre  $G = F - \Phi I - QV_0$ , on aboutit à une autre condition d'optimalité au sens de la réversibilité :

$$P_{\text{méca}} - \frac{dE_{\text{cin}}}{dt} - \frac{dG}{dt} = \min \left( P_{\text{Joule}} + \frac{d(\Phi I)}{dt} + \frac{d(QV_0)}{dt} \right) > 0 \quad (4)$$



**Figure 2.** Environnement du champ électromagnétique: la régie électrique cherche à transmettre du travail mécanique de l'actionneur  $X_1$  à l'actionneur  $X_2$ . Pour cela elle peut régler l'excitation  $I$  d'un inducteur (par exemple le rotor d'une machine). L'ensemble échange de la chaleur avec le thermostat  $T$  et des charges avec une masse au potentiel  $V_0$ . L'énergie de couplage entre le champ électromagnétique et le générateur s'écrit  $(\Phi I + QV_0)$  où  $\Phi$  est le flux magnétique et  $Q$  la charge soustraite par le système à la masse.

qui procure l'équation de Maxwell-Faraday par passage aux champs continus [4].

Ainsi, la loi de Faraday apparaît comme la conséquence locale d'une condition *globale* de réversibilité qui prolonge, par sa signification thermodynamique, les approches variationnelles plus classiques de l'électromagnétisme [5].

Parallèlement, le caractère quadratique de la fonctionnelle de puissance (4) procure un formalisme propice à l'exploitation de cette propriété de réversibilité aux différentes échelles constituant un système électrique.

### 3. Déclinaison multi-échelles

Grâce à une hypothèse de « champ moyen » [6], la condition de réversibilité (2) se décline aux différentes échelles mises en jeu par la conversion électromagnétique :

- Les phénomènes de pertes dynamiques dans les tôles magnétiques conduisent à adopter un comportement homogénéisé où la loi d'Ohm macroscopique doit être modifiée pour tenir compte de courants de Foucault microscopiques [7];
- Alors que la méthode PEEC doit être privilégiée pour la conception de connectique passive [8], la méthode des éléments finis constitue une déclinaison naturelle de la description thermodynamique pour les organes de conversion électromécanique et électromagnétique. On propose alors un critère d'erreur permettant

d'assurer une modélisation précise des courants de Foucault basée sur la conservation du flux du vecteur de Poynting [9];

- La perte d'intégrité de signal entre une commande et sa charge peut s'interpréter comme la transition d'une région de l'espace diélectrique passant d'un régime « quasi-statique magnétique » à un régime « quasi-statique électrique » lors de la montée en fréquence [10].
- Enfin la transmission de puissance à travers un réseau électrique s'explique grâce au couplage entre la source d'excitation du champ électromagnétique et le flux magnétique du système  $\Phi I$ . Sa valeur détermine la capacité du système à résister à des fluctuations de charge ou de production [11].

Ainsi le formalisme thermodynamique procure une approche « multi-échelles » où chacune des échelles contribuant à la conversion globale se consolide dans une description plus macroscopique pour aboutir à la représentation agrégée de la chaîne de domestication. L'objectif d'efficacité énergétique et de développement durable d'une solution électrique peut alors s'apprécier au regard d'exercices de prospective à long terme.

### 4. Perspectives

Sans une réelle approche globale des problèmes liés à la domestication de l'énergie et à sa disponibilité sous une forme utilisable, on assisterait à des transferts de pollution entre filières qui amoindrieraient, voire annuleraient, les gains escomptés. Pour surmonter cette difficulté, il est nécessaire d'articuler cette méthodologie autour d'une réflexion prospective de moyen et long terme. Son objectif est que l'analyse du cycle de vie des systèmes soit suffisamment consolidée pour correspondre au niveau de désagrégation technologique requis par les outils technico-économiques de planification énergétique tel que le modèle MARKAL [12-14].

On disposera ainsi d'une description énergétique complète de la chaîne de domestication de l'énergie, depuis la structure intime des matériaux jusqu'à la prise en compte des fluctuations de la demande, reposant sur une description optimale des transferts d'énergie donc propice à :

- l'optimisation des architectures sous contraintes d'exploitation et environnementales;
- la discrimination des technologies et des initiatives de recherche bénéficiant d'un levier environnemental favorable;
- l'analyse de sensibilité des scénarios prospectifs aux déterminants de l'exploitation, notamment la flexibilité de la demande;
- l'arbitrage entre la disponibilité de l'énergie électrique et l'investissement à réaliser entre, d'une part, le mix de production et, d'autre part, les

capacités de transport, de surveillance et de réserve, ainsi que la sensibilité de cet arbitrage.

## Bibliographie

- [1] *Key world energy statistics from the IEA*. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development/International Energy Agency, 2007.
- [2] E. T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics," *Physical Review*, vol. 106, pp. 620-630, 1957.
- [3] H. B. Callen, *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics*. New York, USA: John Wiley and sons, 1985.
- [4] V. Mazauric, "From thermostatics to Maxwell's equations: A variational approach of electromagnetism," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, pp. 945-948, 2004.
- [5] P. Hammond, *Energy methods in electromagnetism*. New York, USA: Clarendon, Oxford University Press, 1981.
- [6] V. Mazauric, O. Maloberti, G. Meunier, A. Kedous-Lebouc, O. Geoffroy, and Y. Rebière, "An energy-based model for dynamic hysteresis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, pp. 3766-3768, 2005.
- [7] V. Mazauric, M. Drouineau, and L. Rondot, "Assessing anomalous losses with dynamic hysteresis models," *International Journal in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 33, pp. 95-101, 2010.
- [8] J.-P. Gonnet, "Optimisation des canalisations électriques et des armoires de distribution," thèse de doctorat : Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunication, Signal. Grenoble, France: Université Joseph Fourier, 2005.
- [9] L. Rondot, V. Mazauric, and P. Wendling, "An energy-compliant magnetodynamic error criterion for eddy-current calculations," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, pp. 2353-2356, 2010.
- [10] M. Le-Bellac and J.-M. Lévy-Leblond, "Galilean electromagnetism," *Il Nuovo Cimento*, vol. 14B, pp. 217-233, 1973.
- [11] M. Drouineau, V. Mazauric, N. Maïzi, and E. Assoumou, "The cost of reliability of supply in future power systems," presented at 33rd International Association on Energy Economics, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [12] E. Assoumou, M. Bordier, G. Guerassimoff, C. Grange, N. Maïzi, "La famille MARKAL de modèles de planification énergétique : Un complément aux exercices de modélisation dans le contexte français," *Revue de l'énergie*, vol. 558, pp. 357-367, 2004.
- [13] N. Maïzi, E. Assoumou, M. Bordier, V. Mazauric, "Key features of the electricity production sector through long-term planning: The french case," présenté à l'IEEE PES Power Systems Conference and Exhibition, Atlanta, GA, USA, 2006.
- [14] S. Selosse, E. Assoumou, N. Maïzi, V. Mazauric, "Post-Kyoto policy implications on the energy system: A TIAM-FR long term planning exercise" présenté au 21<sup>e</sup> World Energy Congress, Montréal, Canada, 2010.



# MACHINES AC : conséquences de nouvelles conceptions sur le bruit d'origine magnétique

R. ROMARY<sup>1</sup>, J.F. BRUDNY<sup>1</sup>, B. CASSORET<sup>1</sup>, J.P. LECOINTE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France – U Artois, LSEE, F-62400 Béthune, France.

**Résumé :** Les normes acoustiques, de plus en plus restrictives, ont amené une contrainte supplémentaire pour les concepteurs et utilisateurs de machines électriques. Parallèlement, la tendance à augmenter la puissance massique des machines électriques a conduit à accroître, potentiellement, les possibilités d'une machine à être bruyante. Il s'avère donc nécessaire de trouver un compromis qui repose, entre autres, sur la connaissance des phénomènes sources de bruit. Cette présentation traite du bruit émis par les machines électriques directement connectées au réseau ou par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. L'accent sera plus particulièrement mis sur le bruit d'origine magnétique en illustrant, à l'aide de relevés expérimentaux, les signatures caractéristiques selon le phénomène à l'origine d'émissions sonores importantes.

## 1 Introduction

Une attention grandissante est portée sur les bruits et vibrations des machines électriques tournantes à courants alternatifs. En effet, les normes acoustiques sont de plus en plus drastiques et les techniques de conception actuelles d'un moteur requièrent de bien maîtriser les phénomènes responsables des bruits, qu'ils soient d'origines aérodynamique, mécanique ou magnétique [FIN]. Plus particulièrement, le bruit d'origine magnétique peut être gênant, notamment pour des applications relatives aux transports (avionique, automobile). En effet, la tendance à augmenter, à dimensions extérieures données, la puissance des actionneurs conduit, naturellement, à accroître le nombre des fréquences naturelles de l'enveloppe extérieure de la machine et donc ses possibilités à émettre un bruit important. Harmoniques générés par la denture, excentricité éventuelle et saturation des circuits magnétiques sont à l'origine du bruit magnétique des machines directement connectées au réseau [TIM], [JOR]. S'y ajoute, pour les machines fonctionnant en vitesse variable, le bruit généré par les harmoniques de courant présents dans les enroulements de la machine.

Dans cet article, les différentes causes qui sont à l'origine de bruit sont tout d'abord présentées ainsi que des spectres vibratoires et acoustiques typiques. Les relations qui permettent de caractériser le bruit d'origine magnétique sont ensuite exposées. L'analyse qui permet de distinguer les paramètres influençant ce bruit est alors développée en considérant diverses machines : machine asynchrone triphasée en l'absence puis en présence de saturation, machine à réluctance variable et machine synchro-réluctante à aimants. La dernière partie de cet article concerne diverses méthodes développées pour atténuer le bruit d'origine magnétique.

## 2. Sources et distinction des bruits

### 2.1. Sources de Bruit.

On distingue principalement trois sources de bruit.

- Le bruit d'origine mécanique provient essentiellement des paliers [BON]. Il existe donc pour tous types de machines tournantes, sauf pour celles équipées de paliers magnétiques. Pour les paliers lisses, le niveau de bruit mécanique, lié à la friction, est très faible et donc négligeable. Pour les paliers à roulements, le bruit est attribué aux résonances de la bague externe, il s'amplifie quand apparaît un certain degré d'usure (écaillage) qui conduit à des chocs mécaniques à l'origine de vibrations. De manière générale, le bruit d'origine mécanique croît avec le carré de la vitesse.

- Le bruit d'origine aérodynamique est souvent plus élevé que celui d'origine mécanique. Il résulte de turbulences de l'air produites par les pièces en rotation. Le ventilateur est la principale source de ce bruit mais il y en a d'autres, comme les extrémités des barres dans les machines asynchrones à cage ou les événements de ventilation. L'obstruction des flux d'air conduit à une amplification de ce bruit. La ventilation des machines électriques permet leur refroidissement par convection, cela conduit à une réduction de leurs tailles mais les machines deviennent plus bruyantes, d'où la nécessité de définir un compromis. Le bruit aérodynamique augmente avec la puissance 5 de la vitesse : un bruit de ventilation de 80dB à 1000tr/mn passe à 104dB à 3000tr/mn.

- Le niveau de bruit magnétique est variable car il dépend de la conception de la machine, de la charge, de la vitesse et de l'alimentation électrique.

Pour les machines à faible vitesse de rotation, le bruit magnétique est presque toujours prédominant. Ce bruit est généré par les forces électromagnétiques qui existent entre le stator et le rotor et qui ont tendance à rapprocher ces deux structures à l'image d'un électro-aimant. Cela conduit à des déformations spatio-temporelles de l'enveloppe extérieure du stator. Ces dernières provoquent des variations de pression de l'air en contact avec la machine dont la propagation est source de bruit. Lorsque les fréquences des forces sont proches d'une fréquence de résonance mécanique de l'enveloppe extérieure de la machine, il se produit une amplification des vibrations et donc du bruit émis.

## 2.2. Différenciation des types de bruit

Les relevés qui suivent sont obtenus en utilisant un analyseur de spectres qui effectue la FFT des signaux appliqués à ses bornes et qui proviennent :

- d'un microphone situé à 1m de la surface de la machine placée dans une chambre semi anéchoïque,
- d'un accéléromètre qui caractérise les vibrations du stator ; le passage à l'amplitude des déformations s'obtient en intégrant deux fois le signal d'origine par rapport au temps.

La fig. 1 présente la chambre semi-anéchoïque (fig. 1a), la machine avec ses capteurs (fig. 1b) et le système d'exploitation des informations prélevées (fig. 1c) qui se trouve à l'extérieur de la chambre.



Figure 1 : Dispositif expérimental

Le cas analysé est celui d'une machine asynchrone monophasée à cage de 650W typiquement utilisée dans les lave-linge. Deux types de spectres sont présentés lors d'un fonctionnement à vide : ceux obtenus lors d'une alimentation sur le réseau et ceux relevés immédiatement après coupure de l'alimentation.

La fig. 2 donne respectivement les spectres acoustique et vibratoire pour une alimentation monophasée 230V-50Hz. Le spectre acoustique de la fig. 2a permet de préciser les fréquences des raies prépondérantes, le bruit total est de 50dBA. Les trois raies à 7550Hz, 7650Hz et 7750Hz, espacées de 100Hz sont typiques du bruit magnétique. Sur le spectre vibratoire (fig. 2b)

apparaissent quasiment toutes les composantes présentes au niveau du spectre acoustique. Les raies manquantes, d'amplitude relativement faible comparativement aux composantes prépondérantes, peuvent être attribuées à un bruit d'origine aérodynamique. La vibration à 1184Hz n'est pas, a priori, d'origine magnétique.

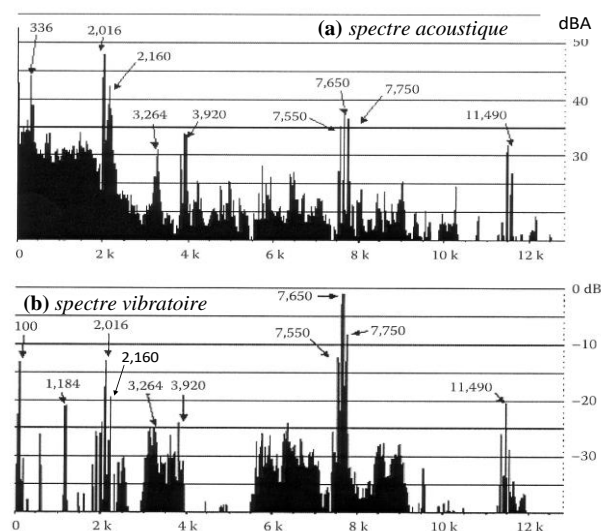


Figure 2 : Spectres acoustique et vibratoire de la machine de 650W alimentée par le réseau

- La fig. 3a présente le spectre acoustique juste après coupure de l'alimentation donc lorsque le rotor est toujours en rotation. En l'absence d'induction d'entrefer, ce spectre ne comprend que des raies de bruit mécanique et aérodynamique. La disparition des raies à 2016Hz, 3920Hz, 7550Hz, 7650Hz, 7750Hz et 11490Hz permet de conclure que ces dernières sont d'origine magnétique alors que les raies à 336Hz, 2160Hz et 3264Hz sont d'origine mécanique ou aérodynamique. La fig. 3b correspond au spectre vibratoire qui ne concerne, dans ce cas, que les effets mécaniques.

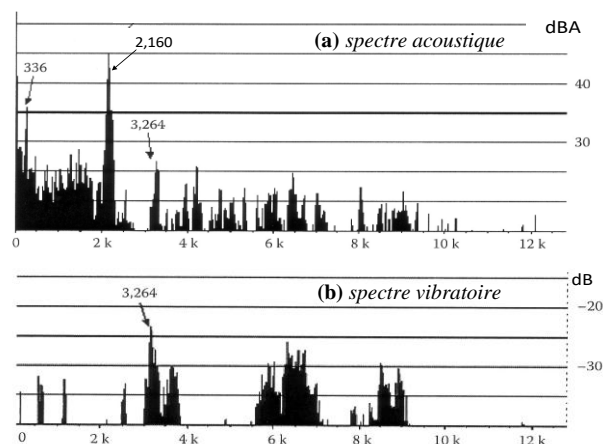


Figure 3 : Spectres de la machine de 650W juste après coupure de l'alimentation

On peut en déduire que la raie à 2160Hz est probablement d'origine aérodynamique. Se pose de problème de la raie à 336Hz qui disparaît des spectres vibratoires des fig. 2b et 3b. Pour conclure quant à l'origine de cette raie, il suffit de réaliser une expérimentation similaire après avoir enlevé le ventilateur.

### 3 Caractérisation du bruit d'origine magnétique

#### 3.1. Définition des forces

Les courants qui circulent dans les enroulements génèrent dans l'entrefer un champ magnétique qui conduit à trois types de forces.

- Les forces tangentielles qui créent le couple et la rotation du rotor.
- Les forces magnétostrictives, négligeables dans les machines tournantes
- Les forces de Maxwell. La composante radiale du flux magnétique dans l'entrefer crée une force  $F_M$  qui tend à rapprocher, par endroits, le stator et le rotor. Son expression, par unité de surface, est :

$$F_M = b^2 / 2\mu_0 \quad (1)$$

où  $b$  est l'induction en un point de l'entrefer et  $\mu_0$  la perméabilité du vide ( $4\pi 10^{-7}$  H/m). Ces forces magnétiques agissent sur le stator en le déformant et en créant des vibrations. Le rotor, qui forme une pièce massive, ne se déforme que de manière axiale. De plus, étant encapsulé dans le stator, il rayonne peu, cela justifie qu'il n'est pas pris en compte pour justifier la génération du bruit.

L'induction  $b$  dans l'entrefer n'est pas sinusoïdale, les nombreux harmoniques sont dus à :

- la distribution spatiale des conducteurs dans un nombre fini d'encoches, à l'origine d'harmoniques de force magnétomotrice (fmm),
- l'épaisseur variable de l'entrefer due aux encoches à l'origine d'une réluctance variable [BRU1],
- l'éventuelle excentricité du rotor qui crée une épaisseur minimale de l'entrefer variable due à la construction et à l'usure des roulements [AYA], amplifiée par les forces radiales,
- la saturation magnétique des tôles, particulièrement au niveau des dents [MOR],
- la présence d'harmoniques de courant pour les machines alimentées par l'intermédiaire d'un variateur de vitesse [BEL].

Pour concevoir une machine silencieuse du point de vue du bruit magnétique, il faut donc minimiser les harmoniques d'induction.

Considérons une machine à  $p$  paires de pôles.  $b$  peut s'exprimer par :

$$b = \sum_h b_h = \sum_h \hat{b}_h \cos(\omega_h t - hp\alpha - \psi_h) \quad (2)$$

$\alpha$  représente la position angulaire d'un point quelconque de l'entrefer relativement à une référence spatiale statorique d's donnée.

Le rang  $h$  est fonction des rangs harmoniques d'alimentation, de fmm et de denture. Cette quantité est donc tributaire des nombres totaux d'encoches statoriques  $N^s$  et rotoriques  $N^r$  mais également, pour une machine asynchrone, du glissement.

Une composante d'induction résulte en fait d'une combinaison d'une infinité de composantes élémentaires. Par conséquent, l'amplitude  $\hat{b}_h$ , la pulsation  $\omega_h$  (fréquence  $f_h$ ) et la phase  $\psi_h$  sont des fonctions assez complexes.

La relation (1) conduit à exprimer  $F_M$  par :

$$F_M = \sum_m F_{Mm} = (\sum_h b_h)^2 / 2\mu_0 \quad (3)$$

Pour caractériser  $F_M$ , on introduit un rang  $h'$  afin de distinguer les différents termes. Il en résulte :

$$F_M = \frac{1}{2\mu_0} \sum_h b_h^2 + \frac{1}{\mu_0} \sum_{\substack{h, h' \\ (h \neq h')}} b_h b_{h'} \quad (4)$$

La décomposition d'une composante au carré fait apparaître un terme qui génère une force constante  $F_{Mm(c)}$  qui, par conséquent, ne peut générer de bruit.

Dans ces conditions, en convenant de noter  $F_{Mm(v)}$  les composantes non stationnaires de force,  $F_{Mm}$  s'exprime, de manière générale, par :

$$F_{Mm} = \sum_m [F_{Mm(c)} + F_{Mm(v)}] \quad (5)$$

avec :

$$F_{Mm(v)} = \hat{F}_{Mm(v)} \cos(\omega_m t - m\alpha - \psi_m) \quad (6)$$

où  $m$  est le nombre de modes de déformation (nombre de paires de pôles) de l'onde de force,  $\omega_m$  sa pulsation (fréquence  $f_m$ ),  $\hat{F}_{Mm}$  son amplitude (en N/m<sup>2</sup>) et  $\psi_m$  une phase.

Les ondes de force (plus exactement de pression magnétique) tournent à la vitesse angulaire  $\omega_m / m$  en présentant une amplitude constante. Elles génèrent des vibrations du stator et donc du bruit.

En faisant abstraction des phases et en considérant les relations (6), (4) et (2), il apparaît, à  $h$  et  $h'$  donnés, quatre forces élémentaires non stationnaires définies comme suit :

$$\hat{F}_{Mm(v)} = \hat{b}_h^2 / 4\mu_0, \quad \omega_m = 2\omega_h, \quad m = 2hp$$

$$\hat{F}_{Mm(v)} = \hat{b}_{h'}^2 / 4\mu_0, \quad \omega_m = 2\omega_{h'}, \quad m = 2h'p$$

$$\hat{F}_{Mm(v)} = \hat{b}_h \hat{b}_{h'} / 4\mu_0, \quad \omega_m = \omega_h + \omega_{h'}, \quad m = (h + h')p$$

$$\hat{F}_{Mm(v)} = \hat{b}_h \hat{b}_{h'} / 4\mu_0, \quad \omega_m = \omega_h - \omega_{h'}, \quad m = (h - h')p$$

Le bruit magnétique est généralement généré par les termes qui résultent des doubles produits [JOR].

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale, en considérant un moteur asynchrone, les quantités  $\hat{b}_h$ , pour  $h \neq 1$ , sont de l'ordre du centième de l'amplitude du fondamental  $\hat{b}_1$  [BRU1]. Afin que ces composantes de forces présentent une amplitude suffisante, il est nécessaire que ces doubles produits fassent intervenir la quantité  $\hat{b}_1$ . Cela limite considérablement le nombre de composantes de forces à considérer.

### 3.2. Modes de déformation

Le nombre de modes  $m$  est un paramètre très important car la réponse mécanique du stator change selon sa valeur. Pour caractériser  $m$ , afin de simplifier les représentations, les figures ne feront apparaître que les déformations de l'enveloppe extérieure du stator alors que celles-ci résultent de déformations similaires de l'enveloppe interne. En outre, nous ne considérerons qu'une composante de force non stationnaire associée à une composante stationnaire avec :  $F_{Mm(c)} = \hat{F}_{Mm(v)}$ . L'enveloppe extérieure du stator en l'absence d'excitation est présentée en trait plein, la ligne en pointillés la représente pour une attraction donnée. La ligne grisée en trait mixte montre l'effet de  $F_{Mm(c)}$ . Pour des raisons de commodité, les déformations sont très fortement amplifiées alors qu'elles sont de l'ordre du  $\mu\text{m}$ .

- Pour  $m=0$ , l'attraction entre stator et rotor est uniforme sur le pourtour de l'entrefer avec une amplitude qui varie en fonction du temps à la fréquence  $f_m$ . Il en est donc de même pour les déformations comme le montre la fig. 4a.

- Le cas  $m=1$  est particulier car l'attraction entre stator et rotor est maximale en un point et minimale à l'opposé. Le point d'attraction maximale tourne à la vitesse angulaire  $\omega_m$ , comme le montre la fig. 4b. Vu du stator, le rotor apparaît décentré. Ce phénomène s'apparente à un balourd très dangereux du point de vue des bruits et vibrations. Ce cas est assez rare.

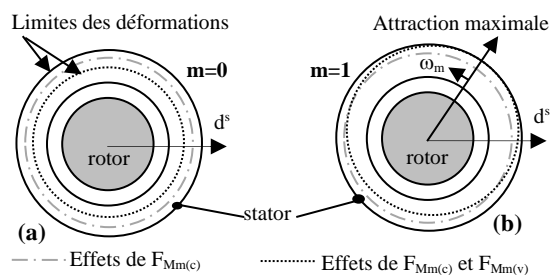


Figure 4 : Déformations du stator pour  $m=0$  et  $1$

- Pour  $m>1$ , les  $m$  points d'attraction maximale entre stator et rotor entraînent une déformation du stator en  $2m$  pôles qui tournent à la vitesse angulaire  $\omega_m/m$ . La fig. 5 illustre ces déformations pour  $m=2$  et  $4$ . L'amplitude des déformations est inversement proportionnelle à  $m^4$ . Cette particularité permet de compléter les restrictions formulées en conclusion du paragraphe 3.1 à savoir qu'il est inutile de considérer des composantes de force qui présentent un mode trop élevé. En pratique, on limite la valeur de  $m$  à 8.

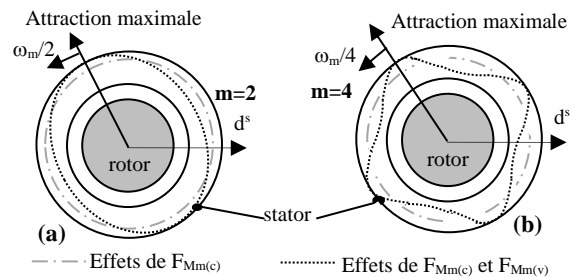


Figure 5 : Déformations du stator pour  $m>1$

### 3.3. Passage des forces au bruit

Les déformations qui viennent d'être présentées sont qualifiées de statiques. Il convient ensuite de prendre en compte les résonances mécaniques qui peuvent les amplifier. Cela conduit aux déformations dynamiques [WAN].

Les modèles mécaniques utilisés peuvent être soit analytiques, soit numériques. Pour les modèles analytiques, on utilise généralement les formules déduites des déformations d'une poutre [ALG]. Ce modèle présente l'avantage d'être simple à exploiter. Il fournit directement les expressions des déformations en fonction des paramètres caractérisant les composantes de forces en prenant en compte les caractéristiques géométriques du stator et la nature des matériaux le constituant.

Les méthodes numériques sont, quand à elles, plus précises car elles peuvent considérer des géométries plus réalistes de la structure et tenir compte, par exemple, des fixations. Elles peuvent également faire apparaître des phénomènes de déformation 3D [LEC1], impossibles à prédire analytiquement. Les méthodes numériques sont toutefois lourdes à mettre en œuvre et, comme la précision des méthodes analytiques reste acceptable, ces dernières sont intéressantes pour une estimation rapide du bruit magnétique susceptible d'être émis par les machines électriques.

Les déformations dynamiques de l'enveloppe extérieure du stator provoquent le déplacement de particules d'air. Les caractéristiques de ces déplacements (amplitudes et vitesses) définissent la pression acoustique en prenant en compte la densité du milieu ( $415 \text{ kg m}^{-3}$  en champ libre). Etant donné la grande disparité entre la plus petite



variation de pression  $P_{a0}$  perceptible par l'oreille humaine (environ  $20\mu\text{Pa}$ ) et le seuil de douleur (de l'ordre de  $100\text{Pa}$ ), les grandeurs mesurées  $P_a$  s'expriment en dB en prenant comme référence  $P_{a0}$ . Le niveau de pression acoustique  $L_p$  est alors défini par :

$$L_p = 20 \log[P_a / P_{a0}] \quad [7]$$

Comme l'oreille humaine n'a pas la même sensibilité à toutes les fréquences (elle est plus sensible pour des fréquences comprises entre 2 et 5kHz), les appareils de mesure sont équipés de dispositifs de pondération qui atténuent plus ou moins le signal suivant sa fréquence ce qui correspond à ce qui est qualifié de dBA. Des modèles plus sophistiqués, qui prennent en compte les réactions différentes de chaque oreille, sont également utilisés. Ils relèvent de ce qui est qualifié de psycho-acoustique.

Afin de situer les ordres de grandeurs des résultats que nous allons présenter, précisons que ce qui est qualifié de silence en champ libre correspond à 40dBA.

#### 4 Exemples de bruit de machines électriques

Pour cette présentation, nous conviendrons de noter  $f$  la fréquence des signaux d'alimentation et  $f_r$  la fréquence de rotation du rotor. Tous les relevés sont relatifs à un fonctionnement à vide.

##### 4.1. Machine asynchrone triphasée

La machine asynchrone triphasée est, de loin, la plus utilisée dans le domaine industriel. Il en résulte que le bruit de ce type de machines est un phénomène plutôt bien maîtrisé par les concepteurs, qui utilisent des règles de construction issues de plusieurs dizaines d'années d'expérience [KRO]. Toutefois, cela n'empêche pas l'apparition de problèmes vibro-acoustiques lorsque des structures, sortant des schémas classiques de conception, sont réalisées.

Le bruit magnétique de ces machines provient essentiellement d'harmoniques d'induction générés par les variations de réductance d'entrefer [NAN].

Le cas traité concerne une machine asynchrone triphasée à cage de 15kW, 6 pôles, alimentée par le réseau 400V, 50Hz.  $N^s$  et  $N^r$  valent respectivement 54 et 36. Le spectre acoustique présenté à la fig. 6 correspond à un glissement  $g$  de 0.83%. Pour commenter ce spectre, il convient de considérer le phénomène de résonance de denture présenté dans [BRU1]. Ce dernier définit les composantes d'induction harmoniques générées par la denture les plus importantes. Cette résonance repose sur la définition d'un coefficient  $M$  qui correspond au plus petit multiple commun des nombres d'encoches statoriques et rotoriques par paire de pôles. Cela conduit, dans ce cas, à  $M=36$ .  $f_h$ , qui intervient dans l'expression (2), s'exprime alors par :  $f_h = \lambda M f_r \pm f$ .  $\lambda$  est un entier

(1, 2, ...) et  $f_r$  vaut 16.53Hz. Ces composantes ont la particularité de présenter une polarité qui s'identifie à  $p$ . L'interaction de ces composantes d'induction avec l'onde fondamentale conduit à des composantes de forces qui présentent les fréquences :  $\lambda M f_r$  et  $\lambda M f_r \pm 2f$  avec  $m$  qui vaut soit 0 soit  $2p$  donc 6.

Nous avons marqué sur la fig. 6 les valeurs de  $\lambda$  qui conduisent aux composantes de forces les plus significatives aux fréquences relativement élevées (supérieures à 1kHz). Deux raies à 3470Hz et 3570Hz ( $\lambda=6$ ) dominent ce spectre ; elles sont probablement de mode 0 car, pour  $m=6$ , les déformations seraient trop faibles pour être sources significatives de bruit. Les composantes relatives à  $\lambda=1$  n'apparaissent pas sur le spectre. Il est possible d'en conclure qu'il n'y a pas de résonance mécanique aux environs de 600Hz alors que celles-ci affectent la structure au voisinage de 2400 et 3600Hz. Une analyse modale [LEC1] permettrait de confirmer ce résultat.

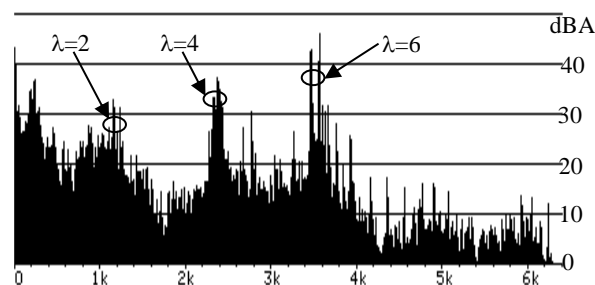


Figure 6 : Spectre acoustique de la machine de 15kW

##### 4.2. Machine asynchrone triphasée saturée

La saturation magnétique sur une machine ne se traduit pas de manière similaire à celle qui affecte les transformateurs. En effet, dans ce cas, la saturation se manifeste par l'apparition d'un contenu harmonique au niveau des courants absorbés relativement important même si l'induction est supposée demeurer sinusoïdale dans le circuit magnétique. Sur une machine, la saturation peut être interprétée comme une augmentation de l'épaisseur d'entrefer dans certaines zones qui évoluent à la vitesse synchrone. A valeurs efficaces données des tensions sinusoïdales d'alimentation, il est possible, en première approximation, de supposer l'induction fondamentale d'amplitude constante. Cela se traduit par une augmentation notable des courants sinusoïdaux statoriques absorbés (dans certains cas, le courant à vide de la machine atteint des valeurs qui sont proches de la valeur nominale). Cet effet s'accompagne de l'apparition de nouvelles composantes d'induction spécifiques dans l'entrefer [MOR] qui enrichissent le contenu harmonique de  $b$  comparativement au cas précédemment traité. Des investigations sont toujours réalisées sur ce sujet [BES1], les résultats que nous

allons présenter sont issus de travaux présentés dans [LEC2]. Ils concernent une machine asynchrone industrielle à cage 400V, 50Hz à 3 vitesses. Le plus souvent, cette machine fonctionne aux vitesses hautes (3000 et 1500tr/m) obtenues en mettant en œuvre un bobinage Dahlander. Un bobinage supplémentaire intégré au stator permet d'obtenir la vitesse basse proche de 375tr/mn, celle-ci étant utilisée sporadiquement pour des besoins de levage. Les puissances que peut délivrer la machine sont respectivement de 19, 16 et 7.5kW.  $N^s$  et  $N^r$  valent respectivement 48 et 42. La machine considérée présente un bruit très élevé en basse vitesse. Les développements théoriques réalisés montrent l'apparition de composantes de bruit multiples de 100Hz avec une nette prédominance des composantes multiples de 300Hz comme cela apparaît sur le spectre acoustique de la fig. 7a où un bruit total de 85.7dBA est relevé. Un moyen simple de s'assurer effectivement que ce bruit important est engendré par la saturation, consiste à sous alimenter la machine. La fig. 7b présente le spectre relevé pour une tension d'alimentation de 350V. On constate une diminution très importante du bruit global (59.8dBA) avec disparition de pratiquement toutes les raies multiples de 300Hz. Seule celle à 300Hz demeure en étant cependant réduite de l'ordre de 20dBA.

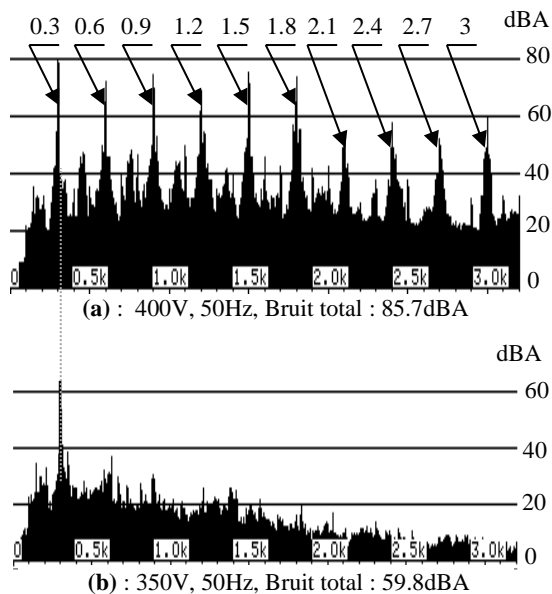


Figure 7: Impact de la saturation sur le bruit

#### 4.3. Machine à réluctance variable

La machine à réluctance variable (MRV) est, de construction simple et de faible coût puisqu'elle ne possède ni de bobinage, ni d'aimant au rotor. En outre, l'électronique de puissance nécessaire à son alimentation ainsi que la commande associée sont des systèmes relativement rudimentaires. En plus de sa simplicité, cette machine a la particularité d'avoir un bon rendement mais présente toutefois l'inconvénient d'être une machine bruyante à cause d'effets de

réluctance variable très prononcés associés aux harmoniques présents dans le système d'alimentation [CAM], [COL]. La fig. 8 présente le spectre acoustique d'une machine à double saillance (MRVDS) 8/6 de 2kW alimentée par une tension constituée de créneaux rectangulaires [LEC3]. Le rotor évolue à la vitesse de 1466.6tr/mn. Il est possible d'observer que le spectre est composé d'une multitude de raies fines, caractéristiques de l'origine magnétique du bruit. Apparaît une raie prédominante à 2200Hz qui s'explique par la présence d'une résonance mécanique aux environs de cette fréquence. Signalons que la raie voisine de 3400Hz est amplifiée par une fréquence de résonance 3D qui ne peut être prédéterminée que par une analyse par éléments finis.

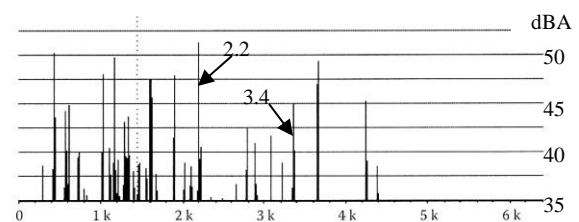


Figure 8 : Spectre acoustique de la MRVDS

#### 4.4. Machine synchro-réductante

La machine synchro-réductante à aimants enterrés est une machine de conception innovante, qui bénéficie d'un couple réductant et d'un couple dû à la présence d'aimants au rotor. L'une de ses particularités repose sur la diminution du volume de fer. Cela augmente la puissance massique de la machine mais diminue la rigidité du stator, favorisant, par conséquent, ses déformations mécaniques (accroissement du nombre de fréquences naturelles). Cette machine possède un bobinage concentré sur les dents statoriques (bobinage sur plots) qui génère au niveau de l'onde de fmm un contenu harmonique important, amplifié par l'alimentation triphasée qui est réalisée par l'intermédiaire d'un onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Toutes les conditions sont donc réunies pour que cette machine soit particulièrement bruyante. Le gain obtenu quant aux performances se paye au détriment du confort, notamment de par le comportement vibro-acoustique. Des expérimentations ont été réalisées sur une machine de 400V, 27kW avec  $p=4$ , ayant les dimensions d'une machine asynchrone de 15kW [BRU2].  $N^s$  et  $N^r$  valent respectivement 12 et 8. Précisons qu'avec le même encombrement extérieur, il est possible de réaliser une machine synchro-réductante de 45kW. La fréquence  $f_{MLI}$  de découpage de l'onduleur définit le paramètre :  $v = f_{MLI} / f$ . Le spectre acoustique de la fig. 9a fait nettement apparaître une singularité liée aux paquets de raies qui ressortent autour de  $f_{MLI}$  et de ses multiples ( $v$ ,  $2v$ ,  $3v$ , ..). Pour une

fréquence inférieure à 6kHz, apparaissent les effets dus au design de cette machine (harmoniques de fmm et réductance variable). Les amplitudes des raies correspondantes sont à rapprocher de celles présentées pour la MRVDS (fig. 8).

L'importance du bruit engendré par le découpage résulte de la multiplicité du nombre de fréquences naturelles comme précédemment évoqué. Le spectre vibratoire de la fig. 9b confirme cette particularité. Néanmoins, indépendamment de cet aspect, une autre interrogation subsiste. Pour qu'il y ait bruit, il est nécessaire que des ondes d'induction harmoniques d'amplitudes non négligeables soient engendrées par le découpage alors que, traditionnellement, il est admis que les courants harmoniques dans les machines génèrent des effets magnétiques insignifiants [MUR]. Le contenu spectral du courant présenté à la figure 9c ne fait pas apparaître d'harmoniques d'amplitude excessive (courant nominal de 45A). Il en résulte que les conclusions généralement formulées sur l'impact magnétique de ces harmoniques doivent être remises en cause [BRU2].

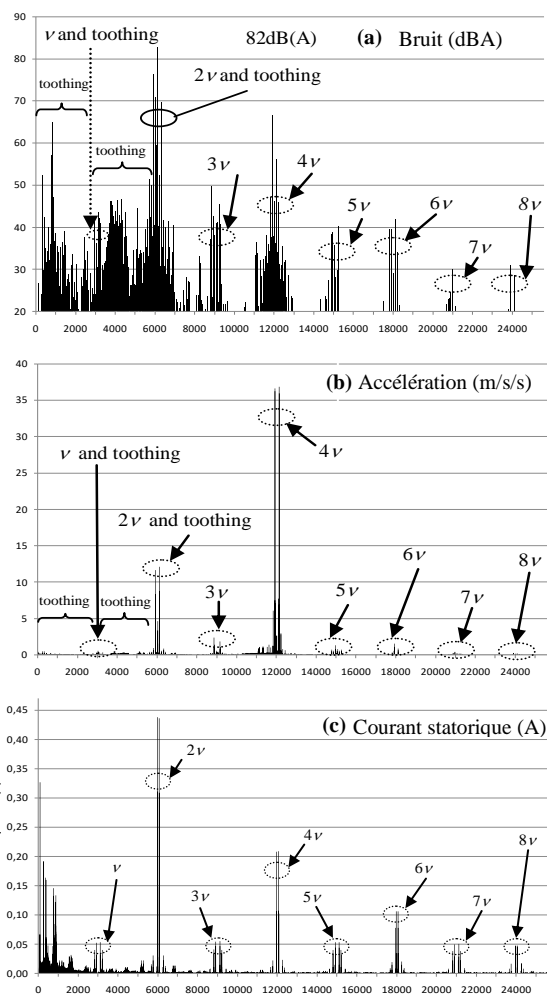


Figure 9 : Spectres pour la machine synchro-réductante

## 5. Procédures de réduction du bruit magnétique

Industriellement, les problèmes générés par un bruit magnétique excessif sont toujours d'actualité. Ils concernent des machines conventionnelles construites à l'unité ou des structures de conception innovante destinées à s'adapter à une demande de plus en plus forte et de plus en plus contraignante de certains utilisateurs. Bien que notre présentation fasse apparaître une certaine incompatibilité quand les exigences deviennent trop nombreuses, des travaux sont réalisés pour satisfaire ces besoins. Parmi les approches développées, deux grandes tendances se distinguent.

La première porte sur le design de l'enveloppe extérieure de la machine [TIS] ou sur une meilleure définition des paramètres géométriques de la denture [BES2].

La seconde tendance consiste à mettre en œuvre des procédures actives de réduction qui, par définition, ne remettent pas en cause le design de la machine. L'un des principes consiste à injecter dans les enroulements des courants harmoniques dont le rôle est de créer des composantes de force antagonistes à celles générées naturellement par la denture [CAS]. Une autre technique consiste, à l'aide d'actionneurs piezo-électriques, de s'opposer aux déformations mécaniques de l'enveloppe extérieure de la machine. Cette technique a été appliquée à un prototype de MRVDS [MIN].

Plus spécifiquement, lorsqu'il s'agit de minimiser des bruits engendrés par le découpage MLI, des solutions simples existent. Elles consistent à insérer des filtres LC accordés à l'entrée de la machine pour dévier les harmoniques de courant. Néanmoins, ces solutions sont souvent rejetées par les industriels ce qui nécessite de proposer d'autres techniques [BES3]. L'une d'elles repose sur le convertisseur lui-même en augmentant le nombre de niveaux de l'onde de sortie (onduleur multi-niveaux) [LEL]. Cependant, comme dans ce cas les composantes de bruit magnétique évoluent à de fréquences relativement élevées, il est envisageable d'agir sur le design du rotor alors que ce dernier, comme déjà signalé, peut être considéré comme neutre quant à la génération de bruit magnétique. Les développements qui justifient cette particularité sont présentés dans [BRU2].

## 6. Conclusion

Le problème des bruits et vibrations des machines électriques existe depuis que ces machines existent, c'est-à-dire depuis plus d'un siècle. Si les bruits d'origines mécanique ou aérodynamique semblent relativement bien maîtrisés, il n'en est pas de même pour le bruit d'origine magnétique qui redevient d'actualité dès que de nouvelles structures sont appelées à être mises sur le marché. Le fait de concevoir des machines

de conceptions nouvelles s'impose de par les nouveaux besoins qui apparaissent avec leurs lots de contraintes. Parmi elles, l'accroissement des performances énergétiques ainsi que l'augmentation des puissances massiques se distinguent clairement. Ces tendances résultent de la raréfaction des énergies fossiles mais également des normes en vigueur visant à accentuer le confort de l'utilisateur (transport, appareillage domestique, ...). Compte-tenu de la situation, en prenant en compte en sus les problèmes d'éco-conception, la demande dans le domaine de la maîtrise du bruit d'origine magnétique n'est pas prête à se tarir eu égard à la concurrence internationale que se livrent les grands constructeurs de machines. Notons que la bibliographie qui suit n'est pas exhaustive et qu'elle privilégie la recherche française.

## 7. Références bibliographiques

- [ALG] P.L. Alger. "The nature of induction machine". 2<sup>nd</sup> edition. Gordon & Breach publishers, New York, 1970.
- [AYA] S. Ayari, M. Besbes, M. Lecrivain, M. Gabsi. "Effects of the airgap eccentricity on the SRM vibrations". Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD, May 1999 pp 138–140.
- [BEL] R.J.M. Belmans, D. Verdyck, W. Geysen, R.D. Findlay. "Electro-mechanical analysis of the audible noise of an inverter-fed squirrel cage induction motor". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, N° 3, May/June 1991, pp 539-544.
- [BES1] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, P. Brochet. "Characterization and reduction of magnetic noise due to saturation in induction machines". IEEE Trans. on Mag., Vol. 45, No. 4, 2009, pp. 2003-2008.
- [BES2] J. Le Besnerais *et al.* "Optimal slot opening width for magnetic noise reduction in induction motors". IEEE Trans. on Energy conversion, December 2009, Vol. 24, N°4, pp. 869-874.
- [BES3] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, P. Brochet "Characterization and Reduction of Audible Magnetic Noise Due to PWM Supply in Induction Machines", IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol 57, Issue: 4, April 2010, pp 1288-1295.
- [BON] J. Bonal. "Utilisation industrielle des moteurs courant alternatif". Schneider Electric, Edition TEC & DOC, 2001.
- [BRU1] J.F. Brudny. "Modelling of induction machine slotting : Resonance phenomenon". Journal de Physique III, JP, III, Mai 1997, pp. 1009-1023.
- [BRU2] J.F. Brudny, J.P. Lecointe. "Rotor Design for reducing the Switching Magnetic Noise of AC Electrical Machine Variable-Speed Drives". IEEE Trans. on Industrial Electronics. A paraître.
- [CAM] D.E. Cameron, J.H. Lang, S.D. Umans. "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, n°6, Nov/Dec 1992, pp. 1250-1255.
- [CAS] B. Cassoret, R. Corton, D. Roger, J.F. Brudny. "Magnetic Noise Reduction of Induction Machines". IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 18, n°2, March 2003, pp. 570-579.
- [COL] R.S. Colby, F.M. Mottier, T.J.E. Miller. "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, n°6, Nov/Dec 1996, pp. 1357-1364.
- [FIN] W.R. Finley. "Noise in induction motors – causes and treatments". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, N°6, Nov/Dec 1991, pp. 1204-1213.
- [JOR] H. Jordan. "Geräuscharme elektromotoren" W. Girardet, Essen 1950.
- [KRO] G. Kron. "Induction motor slot combinations: Rules to determine crawling, vibration, noise and hooks in the speed torque curves". AIEEE Transactions, Vol. 50, 1931, pp. 757-768.
- [LEC1] J.P. Lecointe, R. Romary, J.F. Brudny, T. Czapla. "Five methods of stator natural frequency determination. Case of induction and Switched Reluctance Machines". Mechanical Systems and Signal Processing, Academic Press, Cambridge, UK, mars 2004, pp. 1133-1159.
- [LEC2] J.P. Lecointe, B. Cassoret, J.F. Brudny. "Distinction of toothing and saturation effects on magnetic noise of induction motors". Progress In Electromagnetics Research PIERS, Vol. 112, 2011, pp. 125-137.
- [LEC3] J.P. Lecointe, R. Romary, J.F. Brudny, M. McClelland. "Analysis and active reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance motor". IEEE, Electric Power Applications, Londres, Angleterre, Nov. 2004, Vol. 151, N°6, pp. 725-733.
- [LEL] E. Leleu, S. Siala, C. Espanet, A. Miraoui. "Modelling of Electromagnetic origin vibrations in an induction machine supplied by high power PWM inverter". IECON, 2006, pp. 836-843.
- [MIN] X. Mininger *et al.* "Semiactive and active piezoelectric vibration controls for switched reluctance machine". IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 23, No. 1, 2008, pp. 78-85.
- [MOR] J.C. Moreira, T.A. Lipo. "Modeling of saturated AC machine including airgap flux harmonic components". IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28 N°2, March/April 1992, pp. 343-349.
- [MUR] J.M.D. Murphy, F.G. Turnbull. "Power Electronic Control of AC Motors". Pergamon Press, 1988.
- [NAN] S. Nandi. "Modelling of induction machines including stator and rotor slot effects". IEEE Trans. on Industry Applications, "Vol. 40 N°4, July/august 2004, pp. 1058-1065.
- [TIM] P.L. Timar *et al.* "Noise and vibration of electrical machines". Elsevier, Amsterdam, 1989.
- [TIS] H. Tischmacher, B. Eichinger. "Sound optimisation of a converter-fed drive system using an acoustic camera in combination with modal analysis". Compel, Vol. 29, issue 4, pp 1106 - 1115.
- [WAN] S. Wanatabe *et al.* "Natural frequencies and vibration behaviour of motor stators". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, N°4, April 1983, pp. 949-956.



# S'éclairer avec des leds

Patrick Mottier

CEA-LETI, Campus MINATEC  
17 rue des Martyrs  
38054 GRENOBLE Cedex 9

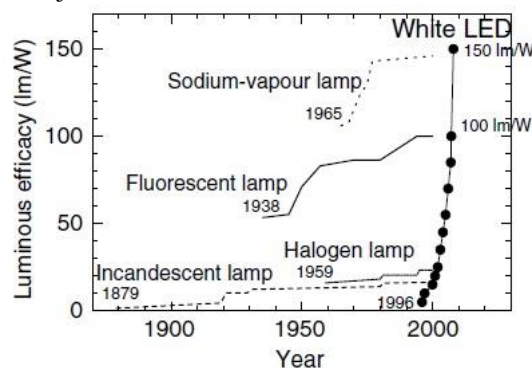
**Résumé :** L'éclairage est un gros consommateur d'énergie, alors que la plupart des sources de lumière utilisées restent énergétiquement peu efficaces. Dans ce contexte, les leds, composants électroniques de plus en plus brillants, tentent de prendre leur place. Après un bref historique des leds, on présente les leds blanches et leur performances en terme d'efficacité énergétique et lumineuse, ainsi que leur comportement bien spécifique avec le courant et la température. On donne ensuite un rapide aperçu d'autres caractéristiques qui peuvent s'avérer déterminantes dans certaines applications. Enfin on termine par quelques mots sur le contexte mondial et les progrès encore à attendre de cette technologie.

## 1. L'éclairage, grand consommateur d'énergie

Si on ajoute les différents besoins en éclairage des locaux tertiaires, industriels et domestiques, ainsi que l'éclairage public, l'éclairage représente une part proche de 20% de l'électricité totale consommée dans les pays développés. Cette part non négligeable de la consommation électrique doit être mise en regard de l'efficacité énergétique globalement faible des principales sources de lumière employées à l'heure actuelle. En effet, les ampoules à incandescence, en cours de retrait du marché, ne convertissent que 5% environ de l'énergie électrique qu'elles consomment en lumière, le reste étant dissipé sous forme de chaleur principalement par rayonnement infrarouge et convection. Si elle est supérieure, l'efficacité énergétique d'un tube fluorescent n'atteint qu'un modeste 20%. Par ailleurs, bien que les lampes à incandescence ou fluorescentes aient progressé significativement depuis leur invention, elles ont atteint aujourd'hui la maturité technologique (Figure 1). Hors nouvelle rupture technologique, on n'attend plus désormais d'amélioration significative de leurs efficacités énergétiques respectives. C'est pourquoi l'arrivée des diodes électroluminescentes (led) dans le domaine de l'éclairage suscite autant d'intérêt. Suivant les feuilles de route de cette technologie, l'efficacité des leds blanches, déjà proche de celle des lampes fluocompactes devrait plus que doubler dans les années qui viennent.

## 2. Une brève histoire des leds [1]

Si les leds ne sont apparues que récemment dans le monde de l'éclairage, la première émission de lumière par un semi-conducteur a été constatée par Joseph Round (Marconi Co, UK) en 1907, et le premier brevet déposé en 1929 par Oleg Vladimirovitch Losev, un radio-technicien russe. Ce brevet n'a jamais été exploité industriellement et il a fallu attendre 1968 pour que soit commercialisée la première led rouge, suivie de leds ambre, jaunes et vertes.



**Figure 1 :** L'évolution de l'efficacité lumineuse<sup>1</sup> de différents types d'éclairage au cours du temps met en évidence la progression fulgurante des leds. Crédit: Yukio Narukawa, et al. - 2010 J. Phys. D: Appl. Phys. 43 354002

Ce n'est qu'à la toute fin des années 80 qu'a été mise au point par S.Nakamura<sup>2</sup>, un ingénieur travaillant chez Nichia Corp., une technologie de led bleue viable [2].

Elle donnait accès, on verra comment, à la lumière blanche. De là à penser éclairage, il n'y avait qu'un pas que les industriels franchirent au début des années 2000.

En 1968, la première led commercialisée produisait une lumière rouge d'à peine 0,001 lumen<sup>3</sup>. En 2011, des

<sup>1</sup> L'efficacité lumineuse s'exprime en lm/W. Voir paragraphe « L'efficacité énergétique et lumineuse »

<sup>2</sup> S. Nakamura a reçu en 2006 le Millenium Technology Prize pour son invention

<sup>3</sup> Unité mesurant un flux de lumière, voir paragraphe « L'efficacité énergétique et lumineuse »

leds blanches de haute puissance, voire de très haute puissance, sont disponibles sur le marché et produisent plusieurs centaines de lumens. Des dispositifs qui combinent plusieurs « puces » led dans le même boîtier peuvent fournir plusieurs milliers de lumens (Figure 2).

### 3. Les leds, qu'est-ce que c'est ?

Quelle qu'en soit la couleur, une led est avant tout une diode. Alors que les diodes bien connues des électroniciens sont à base de silicium, les leds sont à base de semi-conducteurs plus « exotiques », à savoir des nitrures d'alliages gallium - indium pour les leds blanches qui nous préoccupent ici. Le phénomène mis en œuvre pour produire la lumière est l'électroluminescence : l'émission d'un photon correspond à la recombinaison d'un électron et d'un trou au niveau de la jonction de la diode injectés électriquement de part et d'autre. La « couleur » de ces photons dépend essentiellement de la composition du semi-conducteur. C'est pourquoi l'émission des leds se caractérise par un spectre de bande étroite de longueur d'onde, ce qui correspond à une couleur saturée. Elles ne sont donc pas utilisables directement pour s'éclairer, la lumière blanche se caractérisant au contraire par un spectre d'émission large, correspondant à la sensibilité de l'œil.



**Figure 2 :** A gauche, une led Luxeon-Rebel (PHILIPS-LUMILEDS), à droite un assemble de plusieurs leds dans un même boîtier (CREE XLamp® MP-L EasyWhite™ LED)

En mélangeant de la lumière bleue, verte et rouge on arrive, tout comme en télévision, à procurer une sensation de lumière blanche, c'est la synthèse additive. Bien qu'intéressante par la souplesse qu'elle procure en terme d'ajustement de teinte ou de température de couleur<sup>4</sup> par exemple, cette technique n'est habituellement pas employée en éclairage, car elle requiert une électronique d'alimentation et de contrôle onéreuse. Plus important encore, à moins d'augmenter le nombre de couleurs de base et la complexité du système, la qualité du rendu des couleurs de tels dispositifs est limitée [3].

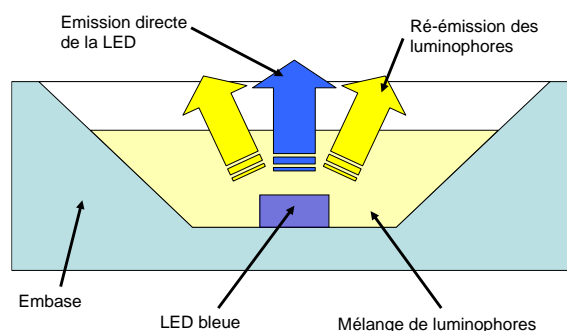
<sup>4</sup> Le spectre d'émission d'un objet incandescent dépend uniquement de sa température, plus elle est élevée, plus le spectre est riche en bleu et plus la lumière nous apparaît froide. A contrario, plus elle est basse, plus les couleurs rouges prédominent et la lumière nous apparaît chaude. La température

Une autre façon de produire de la lumière blanche consiste à ponctionner une partie de la lumière produite par une led et de la convertir en d'autres longueurs d'onde par le biais de matériaux fluorescents ou luminophores, c'est la photoconversion (Fig. 3). Ce processus intervenant toujours avec une perte d'énergie entre la longueur d'onde d'excitation et la longueur d'onde émise, il faut partir de leds bleues pour pouvoir générer les plus grandes longueurs d'onde du spectre, c'est-à-dire du vert au rouge. L'inverse n'est pas possible.

L'épaisseur de luminophores à traverser est déterminée pour obtenir en sortie un « pseudo-blanc », mélange du bleu initial et de la lumière issue des luminophores. Depuis les premiers produits à la qualité de blanc et à l'homogénéité de faisceau toute relative, la qualité des leds blanches s'est régulièrement améliorée grâce à l'élargissement de la gamme des luminophores utilisés et à une mise en œuvre mieux contrôlée. Initialement d'un blanc bleuté particulièrement « froid », des leds utilisant plusieurs luminophores produisent désormais également des blancs chauds. Les courbes de densité spectrale d'émission de ces sources sont bien caractéristiques des leds blanches (

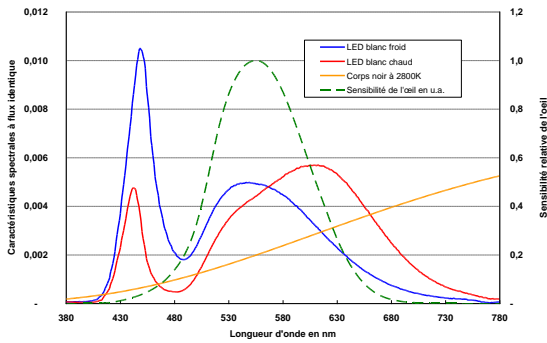
Figure 4). Elles laissent apparaître un pic dans le bleu correspondant à la source led et une « patate » plus large correspondant à l'émission des luminophores.

Quelle que soit la solution retenue, la synthèse additive ou la photoconversion, la led bleue était donc bien un préalable à la production de lumière blanche.



**Figure 3 :** Schéma de principe d'une led blanche établie à partir des premières réalisations. Depuis, les méthodes de mise en œuvre se sont multipliées et améliorées.

de couleur proximale (exprimée en Kelvins), ou plus simplement la température de couleur d'une source de lumière, est la température à laquelle il faut porter le corps noir thermodynamique pour obtenir « une sensation lumineuse » la plus proche de celle produite par la source considérée.



**Figure 4 :** A flux énergétique identique dans le domaine visible (le corps noir émet dans tout le spectre, notamment dans l'infrarouge, a contrario des leds), comparaison des densités spectrales énergétiques de leds blanc froid – composante bleue importante et faiblesse des rouges – et blanc chaud – composante bleue plus faible et flux plus important de lumière rouge. A titre indicatif, le spectre du corps noir thermodynamique à 2800K, un bon modèle de la lampe à incandescence et la sensibilité de l'œil dans le domaine photopique, c'est-à-dire en vision diurne.

#### 4. L'efficacité énergétique et lumineuse

L'efficacité énergétique, ou rendement, d'une source d'éclairage est le rapport entre l'énergie produite sous forme de rayonnement électromagnétique visible (la lumière) et l'énergie électrique consommée. Cette notion n'est toutefois pas suffisante, car suivant sa couleur, à même puissance rayonnée, un rayonnement électromagnétique produit « une sensation lumineuse différente ». C'est pourquoi on fait appel à la notion d'efficacité lumineuse pour comparer le flux de lumière produit rapporté à la puissance électrique consommée pour comparer les différentes sources. Les flux de lumière s'expriment en lumen (lm), l'efficacité lumineuse en lumen par Watt (lm/W).

On passe du flux énergétique au flux lumineux par la relation

$$\Phi_{\text{luminieux}} = K_M \cdot \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} F_{\text{énergétique}}(\lambda) \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda$$

où  $F_{\text{énergétique}}(\lambda)$  est la densité spectrale énergétique de la source. Elle représente le flux d'énergie émis par la source dans une petite gamme de longueur d'onde centrée sur  $\lambda$  et s'exprime en  $\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$ ;  $v(\lambda)$  est la sensibilité de l'œil en fonction de la longueur d'onde (Figure 4) ;  $K_M = 683 \text{ lm/W}$  correspond au maximum de la sensibilité de l'œil à 555 nm en vision diurne.

Les lampes à incandescence de 100 W fournissaient 1500 lm, soit une efficacité lumineuse de 15 lumen par Watt (lm/W), les lampes fluocompactes suivant les modèles présentent des efficacités lumineuses d'environ 45 à 60 lm/W, les nouveaux tubes fluorescents T5 à ballasts électroniques atteignent de l'ordre de 100 lm/W, d'où un flux supérieur à 5000 lm pour un tube de 54W.

C'est plus compliqué avec les leds ! En effet, l'efficacité d'une même led peut varier dans des proportions importantes suivant les conditions dans lesquelles elle est utilisée. C'est la raison pour laquelle les fabricants donnent l'efficacité dans des conditions très précises de courant, généralement 350mA pour les leds de puissance de 1 mm<sup>2</sup>, et de température, en l'occurrence une température de la zone émettrice de lumière à 25°C. Cette condition sur la température de jonction n'est accessible qu'en laboratoire. Dans une lampe ou un luminaire à leds, les leds s'échauffent. Or l'efficacité des leds diminue nettement lorsque le courant ou la température augmente. Le

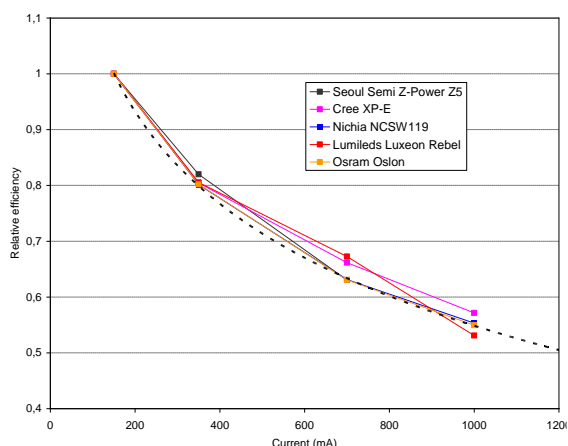
Tableau 1 montre sur un exemple l'effet cumulé de ces 2 paramètres sur un produit commercial qui divise par 2 l'efficacité spécifiée par le fabricant.

#### 5. Encore des points durs

La chute d'efficacité lorsque le courant augmente (Figure 5) est propre aux leds sur nitrure de gallium. Les leds blanches sont bien sûr directement concernées. C'est « l'efficiency droop » dont l'origine est encore discutée par les chercheurs. Différentes voies sont étudiées pour y remédier sans réel succès pour l'instant. Il s'agit cependant d'un point clé qu'il faudra résoudre pour que les leds deviennent incontestablement les sources les plus efficaces également à fort flux (à forte densité de courant).

	Courant (Puissance)					
	350 mA (~1W)		1000 mA (~3,5W)		1500 mA (5,25W)	
Temp. jonction	lm/W	lm	lm/W	lm	lm/W	lm
25°C	132	139	115	347	92	493
150°C	92	97	81	24	64	343

**Tableau 1 :** Evolution de l'efficacité lumineuse (lm/W) et du flux (lm) suivant le courant et la température : exemple d'une led CREE blanc froid XP-G à partir des données du fabricant.



**Figure 5 :** Efficacité relative des leds lorsque la densité de courant augmente. Ce phénomène se retrouve chez tous les constructeurs et fait l'objet de nombreux travaux de recherche pour l'éviter. Source : Yole Développement

L'échauffement des leds en fonctionnement est inévitable, car toute l'énergie non transformée en lumière est évacuée sous forme de chaleur. « L'efficiency droop » en faisant chuter les rendements de conversion accentue encore le phénomène. En revanche, plus les rendements des leds augmenteront, moins il y aura d'énergie à évacuer sous forme de chaleur. Quoi qu'il en soit, comme on cherche généralement à produire le maximum de lumière d'une led donnée, afin de diminuer le prix d'achat rapport  aux lumens produits, il est fortement probable que la densité de puissance thermique à dissiper sera au mieux constante.

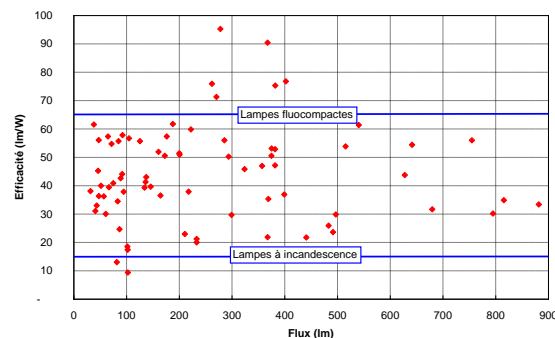
Dans l'immédiat, cette chaleur à dissiper, qui peut atteindre plusieurs W par mm<sup>2</sup>, pose de sérieux problèmes aux ingénieurs, notamment dans le cas où la géométrie du système est contrainte. C'est le cas des lampes à leds dites « de substitution », conçues pour remplacer les lampes à incandescence. Cela explique la place importante occupée par le dissipateur et l'allure particulière qu'il confère aux lampes à leds (

Figure 6).

Cela explique aussi le quasi absence sur le marché (aujourd'hui) de lampes à leds produisant plus de 800 lm, soit l'équivalent d'une lampe à incandescence de 60W. Il n'existe également que peu de lampes à leds simultanément puissantes et efficaces (Figure 7)



**Figure 6 :** Exemple de lampe de substitution à leds, ici la lampe Philips MASTER LEDbulb



**Figure 7 :** Efficacités et flux lumineux mesurés sur 74 lampes de substitution à leds. En bleu l'efficacité lumineuse typique des lampes à incandescence et fluocompactes à titre de comparaison. Seuls 6 produits présentent une efficacité supérieure à celle des lampes fluocompactes, et uniquement dans les faibles flux. Mesures gracieusement mises à disposition par Homelights.

## 6. Les leds, plus que la lumière

On a parlé de l'intérêt des leds au plan énergétique, elles n'en présentent pas moins de nombreuses autres caractéristiques qui les rendent déjà incontournables, ou au moins compétitives, dans de nombreuses niches de marché malgré des prix plus élevés.

Bien utilisées, c'est-à-dire correctement alimentées et refroidies, les leds présentent des durées de vie de plusieurs dizaines de milliers d'heures, bien plus élevées que toute autre source de lumière. Cela les rend particulièrement attractives lorsque les opérations de maintenance sont onéreuses ( clairage public, feux tricolores...)

La led est un composant électronique insensible aux cycles allumage / extinction répétés aussi courts soient-ils. C'est d'ailleurs ce principe qui, utilisé à haute fréquence, permet d'ajuster le niveau de lumière produit. Elles présentent sur ce point un net intérêt par rapport aux lampes fluocompactes.

Les dimensions réduites de la source facilitent la mise en œuvre du faisceau, notamment pour les « spots » de lumière, et offrent une liberté de design nouvelle au niveau du luminaire.

Elles n'émettent ni infrarouge, ni ultraviolet, caractéristiques qui s'avèrent très intéressantes pour l'éclairage de vitrines ou de musées par exemple.

Elles fonctionnent en basse tension au niveau de la led elle-même, on peut donc facilement les faire fonctionner sur batterie.

Elles ne présentent pas de parties mécaniquement fragiles telles que filament ou enveloppe de verre, ce qui leur confère certains atouts pour l'éclairage portatif, ou dans les transports.

Ces sources restent relativement froides. La température de la zone émettrice de lumière devrait en principe être maintenue en dessous de 150 C



typiquement. Par conséquent la température extérieure accessible est nettement inférieure. Les risques de brûlure ou d'incendie sont ainsi écartés.

On l'a vu elles fonctionnent mieux à basse température, ce sont les sources de lumière rêvées pour les chambres froides.

## 7. Les grands acteurs mondiaux et les autres

Le paysage industriel a évolué de manière significative ces dernières années et les parts de marché doivent se distribuer désormais parmi de nombreux acteurs. Nichia, l'inventeur de la led bleue, et de la led blanche, caracole en tête du classement, suivie d'Osram, de Samsung et de Cree, si on s'arrête aux plus grosses parts de marché des composants montés en boîtier [4]. Cependant il existe désormais plusieurs dizaines de fournisseurs, dont une large majorité asiatiques (Corée, Taïwan, Chine). D'un industriel à l'autre les produits et les performances diffèrent sensiblement. Les leds concernées par les applications d'éclairage efficaces, celles qui affichent plus de 100, voire 120 lm/W ne sont accessibles actuellement qu'aux leaders du domaine. De même pour les autres caractéristiques telles que la durée de vie par exemple.

## 8. En conclusion

Les leds apparaissent donc aujourd'hui comme des sources de lumière prometteuses. Elles sont déjà largement déployées dans des niches de marché où elles sont d'ores-et-déjà compétitives. Avec les progrès prévus par la feuille de route des industriels leaders du domaine (Tableau 2), elles combineront l'efficacité lumineuse la plus élevée et la durée de vie la plus longue des sources de lumière disponibles. En effet, l'efficacité lumineuse des leds va plus que doubler dans les 5 ans qui viennent.

En revanche, compte-tenu des caractéristiques propres à cette technologie et de la différence de maturité technologique des différents fabricants, il est clair que leur adoption doit être faite avec toutes les précautions d'usage. En l'absence de normes, il en va de même des produits commerciaux qui les utilisent.

## 9. Pour en savoir plus

1. Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage - EGEM - Edition Lavoisier - 2008
2. High-power GaN p-n junction blue light emitting diodes ; Nakamura S, Mukai T., Senoh M. ; Japanese Journal of Applied Physics Part 2 Letters - Vol. 30 - n°12A - pp 1998-2001 – 1991
3. Revue LUX N°253 Page 52-58 – Mai/juin 2009
4. Status of the led industry - Market analysis, industry status, players and main applications for led – EPIC – Yole Développement – 2010

Efficacités en lm/W	2009	2010	2012	2015
leds blanc « chaud » et de « bon rendu » de couleur	70	88	128	184
leds blanc « froid » et de « rendu de couleur moyen »	113	134	173	215

**Tableau 2:** Efficacités moyennes actuelles et prévues des leds blanc "froid" et blanc "chaud" d'après « Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap » - U.S. Department of Energy - Juillet 2010 - page 11 (disponible sur Internet)

**Remerciements :** l'auteur souhaite vivement remercier François Levy pour sa relecture attentive et l'acuité de ses commentaires.

## ECCE véhicule hybride : du militaire vers le civil

Jean-Marie KAUFFMANN\*, Daniel HISSEL\*, Michel AMIET\*\*

\* Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST, Département ENISYS, UMR CNRS 6174, Techn-Hom, 90010 Belfort Cedex – [jean-marie.kauffmann@univ-fcomte.fr](mailto:jean-marie.kauffmann@univ-fcomte.fr) ; [daniel.hissel@univ-fcomte.fr](mailto:daniel.hissel@univ-fcomte.fr)

\*\* Direction Générale de l'Armement, 7-9 rue des Mathurins 92220 Bagneux - [xpert.amiet@gmail.com](mailto:xpert.amiet@gmail.com)

**Résumé :** Le Banc ECCE, véhicule hybride série plug-in, est une plateforme de test qui permet d'évaluer les différentes technologies des moteurs, des convertisseurs, des sources d'énergie et de stockage et de leur gestion. Ce véhicule présente de nombreuses originalités tant par le niveau de tension que par la gestion des consignes de ses quatre moteurs de propulsion qui sont tous différents, et par la gestion de l'énergie à bord avec récupération au freinage. Ce projet coopératif a permis de maîtriser de nombreux aspects d'une part dans la conduite et le pilotage de véhicules hybrides et d'autre part dans l'association multi-sources et multi-charges. Dans une deuxième phase actuellement en cours, il est doté de nouvelles sources, permanente, transitoire et impulsionnelle. Le schéma de base du Banc ECCE a été repris pour d'autres applications dans le domaine des transports.

### 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 était donc particulièrement intéressée à tester les différentes structures et les composants d'un véhicule hybride de forte puissance. Compte tenu des applications potentielles, l'hybridation série est la plus intéressante.

Cette démarche a conduit 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 du Grand Est (Franche-Comté et Lorraine) et les partenaires impliqués. La liste avec les attributions figure en annexe 2.

Le Banc ECCE est innovant dans de nombreux domaines, niveau de tension du bus continu, production d'énergie, motorisation, ... Le caractère mobile du Banc ECCE même sur un circuit d'essai privé, impose de satisfaire la réglementation, stabilité, freinage, accessoires, sécurité, ... La motorisation électrique sur les quatre roues permet la mise en œuvre de techniques telles que l'ABS ou l'ESP. La gestion de l'énergie prend en compte les trois types de sources et la récupération au freinage.

La structure modulaire a été voulue pour faire du Banc ECCE un réel laboratoire mobile à échelle 1 et ainsi tester, par exemple, différents types de motorisation à la manière d'un échange standard. Tout a été pensé pour que la structure admette tant sur le plan mécanique que sur les plans électrique et commande d'autres composants tels que des moteurs à réluctance à champ

transverse ou des moteurs roues à réducteur intégré ou d'associer d'autres sources pour la fourniture énergétique. Dans la phase 2 actuellement en cours, trois nouvelles sources d'énergie électrique sont testées. Il s'agit de sources, impulsionnelles et transitoires (supercondensateurs, alternateur inertiel) et permanentes (générateur à aimant permanent, générateur à pile à combustible PEMFC). Les partenaires de cette phase 2 qui fait l'objet d'un contrat DGA sont précisés en annexe 3.

Le Banc ECCE permet d'étudier toute la problématique des véhicules hybrides du type série avec plug-in. L'expérience acquise est mise à profit pour d'autres véhicules hybrides civils (liaison par la route) ou militaires ou pour développer la notion de poutre énergétique.

### 2. Description du Banc ECCE

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. Seul le véhicule hybride série permet cette souplesse. Les contraintes de masse et de volume sont au second plan (il s'agit, faut-il le rappeler, non pas d'un véhicule au sens classique du terme, mais plutôt d'un laboratoire mobile) ce qui a conduit à une structure de véhicule lourd pour pouvoir placer tous les équipements. Les puissances mises en jeu doivent donc également être en conséquence. S'agissant d'un banc de test roulant, donc supposé évoluer en conditions réelles d'usage, le véhicule doit posséder tous les équipements de sécurité que l'on trouve habituellement sur un poids lourd.

La structure est organisée autour de deux longerons sur lesquels sont boulonnés les différents ensembles mécaniques. Les suspensions sont pneumatiques. Le volume utile est partagé en deux parties, l'une pour loger les groupes électrogènes et l'autre avec les équipements électriques (convertisseurs, protections, dispositifs de gestion d'énergie et de pilotage). Les accumulateurs sont logés en dessous de ces volumes.



Figure 1 : vue du Banc ECCE

### 2.1. Schéma de principe

Le schéma de principe de la figure 2 détaille les différents sous-ensembles qui seront détaillés plus loin. Le choix s'est porté sur une structure à quatre roues indépendantes donc sans liaison mécanique entre elles. La puissance nominale aux roues est de 4x30 kW. Pour avoir également de la souplesse au niveau de la génération, la solution retenue est, dans une première architecture étudiée, composée de deux groupes électrogènes entraînés par des moteurs diesel du commerce.

Les deux fonctions intitulées auxiliaires et cœur sont indispensables au bon fonctionnement du véhicule pour alimenter des composants tels que les pompes et pour définir les consignes à appliquer à la génération d'énergie et aux motorisations.

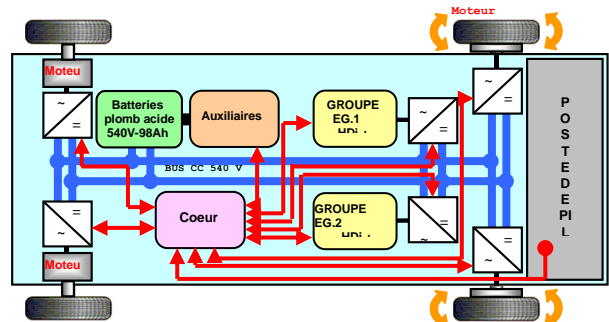


Figure 2 : Schéma de principe du Banc ECCE

### 2.2. Caractéristiques électriques du Banc ECCE et schéma unifilaire

Un point fondamental est le niveau de tension du bus continu sur lequel sont connectés tous les équipements. Le choix s'est porté sur une tension normalisée non pour les véhicules électriques ou hybrides où les tensions peuvent être extrêmement variables mais en avionique. La tension de 270 volts se développe de plus en plus sur les avions militaires et civils. Le bus continu a donc été choisi à  $\pm 270 \text{ V}$ . La tension de 540V correspond au 230/400V alternatif redressé. La tension du bus continu est fixée par les batteries et peut donc varier entre 430 et 620 volts. Pour éviter tout problème d'instabilité, les générateurs sont pilotés en courant.

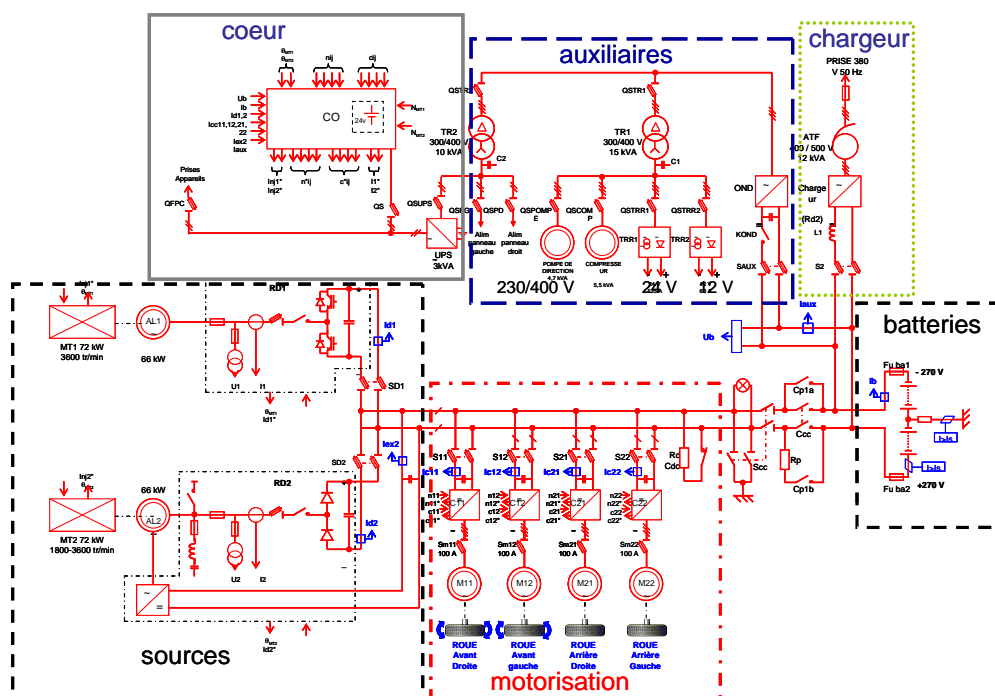


Figure 3 : Schéma unifilaire du Banc ECCE

Le schéma unifilaire de la figure 3 met en évidence les différentes protections et les sécurités qu'il a fallu mettre en œuvre. On peut noter en particulier les disjoncteurs pour relier les deux bornes du bus lorsqu'il est déconnecté des batteries et le système de recharge des capacités des convertisseurs. Le système ne peut fonctionner sans les batteries même si les générateurs fournissent la puissance nécessaire pour la motorisation et les auxiliaires.

Les caractéristiques des éléments principaux sont données dans l'annexe 1.

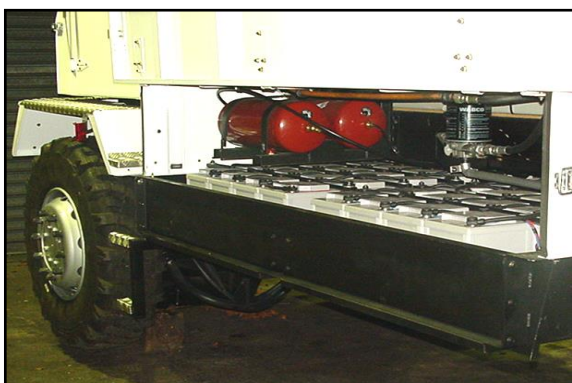
### 2.3. Fonction génération et stockage de l'énergie

Les deux générateurs sont entraînés par des moteurs diesel dont seule la commande a été modifiée pour que le point de fonctionnement (vitesse, couple) soit défini par le cœur. Le premier groupe électrogène tourne à la vitesse constante de 3600 tr/min. L'alternateur d'une puissance de 66kW, est à aimant permanent et le redressement est nécessairement commandé.

Le deuxième groupe fonctionne entre 1800 et 3600 tr/min ; la génératrice de puissance égale à 66kW est une machine dite généralisée<sup>1</sup>. Elle est triphasée au stator et au rotor et le contrôle de la tension et de la fréquence au stator est obtenue en modifiant le courant rotorique en fréquence et en amplitude via un convertisseur DC-AC.

Les deux machines sont pilotées en courant continu de sortie. Les consignes peuvent être liées à une optimisation globale de la consommation en carburant pour une puissance totale demandée par la motorisation, les auxiliaires et la batterie.

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. Les batteries imposent le courant maximal (462A ; 1min) dans les charges et le courant de recharge (20A) pour garantir une durée de vie satisfaisante.

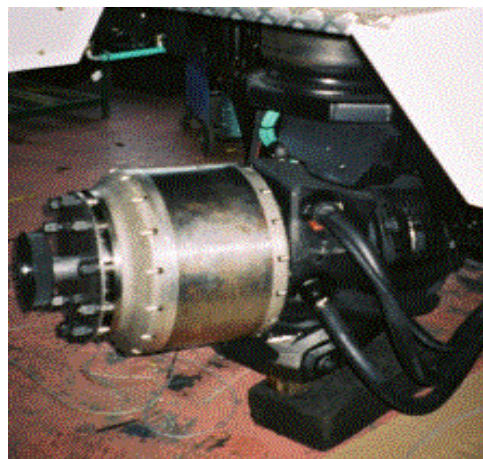


**Figure 4 :** Implantation des batteries

### 2.4. Motorisation

Chaque roue dispose d'un convertisseur alimentant un moteur pour sa propulsion en attaque directe. S'agissant d'un banc de test mobile, les quatre moteurs sont de nature différente mais avec la même puissance nominale de 30kW. Ainsi on a à l'avant, un moteur roue à aimants permanents avec une commande sinus et un moteur roue à aimants permanents à commande trapèze. Les aimants de ces moteurs sont montés en surface. A l'arrière on dispose d'un moteur asynchrone avec une commande vectorielle et d'un moteur synchrone à griffes à commande sinus. Les convertisseurs sont adaptés au type de moteur, seul est défini le niveau de commande en couple donc en courant.

Ce sont les moteurs avant qui ont les meilleures performances en particulier pour le couple de démarrage qui atteint 6 fois le couple nominal de 700N.m. Ces moteurs avant sont refroidis à l'huile au niveau des chignons.



**Figure 5 :** Moteur roue à aimants permanents

### 2.5. Auxiliaires

Certains auxiliaires sont indispensables pour le véhicule comme la pompe de direction, l'assistance de freinage, la suspension, ... D'autres sont liés à la partie électrique. Les convertisseurs et certains moteurs sont refroidis à l'eau ou à l'huile, d'autres à l'air, d'où la nécessité d'alimenter toutes ces pompes. Le choix s'est porté sur des constituants industriels alimentés en triphasé sous 400V. Un réseau alternatif 230/400V 50Hz a été créé, à partir de la batterie. Les tensions de 12V et 24V spécifiques aux poids lourds sont obtenues à partir de ce réseau alternatif. La consommation des auxiliaires est loin d'être négligeable puisqu'elle est de l'ordre de 20kW suivant le point de fonctionnement.

Un réseau indépendant a été conçu pour une alimentation sans coupure sur laquelle est connecté le cœur.

Le chargeur intégré au véhicule est constitué d'un autotransformateur et d'un convertisseur AC-DC dont la tension est contrôlée lors de la charge des batteries à partir d'un réseau triphasé classique 230/400V.

<sup>1</sup> Ce type de machine est utilisé de plus en plus dans les éoliennes



## 2.6. Gestion de l'énergie

La gestion de l'énergie a un double rôle : maintenir les batteries dans un état de charge adéquat de telle manière que l'énergie récupérée au freinage puisse être absorbée et définir les consignes en courant des deux alternateurs et par voie de conséquence les consignes d'injection pour les moteurs diesel d'entraînement. Le freinage électrique (actionné dans une première phase lors d'une action sur la pédale de frein) nécessite que la batterie ne soit pas totalement chargée car il n'a pas été prévu de résistance de freinage. Ainsi le SOC doit être maintenu entre 40 et 80%. Les courants de consigne  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  des deux alternateurs sont définis par une optimisation à partir des puissances demandées par les moteurs de propulsion et les auxiliaires, la tension du bus continu est connue à chaque instant.

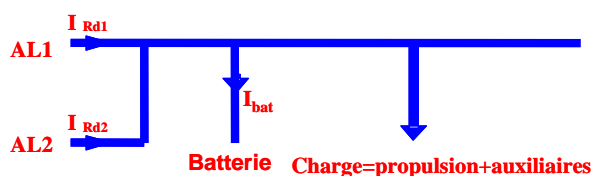


Figure 6 : Définition des courants de charge

Connaître l'état de charge de la batterie n'est pas chose facile car elle dépend de la température, de l'état initial et de la quantité de charge échangée et ce à chaque instant. La tension à vide et la température moyenne des batteries (avant toute opération) constituent les données initiales. La charge échangée est obtenue par intégration du courant de batterie.

## 2.7. Pilotage du Banc ECCE

Le deuxième rôle du cœur est de définir à chaque instant les consignes de couple des moteurs de propulsion. Ce point est complexe car il faut recréer un différentiel sous forme électronique. Les contraintes sont les mêmes que pour un différentiel mécanique : même couple sur un même essieu. De plus on ne dispose pas de la vitesse du véhicule ; on ne connaît que les vitesses de rotation des moteurs quelle que soit l'adhérence des roues. La vitesse du véhicule est obtenue grâce à l'utilisation de la logique floue sachant qu'une roue qui patine n'oppose qu'un couple résistant faible.

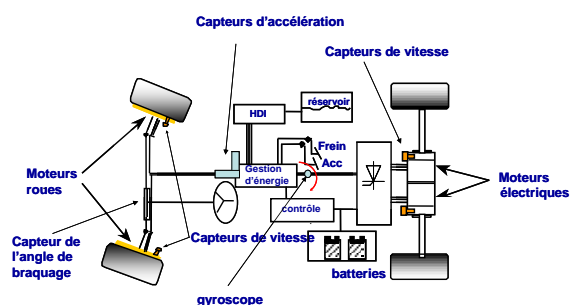


Figure 7 : Capteurs servant au pilotage du Banc ECCE

Le contrôle de chaque roue permet de mettre en œuvre l'ABS ; il en est de même pour l'ESP et le contrôle de trajectoires. Des capteurs complémentaires à celui de l'angle de braquage et aux capteurs de position des moteurs synchrones sont alors nécessaires comme des accéléromètres suivant les deux axes du véhicule.

## 2.8. Aspects sécurité et protections

La sécurité de fonctionnement est un point très délicat car il faut d'une part veiller à protéger les personnes et en particulier le conducteur, assurer les fonctions normales de conduite et protéger le matériel contre les défauts. Les fonctions de sécurité classique de tout véhicule lourd comme le freinage respectent les règles en vigueur. Le frein de parking est indépendant alors que le freinage électrique intervient avant le freinage mécanique qui est seul à même d'arrêter le véhicule. Les éclairages sont en tout point conformes aux normes.

La mise en œuvre au démarrage et à l'arrêt sont confiées à un automate piloté par le cœur de telle manière que le conducteur ne puisse faire une mauvaise manipulation tout en étant libre de choisir le type de motorisation, roues avant, roues arrière ou quatre roues. Il faut à titre d'exemple au démarrage prendre les mesures des conditions initiales de la batterie, définir si on est en mode zéro émission (si le niveau de la batterie le permet) ou non, charger les condensateurs des convertisseurs, vérifier les états des groupes électrogènes. Les phases de démarrage et arrêt du (des) groupe(s) électrogène(s) sont automatisées. A la mise à l'arrêt, il faut veiller à ce qu'un opérateur puisse intervenir en toute sécurité et donc que les condensateurs soient déchargés et que le bus soit court-circuité.

Le câblage et les protections respectent les normes même s'il n'y a pas pour le moment de textes spécifiques pour les véhicules électriques et hybrides de ce type.

Un autre point délicat concerne les protections contre les courts-circuits. Chaque équipement est protégé par des fusibles. Une mise à la terre en un point quelconque du circuit électrique doit être immédiatement détectée. Le point milieu des batteries n'est pas mis directement à la masse du véhicule mais à travers une résistance calibrée et dimensionnée suite à une large série de simulations. Il faut enfin que les perturbations conduites et rayonnées des différents convertisseurs ne puissent influencer la commande et les mesures.

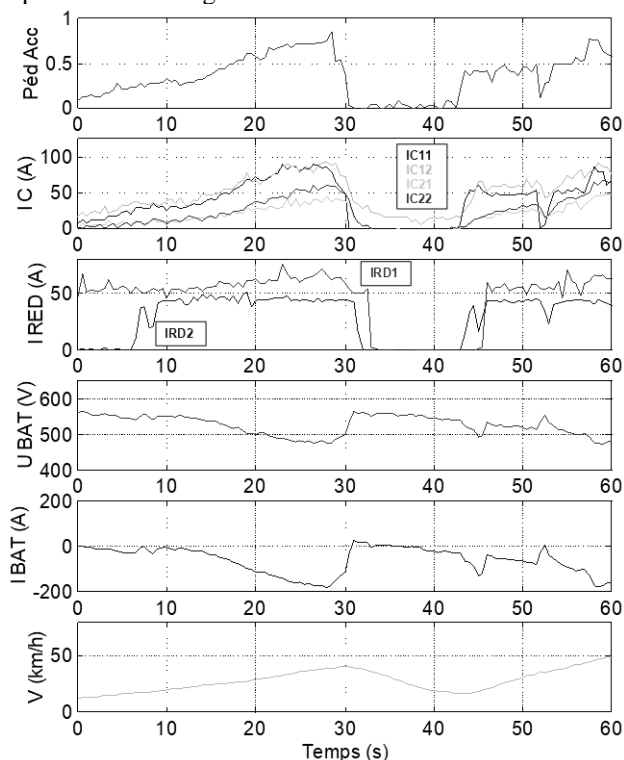
## 2.9. Exemple d'essais

Dans l'exemple présenté sur la figure 8, nous utilisons la stratégie de gestion d'énergie préconisée pour optimiser la consommation et les groupes électrogènes sont pilotés par le cœur. Le cycle d'essai est constitué d'une montée en vitesse jusqu'à 40km/h environ suivie d'une décélération puis à nouveau d'une phase d'accélération.

De  $t=0$  à  $t=7$ s seul le générateur 1 fonctionne ; le courant de batterie augmente lentement ( $I_b$  est compté positif quand la batterie reçoit du courant). A  $t=7$ s, le calculateur donne l'ordre de démarrer le générateur 2 et le courant dans la batterie s'annule. A  $t=12$ s les deux générateurs atteignent leurs valeurs limites (fixées ici arbitrairement pour l'essai) ; la batterie fournit le complément nécessaire.

A partir de  $t=28$ s la pédale d'accélération est relâchée progressivement ; le courant batterie diminue puis les générateurs 2 et 1 sont arrêtés respectivement à  $t=32$ s. La batterie se recharge légèrement. La deuxième phase d'accélération débute à  $t=42$ s. L'ordre de démarrer les deux générateurs intervient rapidement et ils prennent le relais de la batterie.

Nous n'avons présenté ici qu'une série d'essais mais ceux-ci peuvent être extrêmement variés sachant que tous les paramètres peuvent être modifiés à volonté pour un fonctionnement donné. Ces essais ont été réalisés sur un circuit privé sachant que le véhicule ne peut être homologué.



**Figure 8 :** Enregistrement durant une phase d'essais : pédale d'accélérateur, les 4 courants des convertisseurs moteurs, les courants délivrés par les générateurs, tension et courant de batterie, vitesse du banc ECCE

### 3. Banc ECCE Phase 2

La phase 1 a montré la faisabilité, la modularité et l'efficacité du Banc ECCE. Dans une deuxième phase, l'objectif est de tester différentes sources complémentaires respectant la règle des 3E :

- source permanente, pile à combustible
- source transitoire, alternateur inertiel
- source impulsioneille, supercondensateurs

Cette deuxième phase qui est encore en cours, fait l'objet d'un contrat avec la DGA. Les partenaires sont précisés dans l'annexe 3.

La mise en place de ces 3 sources ne peut se faire simultanément sauf pour les supercondensateurs qui sont localisés en dessous des batteries. Eu égard aux délais entre les deux phases, il a été nécessaire de faire un upgrade du cœur, de remplacer les batteries et d'assurer une maintenance approfondie des différents organes.

#### 3.1. Générateur Pile A Combustible (PAC)

Le programme générateur pile à combustible a été couplé avec le projet SPACT80<sup>2</sup>. Le système pile à combustible est composé de 2 stacks de type PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) de 110 cellules de surface active 760 cm<sup>2</sup>. Chaque PAC est alimentée en air et hydrogène. Un contrôleur interne gère le système PAC dans son ensemble (stacks, compresseur d'air, débitmètre, vannes...etc). Le refroidissement est à eau et les échanges de chaleur avec l'extérieur se font par l'intermédiaire d'un échangeur air-eau. La PAC est connectée au bus de 540V via un convertisseur DC/DC.

Sur la figure 9 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 9 :** Vue sur la PAC installée sur la plateforme du Banc ECCE

La figure 10 montre que le courant délivré par la PAC suit parfaitement la consigne délivrée par le cœur. Dans cet essai, la PAC fournit une puissance de 35kW au niveau du bus continu.

<sup>2</sup> Programme financé par l'ANR qui associe Hélium, FEMTO-ST, CEA, GREEN, INRETS, SNCF et DGA

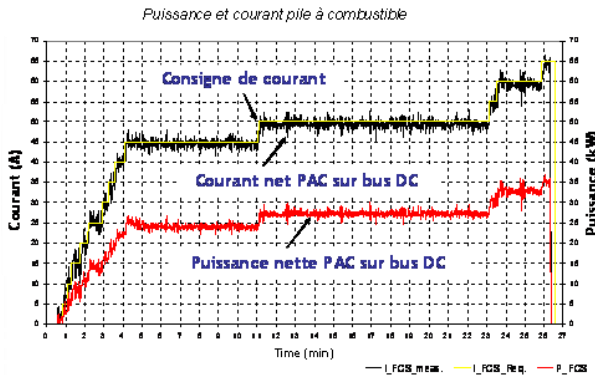


Figure 10 : Courant et puissance délivrés au niveau du bus continu du Banc ECCE

### 3.2. Supercondensateurs

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. Les 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. Un échangeur de chaleur externe est nécessaire.



Figure 11 : Vue sur des supercondensateurs

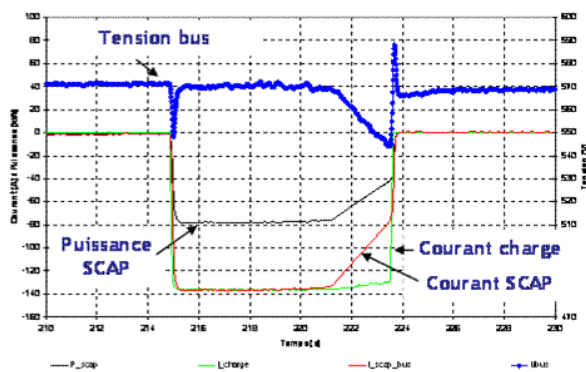


Figure 12 : Réponse à un créneau de puissance de 80kW

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 pic de tension du bus est inférieur à 10V sur les fronts positif

et négatif. Comme le montre la figure 12, suite à un créneau de puissance de 80kW, la tension du bus commence à chuter au bout de 6s. Le temps de réponse du système supercondensateurs est estimé à 60ms.

Dans une phase d'essai actuellement en cours, le comportement en phase de roulage de PAC et supercondensateurs d'une part et alternateur à aimants permanents et supercondensateurs d'autre part est étudié.

### 3.3. Alternateur inertiel

Les systèmes de stockage inertiels posent toujours des problèmes pour des véhicules en raison des effets gyroscopiques. Une solution classique consiste à utiliser un montage à cardan. Nous testons ici une autre solution avec deux alternateurs rapides en contrarotatifs. Ils sont entraînés par un moteur diesel. En raison de la très forte inertie, une boîte de vitesse est insérée pour le démarrage. Les vitesses nominales des alternateurs sont de 30 000tr/min et la puissance nominale est de 60kVA. Eu égard aux grandes vitesses, des protections mécaniques sont indispensables. Cette phase est la dernière à être mise en œuvre dans le projet.

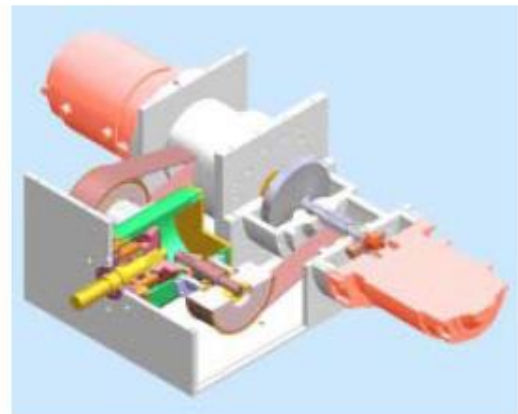


Figure 13 : Alternateurs inertiels contrarotatifs

### 3.4. Conclusion

Cette phase 2 du Banc ECCE est parfaitement complémentaire avec la première. L'accent était mis dans la première phase sur différentes motorisations et sur des sources en régime permanent. Dans cette deuxième phase, nous mettons en évidence l'intérêt des sources transitoires et impulsives. Les générateurs pile à combustible ne peuvent encore rivaliser avec les générateurs classiques en raison de la complexité du système et des limites actuelles pour le stockage d'hydrogène.

## 4. Les petites sœurs d'ECCE

Les véhicules hybrides, quelle que soit leur architecture, nécessitent des composants électriques pour la motorisation, pour le stockage de l'énergie et la commande. Il n'y a pas de solution unique ; il était donc



intéressant d'en tester un certain nombre sur le banc ECCE mais également dans le cadre d'autres projets.

#### 4.1. Les développements induits par ECCE

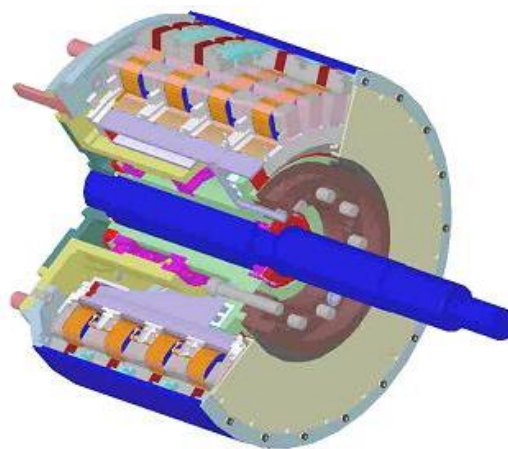


Figure 14 : Moteur à réluctance à flux transverse

ECCE a permis de tester les performances de quatre types de motorisations. D'autres configurations ont été étudiées avec les mêmes contraintes de volume, de tension d'alimentation, de puissance et de vitesse. Deux moteurs méritent d'être signalés. Le premier est un moteur roue à réducteur intégré. La vitesse élevée de rotation du rotor permet de réduire la taille du moteur et de loger dans le même encombrement un réducteur. La deuxième est un moteur type vernier à double réluctance avec excitation assurée par des aimants. Le trajet du flux est transverse ce qui complique beaucoup la réalisation. Le volume d'aimants est plus faible que pour le moteur roue décrit au à 2.4 mais la saturation des circuits magnétiques diminue fortement l'effet de réluctance et donc le couple maximum. Par contre la disposition permet d'augmenter la puissance en ajoutant des galettes élémentaires.

#### 4.2. PLATHEE

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 et groupe électrogène de faible puissance est une solution. La SNCF a initié un projet appelé PLATHEE<sup>3</sup> sur la base d'une locomotive de triage avec un groupe électrogène de faible puissance connecté sur un bus continu à 540V. Des batteries et des supercondensateurs sont utilisés pour fournir l'énergie transitoire et l'énergie impulsionnelle. La pile à combustible du programme SPACT80 a été testée dans le cadre de ce programme mais avec des contraintes différentes d'ECCE.

<sup>3</sup> Labellisé par le PREDIT

#### 4.3. Notion de poutre énergétique

La notion de poutre énergétique est liée aux sources. Il s'agit de regrouper dans un ensemble modulaire des sources permanente, transitoire et impulsionnelle sous des tensions normalisées pour alimenter des charges diverses. Une gestion intelligente de l'énergie permet de réduire le dimensionnement des composants dans le cas d'utilisations intermittentes.

#### 4.4. PHEBUS

Le programme PHEBUS<sup>4</sup> consiste à hybrider un quadricycle lourd. Par rapport au véhicule initial, l'avant est inchangé mais le moteur thermique est de puissance plus faible. Les moteurs électriques du type moteur roue, sont placés sur l'essieu arrière ce qui conduit à faire un couplage par la route. Il s'agit d'un full hybrid plug-in suivant la terminologie classique. Le fonctionnement à zéro émission est prévu pour la ville. La motorisation électrique peut servir de boost. La récupération de l'énergie au freinage est faite au moyen de supercondensateurs. La gestion de l'énergie pilote l'ensemble du fonctionnement du véhicule.

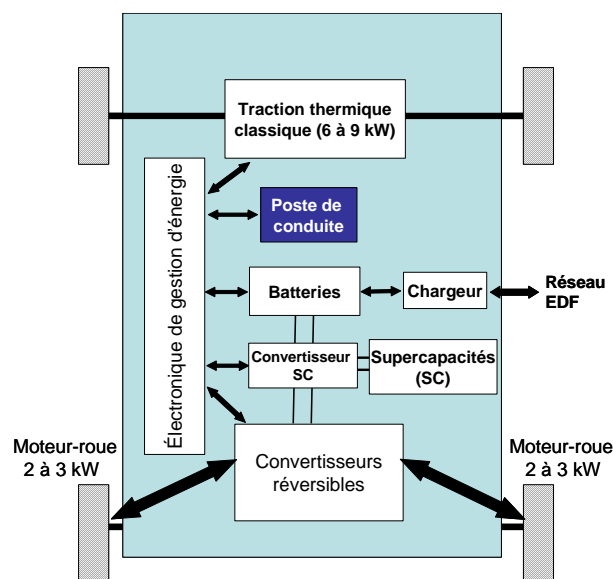


Figure 15 : Architecture du véhicule hybride PHEBUS

### 5. Conclusion

Le Banc ECCE constitue un ensemble extrêmement intéressant par ses possibilités de tests en conditions réelles de fonctionnement. Il permet également d'étudier la fiabilité des différents composants. Les points faibles sont d'une part au niveau de certains convertisseurs qui n'avaient pas nécessairement été conçus pour un fonctionnement roulant et d'autre part les connexions qui subissent également des contraintes fortes.

Le travail de partenariat a été remarquable et a permis de développer des solutions originales

<sup>4</sup> PHEBUS associe les sociétés AIXAM, Novelt  Système, CIRTEM et NSI et le laboratoire FEMTO-ST. Le projet est labellisé par le PREDIT et financé par l'ADEME.



susceptibles d'être reprises sur d'autres projets comme en témoignent les projets ultérieurs.

La phase 2 est encore en cours mais elle montre d'ores et déjà l'intérêt de certaines sources même si, comme la pile à combustible, elles ne sont pas encore susceptibles d'être mises en œuvre sur des applications commercialisables.

### Bibliographie

- [1] D. Diop, "Contribution à la gestion d'énergie d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique," Thèse de l'Université de Franche-Comté, juin 2004
- [2] A. de Bernardinis, "Etude et optimisation d'un ensemble alternateur à aimants / redresseur commandé. Application à un véhicule hybride", Thèse de l'INPL, Décembre 2000.
- [3] H. Godfroid, A. Mirzaian, D. Ramuz, "Machine synchrone pour procédés exigeants", *Revue Internationale de Génie Electrique*, HERMES editing, volume n° 1, 1998.
- [4] R. Pusca, "Contribution au pilotage d'une plate-forme mobile d'essais de constituants d'une chaîne de traction électrique", Thèse de l'Université de Franche-Comté, décembre 2002.
- [5] C.Espanet, J.-M.Kauffmann, R.Bernard, "Comparison of Two In-Wheel Permanent Magnet Motors for Military Applications", *VPPC'2006, IEEE Vehicular Power and Propulsion Conference*, Windsor, England, septembre 2006 6 pages
- [6] R.Pusca, Y.Ait Amirat, A.Berthon, J.M.Kauffmann "Control applied to hybrid electrical vehicle with four separate wheel drives. Fuzzy estimator of vehicle speed" *Vehicular Technology Conference 2001*, Atlantic City, October 8-10, 8 pages
- [7] C.Espanet, M.Tekin, R.Bernard, A.Miraoui, J.M.Kauffmann "A new structure of high torque motor destined to be integrated in a wheel" *5th International AECV Conference*, Angers, 2-5 June 2003 pp 19
- [8] K.El Kadri, A.Berthon "Modeling and simulation tool of a dual power energy system for hybrid vehicle design" *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 1 N. 3, pp 363-373, ISSN 1827-6660, July-August 2006
- [9] El Kadri Khadija "Contribution à la conception d'un générateur hybride d'énergie électrique pour véhicule : modélisation, simulation, dimensionnement" Thèse de l'Université de Franche-Comté, 27 novembre 2006
- [10] K. El Kadri, A. Berthon, J.M. Kauffmann, M. Amiet, "Simulation and test of a modular platform hybrid vehicle", *4th Symposium Hybrid Vehicles and Energy Management*, Braunschweig, Allemagne, Feb. 2007 PP187-206 ISBN 9783937655109.
- [11] Mulot, J., Harel, F., Bégot, S., Hissel, D., Rodel, I., Boblet, S., Amiet, M., "Fuel cell system integration into a heavy-duty hybrid vehicle: preliminary experimental results", *IEEE VPPC'10 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, 5 p., Lille, France, 2010.
- [12] Solano, J., Hissel, D., Péra, M.C., Amiet, M., "Practical Control Structure of a Heavy Duty Hybrid Electric Vehicle", *IEEE VPPC'10 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, 8 p., Lille, France, 2010.
- [13] Jevvrey, J., Harel, F., Bégot, S., Hissel, D., Rodel, I., Faure, V., Boblet, S., "Fuel cell system integration on a heavy-duty vehicle and development of a control strategy with real-time simulation", *IEEE VPPC'09 Vehicular Power Propulsion Conference*, CD-ROM, pp. 704-710, Dearborn, USA, 2009.

### Annexe 1 : Les caractéristiques principales du Banc ECCE

Les caractéristiques du Banc ECCE sont les suivantes ::

- Masse t : 13 tonnes,
- longueur: 6.2m, largeur: 2.24m, hauteur: 3.65m

- Vitesse maximale : 90 km/h
- Suspension pneumatique à correcteur d'assiette
- Jantes de 22"5
- 4 freins à disque à commande pneumatique
- Contrôle de trajectoire avec ESP, anti-patinage et ABS. .
- Bus continu :  $\pm 270V$
- Batteries : 90 éléments de 6V et 98Ah
- Moteurs diesel HDI de 75kW
- Alternateurs de Puissance nominale 66kW
- Alternateur à aimants permanents 3600tr/min
- Machine généralisée de 1800 à 3600tr/min,
- Transformateurs pour les auxiliaires : 15 et 10kVA
- Autransformateur pour la recharge sur le secteur : 12kVA
- Cœur : système dSpace et automate TSX3708
- Supercondensateurs : 2 packs de 30F sous 270V
- Pile à combustible : 2 stacks PEMFC de 110 cellules chacun ; surface active : 760 cm<sup>2</sup> / cellule

### Annexe 2 : Les partenaires de la phase 1

La gestion administrative a été assurée par le Crébel (Centre de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Belfort) alors que la responsabilité scientifique et technique avait été confiée à Alstom Power Conversion qui s'appelle maintenant Converteam et à la DGA.

Les différentes tâches ont été réparties comme suit :

- conception et réalisations mécaniques, SNAA-AUVERLAND devenu Panhard ;
- Bus continu et cœur : L2ES (Laboratoire Systèmes, Electrotechnique et Electronique) à Belfort, qui fait partie maintenant de FEMTO-ST ;
- Conception des moteurs, L2ES, Novelté Système (Belfort) et Alstom Power Conversion (Nancy) ;
- Réalisation des machines tournantes : Alstom Power Conversion (Nancy) et CEN (Nancy) ;
- Alternateur à aimant permanent et convertisseur associé : GREEN (Groupe de Recherche en Electronique et Electrotechnique de Nancy), CEN ;
- Convertisseurs des moteurs avant, GREEN
- Alternateur à vitesse variable, Alstom Power Conversion (Belfort) et L2ES ;
- Gestion de l'énergie, INRETS (LTE - devenu aujourd'hui IFSTTAR ) et L2ES ;
- Protections et sécurité, SNAA, Alstom Power Conversion (Belfort) et L2ES ;
- Essais, L2ES.

Le financement a été assuré par la DGA, les Régions de Franche-Comté et Région Lorraine (CR, CG Meurthe et Moselle et District Grand Nancy) et les partenaires du projet

### Annexe 3 : Les partenaires de la phase 2

Les partenaires de la phase 2 réunis autour de l'Université de Franche-Comté qui est propriétaire du banc ECCE sont FEMTO-ST, Panhard et Hélicon (pour la partie PàC). La phase 2 fait l'objet d'un contrat DGA.

## La locomotive du futur

**JEAN-CHARLES LAMURE, PIERRE CHAPS, SAMUEL HIBON**  
**ALSTOM Transport**

**Résumé :** *Futur, présent, passé : voici un train dont la locomotive est l'expérience ! Il est aussi passionnant que vital de bâtir l'avenir à la lumière de l'évolution du système ferroviaire et des moyens de traction en particulier. Il est aussi primordial de saisir avec précision l'évolution de la demande de transport et des contraintes de tous ordres. L'ensemble de cette démarche est modestement décrit au travers de cette brève note. Elle a pour objectif de montrer que la locomotive du futur existe : le futur est présent parce que le passé est connu.*

### 1 – Quelques repères historiques

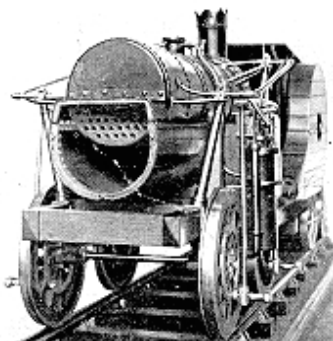
Le chemin de fer existe depuis le XVI<sup>e</sup> siècle, utilisé dans les mines de charbon ou de potasse, en Alsace par exemple. La traction ou la pousse, est assurée par l'homme ou l'animal.



1550 - Mine alsacienne de Leberthal.

Denis PAPIN construit la première « machine à vapeur » en 1671, transformant l'énergie de la vapeur en énergie mécanique.

Il faut attendre 1802 pour que la première « locomotive » transformant l'énergie de la vapeur d'eau en énergie mécanique motrice soit construite par Richard TREVITHICK. Elle utilise la « voie ferrée ». 1829 : Marc SEGUIN en France, met en service une locomotive de forte puissance à chaudière tubulaire.



1829 - Locomotives à chaudière tubulaire de Marc SEGUIN

Ainsi, la vapeur règnera sur tous les réseaux du monde et jusqu'en 1973 en France.



Locomotive 241P construite au Creusot (SFAC)<sup>1</sup> en 1949

La « vapeur » a quatre handicaps :

- rendement très faible (5%) et consommation de combustible de qualité,
- nuisances et pollution par rejet de fumées,
- maintenance très lourde.

Les ingénieurs travaillèrent au développement de l'électrotechnique appliquée à la traction. En 1879, SIEMENS construit la première locomotive électrique, certes de puissance modeste – 30 kW –, mais promise à un bel avenir notamment pour les transports urbains. Il ne s'agissait pas en effet de substituer la pollution engendrée par les chevaux des « omnibus diligences » par celle de la vapeur ! Le moteur est dérivé directement de la « dynamo » inventée par GRAMME en 1871.



Train électrique de SIEMENS et HALSKE à l'exposition de Berlin en 1879

La traction électrique se développe sur les réseaux ferroviaires du monde entier, notamment ceux qui disposent d'énergie électrique naturelle provenant des ressources hydrauliques (Suisse, Autriche, Réseau du Midi en France, par exemple).

<sup>1</sup> SFAC : Société des Forges et Ateliers du Creusot

(Usines Schneider)

Les atouts de l'électricité en matière de performances, rendement énergétique et absence de pollution et nuisances en font une concurrente telle qu'elle sonnera le glas de la vapeur à partir des années 1950. La ligne Paris Dijon Lyon est électrifiée en 1952.

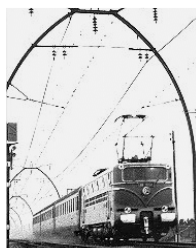


*Inauguration de l'électrification Paris Dijon Lyon - 24 juin 1952*

Performance et vitesse se concrétisent par les records successifs réalisés par les chemins de fer français en 1954 (243 km/h) et 1955 (331 km/h).



*CC 7121 (243 km/h)  
Février 1954*



*BB 9004 (331 km/h)  
Mars 1955*

La grande vitesse connaît une étape marquante en 1962 par la mise en service commerciale de la liaison Paris Toulouse avec le « Capitole » à 200 km/h.

Dès 1965 débutent les études d'un prototype de rame à grande vitesse appelée « TGV 001 » qui, en 1972, atteint 318 km/h. Il est propulsé par des turbines à gaz entraînant un alternateur alimentant des moteurs électriques de traction.

1981 : mise en service de la liaison à grande vitesse en traction électrique, Paris Sud Est, grâce aux rames TGV du même nom. L'une d'elles bat le record à 380 km/h le 25 février 1981. A ce jour plusieurs rames ont franchi le cap des 10 millions de kilomètres parcourus !

La « famille » s'agrandit avec le TGV Atlantique sur Paris Le Mans Bordeaux et la Bretagne. 1991 : un nouveau record est établi en à 515 km/h.

2007 : ouverture de la ligne à grande vitesse « Est » ; nouveau record de vitesse à 574,8 km/h le 3 avril !



## 2 – La locomotive et ses concurrents

Après ce bref aperçu historique, il convient de situer la locomotive dans l'ensemble des véhicules ferroviaires. Avec l'extension des transports urbains, notamment du métro, la locomotive fait place à des véhicules dont l'espace est exclusivement dédié aux voyageurs, les équipements techniques se situant sous caisse ou en toiture. En d'autres termes, la traction est « répartie » sur tous les véhicules d'une « rame » et non plus d'un « train ». Il en est ainsi du tramway et du métro ou des rames automotrices de transports régionaux, voire même des Automotrices à très Grande Vitesse : « AGV ».

## 3 – La locomotive : pour quoi ?

Il lui est demandé d'exercer l'effort de traction et de disposer de la puissance pour circuler à une vitesse donnée sur longues distances au profil varié (plaine et montagne) en tête de trains lourds de marchandises (fret). Si le tonnage est très élevé plusieurs locomotives en assurent la traction : c'est l'Unité Multiples (ou UM). Les chemins de fer en Chine tractent des trains très lourds avec six locomotives réparties le long du train, mais pilotées par un seul conducteur en tête.

D'autres tâches sont du domaine de la locomotive : faire évoluer un train – le constituer ou le répartir - aux abords des terminaux (ports, centres multimodaux où plusieurs moyens de transport se côtoient (routes, canaux). Il lui est alors demandé de fournir des efforts importants à basse vitesse.

Il reste aussi des relations assurées à moyenne ou grande distance par des trains de voyageurs lorsque la grande vitesse n'existe pas. Et justement ces trains roulent à des vitesses de l'ordre de 200 km/h. De très nombreux pays dans le monde en donnent l'exemple.

## 4 – Quelques ordres de grandeur

Les divers moyens de traction sont utilement classés selon les effort et vitesse dont ils sont capables, et leur puissance installée :



- tramway : 700 kW
- automotrice banlieue, inter-villes :  
2000   4000 kW
- locomotive : 6000 à 9500 kW
- rame à grande vitesse : 8000 à 11000 kW

Tous ces véhicules utilisent l'adhérence roue acier sur rail acier. L'énergie nécessaire pour vaincre le frottement au niveau des contacts roues – rails est très faible, plaçant ainsi le transport ferroviaire au plus haut rendement énergétique de tous les moyens de transport, terrestres, aériens et maritimes.

## 5 – L'énergie de traction

Elle alimente le véhicule moteur selon deux moyens :

- soit par une ligne électrique de contact
- soit grâce à un générateur autonome embarqué à bord du véhicule. Les années 1930 ont vues l'application du moteur à combustion interne (Diesel). Il entraîne un générateur électrique (alternateur) alimentant des moteurs électriques de traction comme pour un engin de traction électrique.

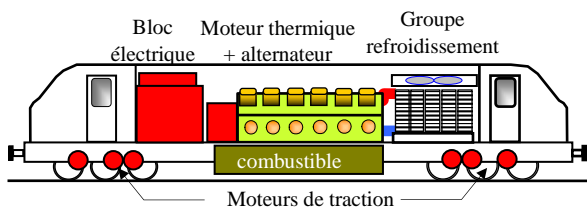


Diagramme de locomotive à traction autonome

Les performances de la traction autonome sont nettement inférieures :

- rendement du moteur thermique faible (33%),
- maintenance importante,
- nécessité de réserver un volume, donc un poids, pour la réserve de combustible et l'évacuation des pertes calorifiques,
- autonomie limitée,

La traction autonome est très utilisée dans les contrées à faible densité industrielle (continent américain par exemple) ne disposant pas d'une infrastructure suffisamment dense de distribution d'électricité en haute tension.

## 6 – Systèmes d'alimentation électrique

Durant plus d'un siècle, la traction électrique a repos  sur l'emploi du moteur à courant continu à collecteur (dynamo de Gramme). Ses caractéristiques sont bien adaptées grâce au fort couple au démarrage et à la grande plage de variation de vitesse : tout ce qu'il faut pour remorquer un train !



Caractéristique « Couple – Vitesse » du moteur à courant continu (excitation série)

Naturellement un tel moteur doit être alimenté sous tension continue. Ainsi les réseaux de chemin de fer ont-ils largement été électrifiés sous 600 Volts, puis 1500 Volts ou 3000 Volts. D'autres réseaux ont jugé préférable de l'alimenter sous tension alternative élevée (15 kVolts)   basse fréquence (16,7 Hertz) diminuant les pertes en ligne. En 1951, la France développe la tension monophasée (25 kV) en fréquence industrielle – celle de tout le monde – Le succès est tel que ce système devient la norme universelle.

Il résulte de cette évolution une grande hétérogénéité des systèmes, de sorte que les frontières «  lectriques » se superposent à celles des pays. En voici quelques exemples :

- Courant continu :

1500 V : France, Pays-Bas

3000 V : Belgique, Italie, Espagne, Maroc.

- Courant alternatif monophasé :

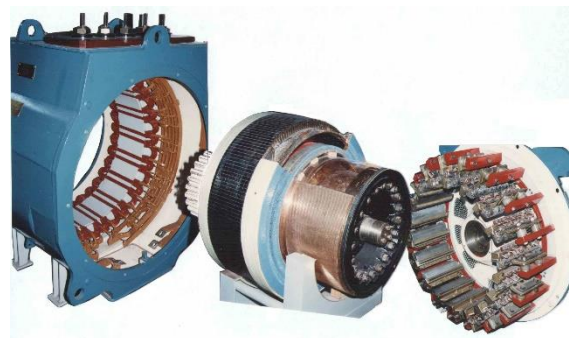
15 kV 16,7 Hz : Allemagne, Suisse, Autriche, Norvège, Suède.

25 kV 50 Hz : France, Danemark, Chine, Inde, Corée, Russie.

## 7 – Electrotechnique, électronique, informatique à bord de la locomotive

L'évolution de la technologie de traction est en phase avec celle de l' lectrotechnique.

Le moteur de traction à courant continu est complexe, donc coûteux en termes de fabrication et de maintenance.



Inducteur

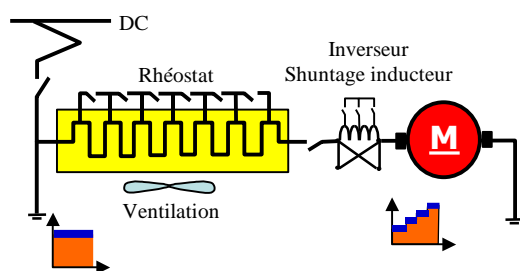
Induit et collecteur balais

Couro ne porte-balais

Moteur à courant continu



Il exige un schéma d'alimentation et de réglage basé sur de très nombreux composants électromécaniques (rhéostat, contacteurs, etc.)



Alimentation du moteur à courant continu par rhéostat

Le développement de l'électrification sous 25 kV en fréquence industrielle a été concomitant avec celui des semi-conducteurs au silicium.

La **diode** permet le redressement du courant alternatif et il devient possible d'alimenter des moteurs à courant continu.



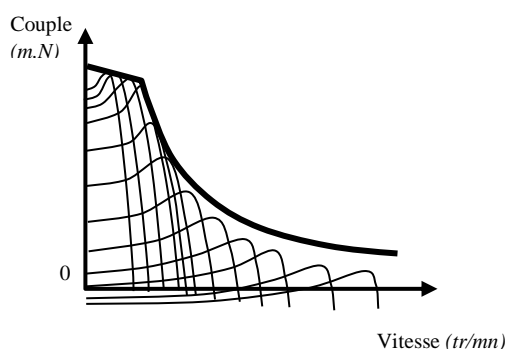
Diode



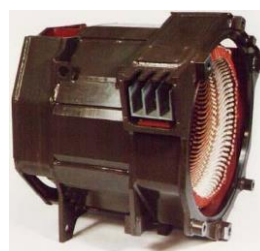
Thyristors

Le **thyristor** – diode dont l'amorçage est commandé par la gâchette – permet le redressement et le réglage continu de la valeur moyenne du courant. Il est même possible de l'utiliser pour régler la valeur moyenne du courant sous tension continue : c'est la « hacheur ». Le réglage par « crans » des graduateurs, rhéostat de démarrage et contacteurs de couplage des moteurs est éliminé. L'utilisation de l'adhérence roue rail est considérablement améliorée puisqu'il n'y a plus d'à-coup d'effort.

Une autre révolution permise par les semi-conducteurs est la possibilité de « fabriquer » une tension triphasée à fréquence variable et d'obtenir ainsi une courbe enveloppe identique à celle du moteur à courant continu :



L'emploi d'un moteur à induction (synchrone ou asynchrone) est donc possible. De conception beaucoup plus simple, le rotor n'ayant plus de contact électrique comme le collecteur, son coût et sa maintenance sont très réduits. A partir des années 1970, il se généralise et permet l'accroissement des puissances et des vitesses dans des proportions saisissantes. Que l'on en juge : de 4000 kW, une locomotive de 85 tonnes est capable de 6000 kW, soit +50 % en l'an 2000 !



Stator

Rotor à cage d'écureuil



Moteur asynchrone

Une ouverture majeure se profile : la chaîne de traction est faite de modules – redresseur, hacheur, onduleur – et permet l'alimentation de l'engin sous différentes tensions d'alimentation : les frontières électriques disparaissent ! Un simple diagramme l'illustre :

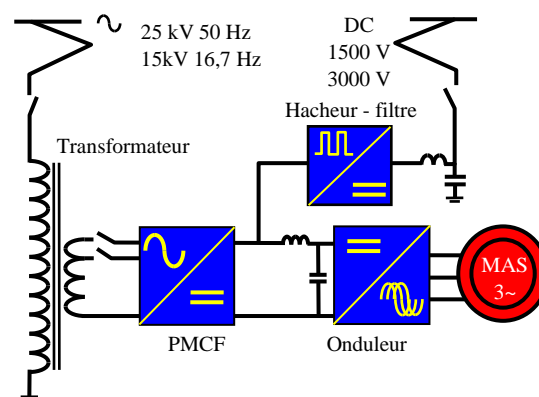
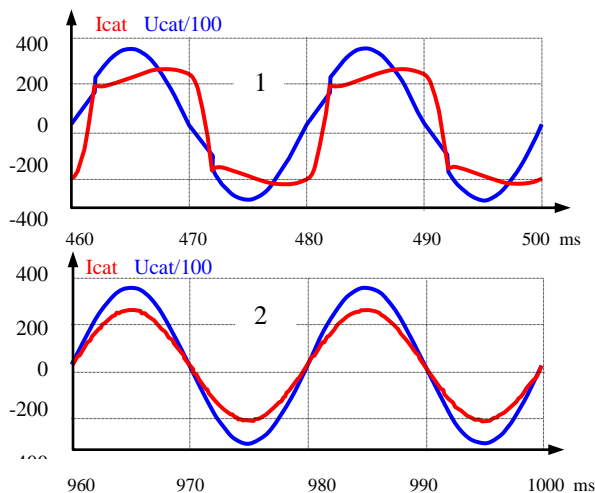


Schéma d'alimentation multi tensions

Le développement du transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) à partir des années 2000, apporte une solution au problème des harmoniques de courant engendrées par le déphasage courant/tension créé par l'amorçage du thyristor. L'amorçage d'un IGBT est possible à fréquence élevée avec une très faible énergie, de sorte que le découpage est numérisé et se rapproche d'une sinusoïde parfaite.



Comparaison des formes de tension et courant aux bornes d'un redresseur :

1 - pont mixte thyristors

2 - pont monophasé à commutation forcée (PMCF)   IGBT

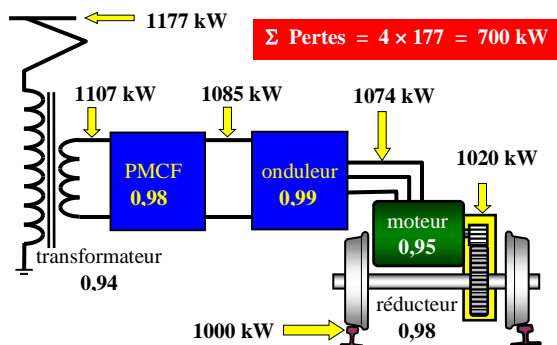
Une telle évolution a été possible grâce au développement de la commande des composants de puissance. En dix années les circuits analogiques, cabl  s à base de composants discrets, ont fait place à la commande par microprocesseurs, de sorte qu'elle est entièrement informatisée. Les avantages en sont évidents :

- fréquences de commande plus élevées,
- précision des contrôles,
- pertes très faibles,
- fiabilité accrue,
- maintenance aisée.

## 8 – Parlons Rendement

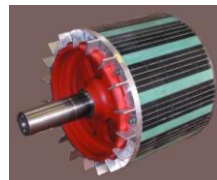
C'est l'argument majeur du coût d'exploitation : rapport entre l'énergie consommée et celle qui sert effectivement à produire le travail escompté.

Pour 4000 kW répartis sur quatre essieux, 700 kW de pertes sont à évacuer :



Les gains possibles, permettant d'acro  tre un rendement global déjà excellent de la chaîne de traction électrique (de l'ordre de 83 %), concernent :

- le moteur de traction synchrone à aimants permanents, déjà utilisé sur des tramways ou en automotrice à grande vitesse. Son rendement atteint 96 %. Comme il est auto ventilé, le groupe de refroidissement est supprimé ;



Rotor de moteur synchrone à aimants permanents

- le transformateur, actuellement à colonnes, pourrait être à supraconducteurs, voire à haute fréquence, et atteindrait le rendement de 97 %.



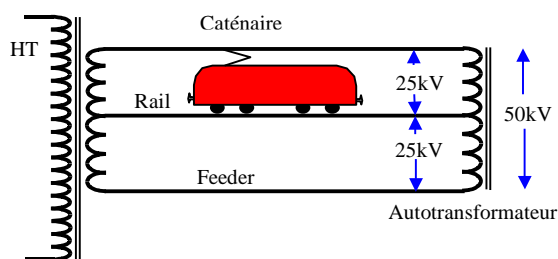
Transformateur à supraconducteurs

Le freinage contribue largement à l'amélioration du rendement grâce à l'emploi de la « récupération » d'énergie. L'inertie du train entr  ine les moteurs de traction devenant générateurs ; le courant ainsi produit est renvoyé en ligne pour être réutilisé. Le moteur synchrone à aimants permanents est capable de cette propriété jusqu'à l'arrêt. L' conomie est considérable à trois points de vue :

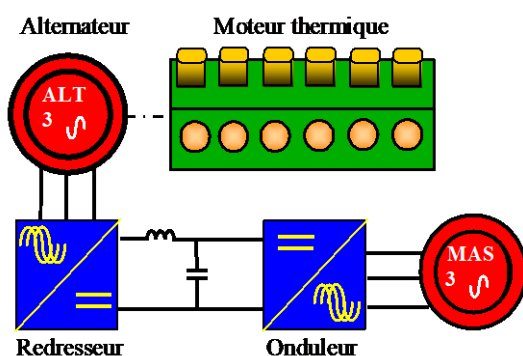
- effort de freinage beaucoup plus progressif qu'un freinage mécanique, améliorant ainsi le confort des passagers
- plus de bruit ni de rejets de particules résultant du frottement
- maintenance réduite des organes de freinage.

Il reste à adapter les sous-stations d'alimentation de la ligne pour qu'à leur tour elles soient capables du transfert de cette énergie au réseau. La sous-station réversible est développée dans ce sens.

Ajoutons que l'alimentation en 25 kV est dotée d'un dispositif permettant le transport de l'énergie en  $2 \times 25$  kV, soit 50 kV, réduisant ainsi les pertes par effet Joule en ligne. Le schéma ci-après intègre un transformateur dont le secondaire est à point milieu ; ses deux bornes extrêmes sont ainsi alternativement à + 25 kV et - 25kV :

Schéma d'alimentation en  $2 \times 25 \text{ kV}$ 

La traction autonome bénéficie de tous les développements précédents. Elle est schématisée ainsi :

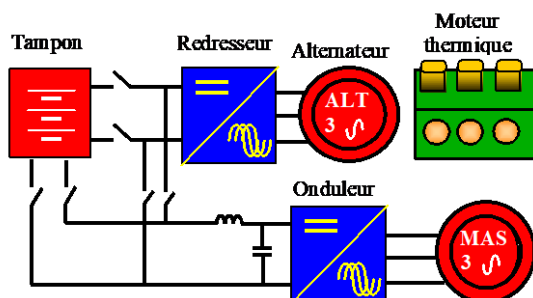


Chaîne de traction autonome

Les modules de conversion intègrent les mêmes composants que la chaîne de traction électrique.

L'une des particularités importantes d'un engin à traction autonome est l'utilisation du moteur thermique dont le rendement est fonction directe de la puissance développée : d'autant plus faible que la puissance est plus réduite. Or sur un parcours donné, un fort pourcentage est effectué à  $P < P_{\text{nominale}}$ . Dans le cas d'une forte utilisation à puissance faible, la solution développée est « hybride » :

- le moteur thermique est sous dimensionné
- un tampon d'énergie est installé : batteries, super capacités, etc.
- en forte demande de puissance, le tampon comble le manque
- lors des surplus de puissance, le tampon est rechargé



Une telle configuration est particulièrement adaptée au service des manœuvres ou évolution en gare de triage des wagons de marchandises ou pour les installations portuaires de transit.

## 9 – La locomotive de demain

Les premières locomotives sont déjà arrivées au Maroc. Elles bénéficient des dernières technologies.

Locomotive PRIMA II



L'interopérabilité entre réseaux couvre deux autres fonctions essentielles :

- la conduite
- la sécurité et la signalisation

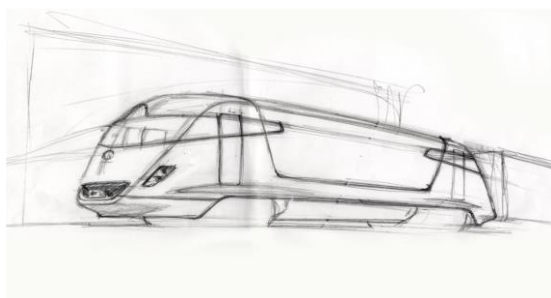
La conduite doit être assurée par le personnel de tous les opérateurs. En conséquence, le pupitre est uniformisé de sorte que toutes les commandes et écrans de suivi sont homologués.



Pupitre de conduite universel

La sécurité des circulations est basée sur un système de signalisation qui, du fait de l'histoire des chemins de fer, est différent selon les réseaux. Grâce à la norme ERTMS (European Railway Transport Managing System) les dispositions au sol et embarquées sont en cours de mise en place de sorte que la sécurité soit assurée sur toutes les lignes européennes.

## 10 – La locomotive du futur



Elle est et sera le fruit de fortes innovations en tous domaines.

Nous avons d  j cité le transformateur à supra conducteurs. Les semi conducteurs au carbure de silicium donnent de grands espoirs pour leur application à la haute tension. Ils pourront alors remplacer le transformateur.

Dans le domaine de l'énergie, d'importants progrès sont à réaliser pour que sa consommation soit parfaitement réglée pour la réduire. Il ne peut-être demandé au conducteur de concentrer son attention sur ce paramètre au détriment de l'observation de la ligne ; une assistance automatisée à la conduite sera développée dans ce sens. En outre des progrès majeurs sont mis en œuvre pour améliorer considérablement le confort du conducteur : bruit très réduit, climatisation, ergonomie.

Les sous-stations de traction sont, pour beaucoup d'entre elles, vétustes datant des années 1950. L' lectrification en 1500 V continu est loin d'être la meilleure solution en termes de rendement du fait des courants très importants en ligne donc des chutes de tension élevées. Une modernisation par le passage en 2 à 25 kV et la possibilité de transformer l'énergie récupérée en freinage s'impose donc.

La circulation des trains – l'exploitation – nécessite la connaissance en temps réel de la position des engins circulant. Le repérage permanent par GPS en est le moyen. De même l'état de fonctionnement de chaque engin doit être connu vingt quatre heures sur vingt quatre. Ainsi les dispositions pour la maintenance sont prises afin de minimiser le temps nécessaire à la remise en   tat. La programmation des circulations est de plus en plus cruciale pour obtenir en toutes circonstances, la fluidité du trafic.

Les domaines environnementaux sont nombreux et vitaux pour que le chemin de fer contribue fortement à la démarche de protection. Citons en premier lieu le bruit. Le roulement ferroviaire a, nous l'avons dit, un atout majeur en terme énergétique, il a par contre un handicap de taille concernant le bruit engendré par le roulement de la roue en acier sur le rail en acier. Le véhicule n'  st pas seul à ce sujet mais bien acteur avec la voie. La roue « silencieuse » se développe pour atteindre une nette atténuation du bruit de roulement. L'exemple des rames de tramways aux roues comportant un intermédiaire élastique entre table de roulement et moyeu est probant.

Autre source de bruit : le freinage et en particulier à basse vitesse. La capacité du moteur synchrone à aimants permanents de freiner en récupération jusqu'à l'arrêt, se généralisera.

## 11 – Conclusion

Le chemin de fer, en constante évolution, a permis le bouleversement de ses performances. Il est en mesure de contribuer à la demande de transport dans des proportions comparables à celle de la société.

Les développements à opérer sont encore très nombreux : fixons nous le rendez-vous de la prochaine décennie pour les mesurer.



## 3E.I, une publication pédagogique de la SEE

- La revue 3 E.I. :**  
**3 dossiers par an,**  
**très complets,**  
**à la pointe**  
**de l'actualité**  
[Prévisions]

- The image displays three overlapping covers of the journal "La Revue 3E.I.", issue N° 62, September 2010. The covers are white with a blue and red color scheme. The title "La Revue 3E.I." is prominently displayed in large, stylized letters. The covers feature various technical diagrams, including circuit boards, electrical components, and a map of France. The text "16 e année" is visible on the left side of the top cover. The bottom cover includes the text "Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE" and "ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE". The bottom cover also features the logo of the "Société de l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication".



A retourner à la SEE - Service Abonnements, 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France - Fax : 33 (0)1 5690 3719

Date, signature et cachet s'il y a lieu :

Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent. Contacter le Service Abonnements de la SEE

