

Document de prospective SEEDS

18 mai 2007

SEEDS – GdR N° 2994
Jean-Pierre Rognon
G2Elab ENSIEG - BP 46
38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

Hervé Morel
AMPERE, INSA Lyon, Bât L. de Vinci
69621 Villeurbanne Cedex

<http://seedsresearch.eu>

Note :

Ce document doit être considéré comme une base et sera enrichi par les débats des 29 et 30 mai 2007 à Supélec.

Nombre d'exemplaires imprimés: 150.

Téléchargeable: <http://seedresearch.eu>

Table des matières

A- Introduction.....	6
A.1- Vers une meilleure efficacité énergétique	6
A.1.a- Quelques données factuelles.....	6
A.1.b- Quelques tendances.....	8
A.1.c- En résumé.....	8
A.2- Références.....	9
B- Matériaux innovants et leurs applications pour le génie électrique.....	10
B.1- Contexte général.....	10
B.2- Verrous	10
B.3- Actions.....	11
B.3.a- Enjeux, verrous et recherches à mener.....	11
B.3.b- Moyens technologiques et humains disponibles.....	11
B.3.c- Situation.....	12
C- Conception et optimisation des dispositifs de conversion de l'énergie électrique	13
C.1- Les convertisseurs électroniques de puissance.....	13
C.2- Intégration des systèmes de puissance.....	14
C.2.a- Introduction.....	14
C.2.b- Matériaux et procédés d'élaboration pour l'intégration de puissance	16
C.2.c- Conception des systèmes intégrés de puissances.....	16
C.2.d- Gestion thermique globale.....	17
C.2.e- Fiabilité des assemblages.....	18
C.2.f- Intégration fonctionnelle monolithique.....	18
C.2.g- Architecture et technologie hybride des systèmes.....	19
C.3- Les convertisseurs électromécaniques.....	20
C.3.a- Intérêts et usages des convertisseurs électromécaniques.....	20
C.3.b- Conception des convertisseurs électromécaniques.....	21
C.4- Actions.....	22
C.4.a- Enjeux, verrous et recherches à mener	22
C.4.b- Moyens technologiques et humains disponibles.....	24
C.4.c- Résultats attendus	24
C.4.d- Situation.....	24
C.5- Références.....	25
D- Transmission d'énergie électrique et CEM.....	29
D.1- Contexte général.....	29
D.1.a- Transmission d'énergie par ondes électromagnétiques HF.....	29
D.1.b- CEM.....	30
D.2- Enjeux-verrous	31
D.3- recherches à mener.....	31
D.3.a- CEM.....	31
D.3.b- Transmission de l'énergie électrique sans contact.....	33
D.4- Actions.....	33
E- Sûreté de fonctionnement des dispositifs de conversion de l'énergie électrique	35
E.1- Contexte général et enjeux.....	35
E.2- Verrous et recherches à mener.....	36
E.2.a- Composants électroniques de puissance.....	36
E.2.b- Constituants.....	36
E.3- Actions.....	37
E.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles.....	37
E.3.b- Situation.....	37

E.4- Références.....	38
F- Production d'électricité - Systèmes énergétiques autonomes ou semi-autonomes (Bâtiments, sites isolés, réseaux embarqués).....	40
F.1- Contexte général et enjeux.....	40
F.1.a- La production d'électricité.....	40
F.1.b- Les bâtiments.....	40
F.1.c- La cogénération.....	41
F.1.d- Les systèmes et réseaux embarqués.....	41
F.2- Verrous et recherches à mener	42
F.2.a- Equipements, unités de génération et de stockage d'électricité	42
F.2.b- Entités énergétiquement autonomes ou semi autonomes	43
F.2.c- Systèmes de transports et réseaux embarqués.....	44
F.3- Actions.....	45
F.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles.....	45
F.3.b- Situation.....	45
F.4- Références.....	46
G- Réseaux électriques de transport et de distribution.....	48
G.1- Remarques préliminaires.....	48
G.2- Contexte général.....	49
G.2.a- La production « décentralisée »	49
G.2.b- Optimisation de l'énergie transférable.....	50
G.2.c- Le contexte socio-économique.....	50
G.3- Enjeux.....	50
G.3.a- Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité. .	50
G.3.b- Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée :.....	51
G.3.c- Infrastructures critiques.....	52
G.4- Verrous et recherches à mener.....	52
G.4.a- Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité .	52
G.4.b- Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée.....	53
G.4.c- Infrastructures critiques	53
G.5- Actions.....	55
G.5.a- Moyens technologiques et humains disponibles.....	55
G.5.b- Situation.....	55
G.6- Références.....	57
H- Santé - Environnement.....	58
H.1- Le vecteur électricité dans les domaines de la santé (ou en relation avec la santé).....	58
H.1.a- Applications de l'électricité dans les domaines de la santé.....	58
H.1.b- Conséquences de l'utilisation de l'électricité sur la santé des personnes.....	60
H.2- Recherches à mener impliquant des verrous significatifs,	60
H.2.a- Domaine de l'environnement.....	60
H.2.b- Domaines de la santé (ou en relation avec la santé).....	61
H.3- Actions.....	62
H.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles.....	62
H.3.b- Situation.....	63
H.4- Références.....	64
I- Contributions.....	67
Index.....	68
J- Annexes à diffusion restreinte.....	73
J.1- Prospective HVHT: Applications à haute tension et/ou à haute température pour l'intégration de puissance.....	74

J.1.a- Synthèse.....	74
J.1.b- Contour et applications.....	76
J.1.c- Points durs et enjeux scientifiques.....	76
J.2- Fiabilité: conception globale élargie à la fiabilité prédictive.....	81
J.2.a- Objectifs.....	81
J.2.b- Rappel sur la notion de fiabilité :.....	81
J.2.c- Les objectifs visés par une approche fiabilité.....	82
J.2.d- Problèmes à résoudre et points risquant d'être bloquants.....	84
J.2.e- Critères de défaillance pris en compte :.....	84
J.2.f- Recensement des moyens matériels :	85
J.2.g- ressources humaines.....	86
J.2.h- Recensement des logiciels de modélisation :.....	86
J.2.i- Conclusions :.....	87
J.3- Matériaux et procédés pour l'intégration hybride de puissance.....	87

A- Introduction

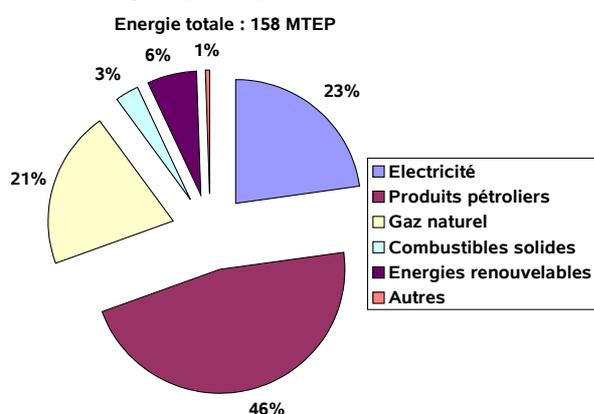
A.1- Vers une meilleure efficacité énergétique

A.1.a- Quelques données factuelles

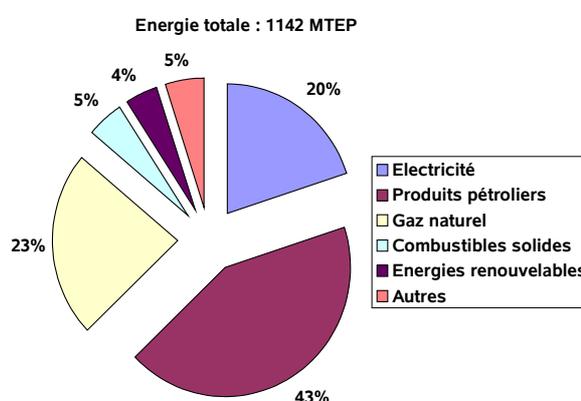
L'électricité représente actuellement en France 23% (420 TWh ou 35,8 MTeP¹ [Tonnes équivalent Pétrole]) de l'énergie disponible pour la consommation finale, évaluée à 157,9 MTeP (Sources Eurostat - Chiffres 2004). C'est la deuxième source d'énergie après les produits pétroliers (46%) et devant le gaz naturel (21%), les énergies renouvelables [non converties en électricité] (6%) et les combustibles solides (3%).

A titre de comparaison, sur l'ensemble de l'Europe des 25, l'électricité est la troisième source d'énergie disponible pour la consommation finale avec 20% de l'énergie totale (1142 MTeP).

FRANCE - Energie disponible pour la consommation finale



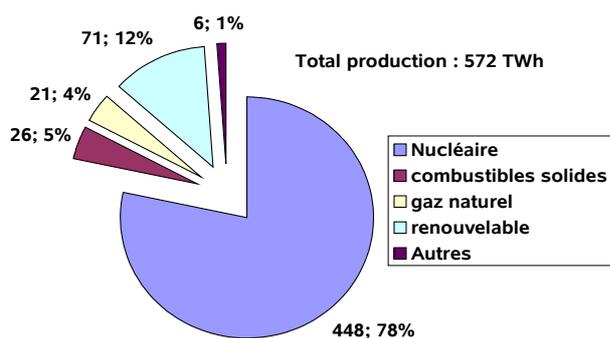
EU 25 - Energie disponible pour la consommation finale



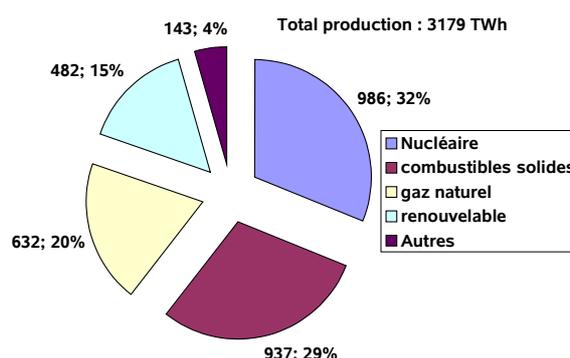
Le nucléaire est la source d'énergie primaire la plus importante dans l'électricité produite en France avec 78% des TWh produits. Les énergies renouvelables, essentiellement l'hydraulique, arrivent en deuxième position avec 12%.

La situation moyenne européenne est très différente comme le montre le graphique ci-dessous

FRANCE - Contribution des différentes sources d'énergie dans la production d'électricité



EU25 - Contribution des différentes sources d'énergie à la production d'électricité



Compte tenu des rendements des différents modes de production et de la méthode d'établissement des bilans énergétiques, la part de l'énergie primaire totale disponible en France qui est consommée pour produire de l'électricité est de 49% (135 MTeP sur un total de 274 MTeP, permettant de générer 572 TWh bruts soit un rendement moyen de 36%)

Dans l'Europe des 25, cette part est de 39% (690 MTeP sur un total de 1747 MTeP permettant de générer 3180 TWh, soit un rendement moyen de 40%)

¹ 1 TeP = 11,7 MWh

Les pertes électriques (consommation des auxiliaires, pertes des transformateurs de centrales) représentent entre 4 et 5% de l'énergie brute produite

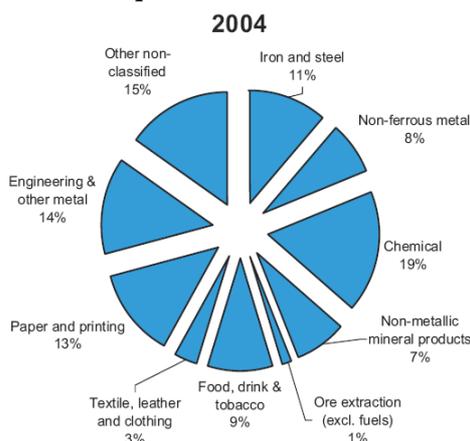
Les pertes de transport et de distribution représentent globalement entre 6% et 7% de l'énergie brute produite, ce qui correspond en France à 32 TWh. Elles sont proportionnellement beaucoup plus importantes dans la distribution que dans le transport.

En France, l'électricité utile est consommée

- à 64,8% dans l'habitat (150 TWh) et les services (120 TWh) (premier rang des sources d'énergie finale devant le gaz naturel).
- à 32,2% dans l'industrie (idem)
- à 3% dans les transports

Ces chiffres sont respectivement de 56%, 41% et 3% dans l'Europe des 25.

La répartition de la consommation électrique dans l'industrie en Europe est résumée ci-dessous.



Dans l'industrie en France, la motorisation représente le poste de consommation principal de consommation de l'électricité (69%) devant les applications thermiques (15,5%) et les autres usages, dont l'éclairage (16,5%).

Dans le résidentiel les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, produits bruns, petits équipements, froid et lavage) représentent le poste principal de consommation de l'électricité (46%), devant le chauffage (32%) et la production d'eau chaude (22%)

Dans le tertiaire les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, climatisation en particulier) représentent le poste principal de consommation de l'électricité (74%) devant le chauffage (15%) et la production d'eau chaude (11%)

Dans les applications de transport pour lesquelles l'électricité n'est pas l'énergie disponible pour la consommation finale (transport terrestre, aéronautique et maritime), un nombre croissant d'équipements électriques sont installés pour réaliser des fonctions nouvelles, de confort en particulier, ou en remplacement d'autres solutions technologiques (actionnement ou propulsion par exemple). Le « plus électrique » est l'évolution technologique qui consiste à remplacer des actionneurs hydrauliques et/ou pneumatiques par des actionneurs électriques (Avion plus électrique, ...). Cette démarche apporte un gain de la masse embarquée et donc une réduction significative de la consommation d'énergie primaire.

On peut tirer une première série de constats de ces données factuelles

- l'électricité est un vecteur énergétique incontournable,
- Au niveau de la production d'électricité, les trois voies de progrès concernent les sources d'énergie primaire (développement du renouvelable), l'efficacité énergétique du parc de production (cycles combinés, cogénération en particulier) et la réduction de la consommation des auxiliaires et des pertes des interfaces de conversion,
- Les pertes de transport et surtout de distribution de l'électricité peuvent être réduites en

- développant largement la production distribuée et locale d'une part, en optimisant la gestion des transferts énergétiques sur les réseaux existants d'autre part,
- Il existe un grand potentiel de gains énergétiques dans les usages de l'électricité. A titre d'exemples :
 - On évalue à 43 TWh l'énergie qui peut être économisée dans l'industrie en systématisant la variation de vitesse et à 5 TWh en améliorant l'efficacité des moteurs,
 - Des gains allant jusqu'à 40% sont envisageables pour tous les appareils utilisés dans le résidentiel,
 - La marge de progrès dans l'éclairage est considérable (plus de 50% et sans doute davantage avec les diodes électroluminescentes),
 - Outre l'intérêt que peut présenter l'électrification de certaines fonctions (fiabilité, facilité de contrôle ...), le gain énergétique peut également être significatif. A titre d'illustrations l'équipement de navires de « pods » électriques peut permettre d'économiser jusqu'à 10 GWh par an et par navire ; le remplacement du coupleur hydraulique après le four par un moteur électrique dans une cimenterie de 5000 t/jour peut permettre d'économiser 4,2 GWh par an.

Et bien évidemment,

- Le changement des comportements, dans l'usage de l'électricité en particulier, peut avoir un impact très significatif sur la consommation énergétique globale.

Ces constats sont largement repris dans le livre vert de la commission européenne sur l'efficacité énergétique

A.1.b- Quelques tendances

Les scénarii prédisent une augmentation des parts de marché de l'électricité dans le mixe énergétique. A titre d'exemple le scénario cité par le livre vert sur l'énergie de la commission européenne fait état des chiffres suivants :

Pourcentages d'évolution de l'énergie finale consommée en Europe sur 2000-2030 (dont Électricité)

En global : +25% (+58% pour l'électricité) pour une consommation d'énergie primaire en augmentation de 15% et un PIB en augmentation de 79%

Dont :

- Habitat : +29% (+83%)
- Services + Agriculture : +41% (+75%)
- Industrie : +19% (+34%)
- Transport : +21% (3%)

L'augmentation prévue par la commission européenne de la consommation électrique reste cependant très inférieure à l'augmentation du PIB, consécutivement à des effets de saturation, mais surtout d'hypothèse d'économie d'énergie et d'amélioration des rendements.

A.1.c- En résumé

L'électricité est un vecteur intermédiaire, exigeant et souvent incontournable de transport, de distribution et d'utilisation finale de l'énergie. Son poids économique important et croissant, et les potentiels de progrès décelables à tous les niveaux, de sa production à ses usages, justifient qu'un important programme de recherches lui soit consacré.

Les recherches relatives au vecteur électricité doivent en particulier concourir à rendre performante et accessible la production distribuée d'électricité à partir de sources d'énergie primaire renouvelable, à garantir au consommateur final une électricité à faible coût énergétique et environnemental, dans des conditions de disponibilité et de qualité optimales, à améliorer de

manière significative le rendement et le bilan écologique et économique des dispositifs de conversion (électronique de puissance et électromécanique en particulier), et à rendre possible la substitution par l'électricité d'autres solutions énergétiques partout où le gain énergétique ou environnemental le justifie.

Parmi les grands domaines à approfondir, citons par exemple, les propriétés fonctionnelles des matériaux, la conception de dispositifs de conversion à haut rendement, compacts, capables de tenir des niveaux de tension et de courant divers et des environnements, l'optimisation des architectures (électriques ou multi-énergies), le contrôle et la gestion optimale d'énergie, l'analyse des cycles de vie, la sûreté de fonctionnement et la maîtrise des nuisances.

Les travaux de recherche devront porter sur les matériaux et les phénomènes physiques, les dispositifs (génération, conversion, contrôle et usages de l'électricité) et les entités fonctionnelles (unités de production et de stockage d'énergie raccordées au réseau, réseau de transport et de distribution d'électricité, entités autonomes ou semi-autonomes [sites isolés, îles en particulier, bâtiments, unités industrielles, réseaux embarqués]).

A.2- Références

Commission Européenne

- **Green Paper for a European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy**
COM (2006) 105 final – 08 Mars 2006
- **Annex to the Green Paper for a European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy -What is at stake - Background document**
COM (2006) 105 final
- **Fuelling our Future** : Memo du Green Paper for a European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy
- **Comment Consommer Mieux avec Moins : Livre vert sur l'efficacité énergétique**
COM(2005) 265 final - 22 juin 2005
 - **European Energy and Transport - Trends to 2030 – update 2005**
Publication prepared by the Institute of Communication and Computer Systems of National Technical University of Athens (ICCS-NTUA), E3M-Lab, Greece, for the Directorate-General for Energy and Transport
22 May 2006 - ISBN 92-79-02305-5
 - **Scenarios on energy efficiency and renewable**
Publication prepared by the Institute of Communication and Computer Systems of National Technical University of Athens (ICCS-NTUA), E3M-Lab, Greece, for the Directorate-General for Energy and Transport
12 July 2006 - ISBN 92-79-02652-6

Eurostat

- **Bilan de l'Energie – Données 2003-2004**
2006 - ISBN 92-79-02063-3
- **Energie : Statistiques annuelles – Données 2004**
2006 – ISBN 92-79-02064-1

Académie des Technologies

- Communication à l'Académie des Technologies : « Prospective sur l'Energie au XX^{ième} siècle »
17 Février 2004

B- Matériaux innovants et leurs applications pour le génie électrique

(Caractérisation, modèles et mise en œuvre)

B.1- Contexte général

Le développement technologique actuel, situe la communauté [EEA](#) en général et le génie électrique en particulier au coeur de beaucoup des ruptures technologiques. Ces ruptures passent très souvent par la maîtrise des propriétés des matériaux existants, des nouveaux matériaux et des fonctionnalités nouvelles. La thématique matériaux a donc pris une place importante, depuis de nombreuses années, dans les laboratoires de génie électrique.

Il existe aujourd'hui des matériaux potentiellement intéressants : [semi-conducteur grand gap](#) (SiC, GaN, Diamant), Supraconducteurs HT, matériaux à haut pouvoir magnétocalorique, matériaux diélectriques à haute permittivité, nanomatériaux, matériaux actifs (magnétostrictifs, piézoélectriques, rhéologiques), matériaux magnétiques doux à hautes performances en terme de pertes à des fréquences intermédiaires, matériaux thermoélectriques, etc. Ces matériaux se trouvent au cœur de la plupart des développements actuels voire des ruptures technologiques.

Leur maîtrise, notamment en terme d'efficacité énergétique et de développement durable, depuis la matière première en passant par la formulation, la mise en œuvre, la caractérisation jusqu'à leur intégration dans le système final est essentielle. Tout particulièrement dans le contexte actuel de globalisation, de compétitivité et de développement durable et écologique. Toutes les communautés scientifiques et tout particulièrement celle du génie électrique sont concernées.

De multiples exemples peuvent être cités :

- gain de masse dans les systèmes embarqués (transports et spatial),
- compacité des systèmes dans le contexte des nanotechnologies,
- compatibilité des composants dans le biomédical,
- amélioration de l'efficacité dans un contexte d'isolation thermique, électrique, magnétique, acoustique, etc.
- optimisation des développements durables et écologiques.

De manière plus quantitative, nous pouvons citer à titre d'exemple, la [consommation des moteurs électriques](#) et des systèmes associés. Cette consommation dans l'industrie française s'élève à environ 90TWh soit environ les deux tiers de la consommation électrique totale dans l'industrie (ADEME). Une optimisation des systèmes motorisés, dont les matériaux sont une composante essentielle, engendrerait des économies très importantes d'énergie.

B.2- Verrous

Le domaine des matériaux pour le Génie électrique est vaste et riche. Les verrous se situent à plusieurs niveaux, de l'élaboration jusqu'au système en intégrant les contraintes spécifiques à chaque application. Nous pouvons énumérer les plus importants dans lesquels la pertinence de la connaissance et de la caractérisation dans les systèmes est une constante :

Performances fonctionnelles

- matériaux intelligents (capteurs) pour la sécurité et le confort,
- diélectrique à conductivité électrique maîtrisée et variable,
- haute perméabilité, haute permittivité, saturation magnétique élevée,
- supraconducteur à haute température critique,
- matériaux à conductivité thermique maîtrisée.

Tenue aux conditions extrêmes

- matériaux à haute température, basse température, haute tenue mécanique, haute tenue électrique,
- synergie des contraintes (magnétique, électrique, thermique, mécanique),
- prédiction du vieillissement de la durée de vie et de la fiabilité dans un contexte de maintenance prédictive,
- modélisation de la complexité et des interactions.

Elaboration et mise en œuvre dans l'application

- maîtrise de la recyclabilité, agro-matériaux
- Éco-matériaux: matériaux dont le mode de fabrication économise l'environnement et l'énergie (eco-diélectrique)
- nanodispersion dans les nanocomposites
- maîtrise des propriétés individuelles et collectives des nanorenforts
- technologies d'intégrations 3D des matériaux

B.3- Actions

B.3.a- Enjeux, verrous et recherches à mener

Pour faire sauter les verrous, il est nécessaire de se fixer des objectifs scientifiques ainsi que des objectifs technologiques, ceci dans le cadre d'un équilibre pertinent entre recherche fondamentale et recherche appliquée.

Les recherches développées doivent s'orienter vers :

- le vieillissement et les conditions extrêmes
- la synergie des contraintes (magnétique, électrique, thermique, mécanique)
- les nanomatériaux (diélectriques, magnétiques doux et durs)
- les nouveaux matériaux à propriétés spécifiques
- la modélisation

B.3.b- Moyens technologiques et humains disponibles

Il n'existe pas à l'heure actuelle de plate-forme technologique "matériau" dans la communauté du Génie Électrique. Ce qui doit nous inciter fortement, à court terme, à renforcer les collaborations avec la communauté "matériau non génie électrique" aux niveaux national, européen et international.

Concernant les moyens humains, nous disposons d'environ 20% des effectifs des laboratoires fondateurs et associés à SEEDS.

Les résultats attendus sont de deux types : scientifiques et technologiques.

Parmi les résultats scientifiques nous pouvons citer la connaissance des matériaux et des marges de progrès sur le procédé, les performances et la mise en œuvre, les développements de modèles multi-physiques.

Concernant les résultats technologiques, il faut dégager les matériaux les plus porteurs en terme d'impact sur les performances des dispositifs ou d'intérêt pour de nouvelles applications, améliorer les caractéristiques des matériaux existants, trouver de nouveaux matériaux, montrer la faisabilité de certaines applications tout en intégrant la conception et la réalisation de nouveaux systèmes, etc.

B.3.c- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

Peu couvert: 2

2) Nom des programmes nationaux et internationaux concernés – liens

ANR en particulier "Matériaux et procédés", Programmes régionaux, 6^{ème} et 7^{ème} PCRD, OTAN.

Remarque : nous pouvons souligner dans cette partie que dans le domaine des matériaux il y a peu de programmes qui concernent l'application génie électrique. Il faut plus de visibilité dans l'appel d'offre, il faut des financements conséquents qui permettent d'amorcer des projets d'envergure ou de développer des niches technologiques réalistes.

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance [3 : dans la moyenne]) : 3

4) Disciplines concernées

La thématique matériaux concerne la plupart des disciplines.

C- Conception et optimisation des dispositifs de conversion de l'énergie électrique

(Convertisseurs électroniques de puissance et convertisseurs électromécaniques)

C.1- Les convertisseurs électroniques de puissance

Les convertisseurs électroniques de puissance sont la clé de l'adaptation, du contrôle et de la gestion fine de l'énergie électrique à tous les niveaux de la chaîne de conversion énergétique utilisant le vecteur électricité. Exemples : interfaces des systèmes de production décentralisée avec les réseaux, interfaces entre réseaux de natures différentes, systèmes de contrôle de gestion et d'échanges d'énergie dans les réseaux ([FACTS](#), Conversion AC/DC, stockage...), alimentation et contrôle des actionneurs électriques et électromécaniques ... A chaque niveau de puissance correspond un type de convertisseur particulier.

Les convertisseurs électroniques sont aussi un élément clé du déploiement de solutions plus électriques notamment dans le domaine du transport, de l'éclairage ou de produits grand public. Le marché des convertisseurs de puissance est en forte augmentation et en forte évolution (au niveau des applications donc des niveaux de tension, courant, puissance, température, encombrement, masse) : Les composants de puissance représentent 30% du marché des semi-conducteurs, marché estimé en hausse de volume et montant avec le déploiement des nouvelles solutions énergétiques.

Les industries utilisatrices de convertisseurs de puissance exigent des dispositifs à faible coût, à fort rendement énergétique, très compacts et à fiabilité maîtrisée.

Le gain en efficacité énergétique peut globalement être très élevé et pour un impact très favorable sur l'environnement. Exemple : Internet repose sur des logiciels mis en œuvre dans des Centres de Calcul (data centers) très gourmands en énergie électrique. L'augmentation de 1% du rendement des convertisseurs électriques représente une manne de plus de 1.3TWh par an en Europe (EU-25). Des convertisseurs de tension à 98% d'efficacité énergétique ont été démontrés en laboratoire : ils utilisent des composants spécifiques pour l'instant ([SiC](#)) et une optimisation très poussée pour un point de fonctionnement. La prolifération des convertisseurs de puissance au sein de la chaîne énergétique (plus 100 pour une puissance de près de 15 kW dans les voitures en 2010) impose que l'efficacité énergétique de chaque convertisseur soit optimale mais sans détrimement de l'intelligence de ces convertisseurs ni de leur capacité à absorber des surcharges ou à fonctionner en régime dégradé en cas de panne au long de la chaîne.

Dans le domaine des transports, c'est notamment à travers l'intégration de puissance du convertisseur statique et de son environnement (filtrage ...) que des gains en encombrement et en masse sont attendus, les gains de masse pouvant se solder par des gains en consommation énergétique pour les systèmes embarqués, aéronautiques et spatiaux en particulier.

Dans le domaine de l'éclairage, le convertisseur de puissance va permettre d'augmenter le rendement de la conversion électro-optique particulièrement vis-à-vis des dispositifs halogènes ou à décharge. La principale économie sociétale d'énergie est liée à la capacité à moduler la puissance optique, encore une possibilité permise à l'aide d'un convertisseur de puissance. 20% de l'énergie électrique mondiale l'est dans l'éclairage, et plus de 45% de cette part pourrait être gagnée. Cela nécessite des convertisseurs capables de fonctionner à haute température et de gérer de fortes tensions, pour un coût industriel faible.

C.2- Intégration des systèmes de puissance

C.2.a- Introduction

L'intégration de puissance désigne les différentes technologies utilisées pour obtenir des convertisseurs compacts. L'intégration peut se faire directement sur l'actionneur. La technologie des [bus-barres](#) est largement utilisée pour les fortes puissances. L'intégration hybride s'illustre dans les modules à IGBT. L'intégration monolithique est aujourd'hui utilisée dans les alimentations des téléphones portables.

A toutes les échelles de la chaîne liée à l'énergie électrique sera présente l'électronique de puissance au sens large, dont une des finalités industrielles est de produire les dispositifs nécessaires à chaque étape de la chaîne. Ces dispositifs doivent participer à une meilleure efficacité énergétique mais également à un changement du comportement de consommation, pour obtenir une baisse globale de la consommation électrique.

Le succès de la mutation depuis l'énergie d'origine fossile vers le plus électrique, ainsi que la survie économique de l'industrie de l'électronique de puissance passent par un certain nombre de contraintes qui ont toutes un dénominateur commun : l'intégration tri-dimensionnelle².

Dans ce contexte, le pôle SEEDS/ISP3D tend à proposer une perspective de recherche en réponse aux questions suivantes :

Vers quoi doivent tendre les dispositifs industriels de l'électronique de puissance? A quel terme?

Quelles finalités pour ces dispositifs?

Quels objets de recherche seront représentatifs de ces futurs dispositifs?

Quel périmètre pour le pôle? Quelles thématiques de recherche?

Quels écarts par rapport aux équipes internationales?

Quelles relations entretenir avec d'autres thématiques ou cercles de compétences?

Quelles propositions de structuration de la recherche ? Quels projets structurants?



L'industrie de l'électronique de puissance fixe à 10 ans la nécessité de disposer d'une technologie 3D fiable de fabrication des dispositifs de puissance. Nous estimons qu'un tel objectif, autant sur le plan technologique que technique, nécessitera des recherches jusqu'à l'horizon 2020. La figure ci-dessous étale quelques éléments-clefs de cette recherche, avec leurs développements dans les sections qui suivent.

Le pôle ISP3D rassemble des chercheurs dont les compétences permettent de couvrir les 6 champs retenus pour structurer la synergie au sein de la communauté de chercheurs :

- Matériaux et procédés d'élaboration
- Conception
- Architecture et technologie hybride des systèmes
- Gestion thermique globale
- Intégration fonctionnelle monolithique
- Fiabilité des assemblages

Par ailleurs, le pôle ISP3D se rapprochera de la communauté des mécaniciens dont les compétences seront nécessaires dans le cadre des travaux autour de la fiabilité.

À côté de ces thématiques, le pôle a choisi un démonstrateur à court terme autour des architectures entrelacées : celles-ci sollicitent autant les dispositifs actifs que passifs et trouvent leur intérêt dans une intégration 3D. Les éléments pratiques suivants sont prévus :

2 L'un des principaux messages d'une réunion européenne sur l'efficacité énergétique (Bruxelles, 7 Février 2007) est que *l'électronique de puissance doit être plus innovantes en termes d'intégration : plus de mécatronique, plus de densité de puissance, plus de fiabilité, plus de fabrication coopérative.* (voir www.seedsresearch.eu, News)

- Étude et réalisation d'une puce multi-bras (intégration fonctionnelle)
- Étude de matériaux et procédés pour le cofrittage de coupleurs magnétiques
- Connexion planaire (sans fil) des dispositifs actifs et passifs
- Fiabilité prédictive et analyse de défaillance
- Prédiction de la CEM conduite et rayonnée

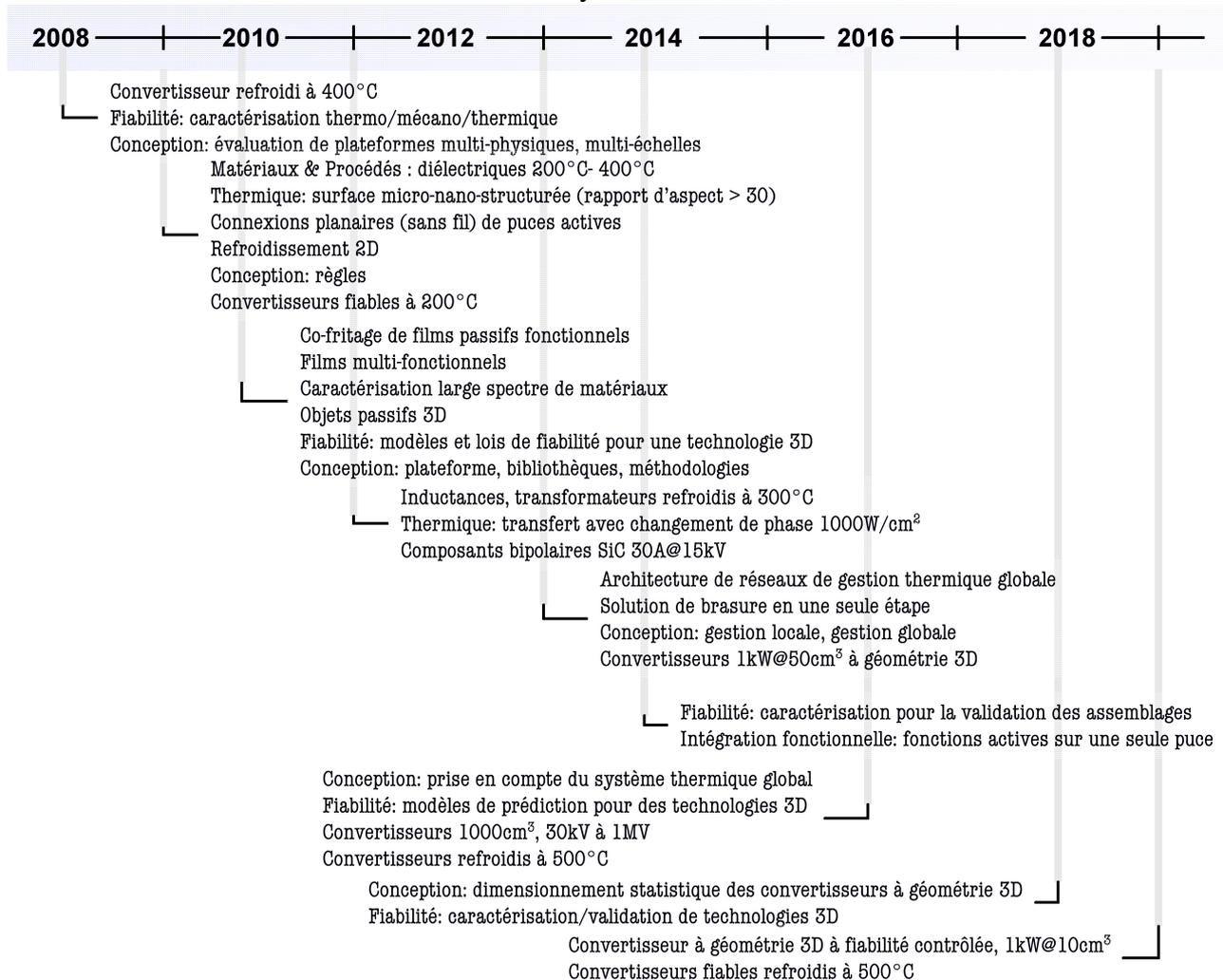


Fig. 1: roadmap pour les technologies d'intégration de puissance

C.2.b- Matériaux et procédés d'élaboration pour l'intégration de puissance

La prospective autour des matériaux et de leurs procédés d'élaboration est piégée par la difficulté de s'extraire d'un raisonnement par couche. Par ailleurs, la faible attraction pour ces problématiques ne suscite qu'une faible interaction avec les autres thématiques.

- Il est néanmoins clair que le premier axe de développement concerne l'amélioration des performances des matériaux dans le cas de couplages bi-dimensionnels physiques : électrique/thermique, électrique/magnétique...
- Des procédés d'élaboration collaboratifs sont disponibles et c'est un travail de réglage des procédés en relation avec les performances des matériaux qui est nécessaire.
- Les matériaux nécessitent des caractérisations plus pertinentes que par l'excitation harmonique.
- Des matériaux d'interface y compris pour les brasures seront nécessaires dès que des solutions de technologies 3D seront imaginées.

C.2.c- Conception des systèmes intégrés de puissances.

Par conception, il faut entendre un ensemble cohérent, validé expérimentalement et implanté suffisamment du point de vue logiciel, pour rendre utilisable des démarches d'analyses virtuelles, guidées par des règles et en suivant des méthodologies éprouvées. Pratiquement la conception se voit sous la forme d'outils logiciels, de bibliothèques de modèles et d'algorithmes de calcul et d'optimisation.

L'intégration 3D, sources de couplages exacerbés et peu séparables, rend l'affaire complexe. On peut considérer dans un premier temps que c'est la géométrie 3D le plus important et prendre les matériaux comme des degrés de liberté. Les efforts de recherche doivent alors couvrir les étapes suivantes :

- Formalisation du cahier des charges.
- Ensemble de méthodologies, c'est-à-dire n-uplets d'outils, méthodes et modèles utiles à un objectif de conception.
- Emergence d'une démarche globale cohérente : la conception est partagée de manière très fragmentaire, et un souci de synergie doit précéder les nouveaux efforts.
- Préférer des règles de conception plutôt que l'optimisation
- Tourner les interactions physiques en une fédération de problèmes locaux (faire abstraction des matériaux), puis considérer les interfaces pour des optimisations entre domaines physiques 2 à 2, et itérer de proche en proche pour gagner vers la globalité. Cette approche pose des verrous
 - en termes d'échelle de représentation,
 - en terme de méthodologies,
 - en terme d'outils (outils multiples avec passerelles ?)
 - en terme de validation des limites de précision à chaque étape.
- Reconsidérer un effort en terme d'informatique à l'image de l'effort consenti dans la mise au point de technologie, comme en salle blanche. Il conviendrait de doter ISP3D d'une plate-forme logicielle comme le pôle se dote d'une plate-forme technologique.

C.2.d- Gestion thermique globale

La communauté électronique a l'impératif de gérer à court terme des densités de flux (sous puce) supérieures à 100 W/cm² et pouvant atteindre à plus long terme les 1000 W/cm². Parallèlement, on notera une volonté à exploiter des températures de jonction croissantes (jusqu'à 500°C). Du point de vue du thermicien, le niveau de contraintes est élevé : il faut développer des solutions de refroidissement capables d'évacuer de très fortes densités de flux avec une différence de température limitée entre la source et le puits (comprise entre 45°C et 100°C) et cela dans un contexte de réduction des échelles et d'augmentation de l'intégration des systèmes.

Ces besoins en termes de refroidissement et d'architecture dans le domaine de l'électronique de puissance (notamment hybride) soulèvent un nombre important de verrous scientifiques et technologiques qui ne peuvent être abordés que sous l'angle pluridisciplinaire (physique du changement de phase, du non-linéaire, de la complexité, ..., électronique, électrodynamique, matériaux, systémique, ...). Pour répondre à ces besoins, des innovations majeures et des ruptures technologiques doivent être réalisées dans un contexte de très fortes retombées économiques et sociétales. Le champ de compétences nécessaires pour cela n'est actuellement pas couvert, et des moyens humains doivent nécessairement être placés à l'intersection des différents domaines concernés.

Les étapes majeures sont les suivantes :

- Utilisation du transfert par changement de phase du fluide en convection forcée dans des microcanaux ;
- Développement de micro-structures d'amélioration de la surface (microcanaux, microailettes, mousses métalliques, ...) de format innovant et de rapport d'aspect (surface développée/surface

- chauffée) important (supérieur à 30 dans le cas le plus favorable, transfert diphasique) ;
- Miniaturisation des concepts existants (taille de l'évaporateur de l'ordre du cm² voire du mm²);
- Dans le cas des systèmes diphasiques passifs, on attend une intensification des performances par le développement d'évaporateurs à pompage capillaire innovants et directement intégré au composant en rapport avec la priorité sur les micro-structures;
- Gestion thermique dans le développement du composant en relation avec la prospective sur la conception globale;
- Architecture du réseau de gestion thermique globale ;
- Stabilité et contrôle thermique ;

Si cette réduction d'échelle est favorable du point de vue du transfert diphasique en générant des films minces qui aboutissent à des coefficients de transfert de chaleur plus élevés, elle suppose la nécessité de travailler conjointement avec la communauté physicienne pour lever un certain nombre de verrous scientifiques :

- Microfluidique monophasique aux échelles adaptées ;
- Nucléation dans les micro-canaux et les milieux poreux;
- Transferts de chaleur au voisinage de la ligne triple (les films très minces et ménisques);
- Transferts avec changement de phase (ébullition forcée, vaporisation, sprays) en micro-canal, structure poreuse cohérente et milieux poreux désorganisés;
- Problématique du transfert par changement de phase à HT (propriétés thermophysiques du fluide caloporteur proche du point critique, crise d'ébullition, vaporisation violente, en film vapeur...);
- Matériau, μ -structure, nanostructure;

C.2.e- Fiabilité des assemblages

Toute action à l'égard de la fiabilité nécessite de comprendre les mécanismes physiques de défaillance, les limites de fonctionnement, et alors l'estimation de fiabilité peut être envisagée.

Vis-à-vis de technologies d'intégration 3D, c'est-à-dire des assemblages innovants mêlant une connexion nouvelle de dispositifs propres et des synergies de couplages fonctionnelles entre couches de matériau, la fiabilité ne peut pas progresser sans les étapes suivantes :

- Discernement et appropriation des profils de mission de l'assemblage ou de l'application visée par l'assemblage ;
- Connaissance des lois de dégradation des matériaux nouveaux ou spécifiques (de part leur moyen d'élaboration) ;
- Obtention de données physiques, issues d'une caractérisation pertinente thermo-mécano-électrique de l'assemblage, pour renseigner tout effort de modélisation (nécessairement non-linéaire) ;
- Evaluation de l'erreur dans la prédiction de la fiabilité ;
- Etablissement de modèles et de lois de fiabilité ;
- Caractérisation en vue de la validation des prédictions de fiabilité.

En ce qui concerne les interconnexions, nécessairement très différentes de celles présentes dans les assemblages dits non-3D, il est nécessaire de développer des méthodes de caractérisation propres. Des modèles de contrainte/allongement sont probablement la première solution à évaluer. Enfin l'effort est à la hauteur de l'enjeu : outre les manipulations, il y a un besoin fort en simulation 3D par éléments finis. De ces travaux peuvent émerger des modèles analytiques de fiabilité des assemblages 3D.

C.2.f- Intégration fonctionnelle monolithique

Il s'agit d'un projet à la frontière entre électronique de puissance et micro-électronique. L'objectif ultime est de permettre la définition d'une fonction de puissance, aussi complexe soit-elle, à partir de blocs fonctionnels, et après une étape de conception cohérente (plate-forme) de permettre la

fabrication de cette fonction de manière monolithique. Ceci ouvre la porte à l'intégration de tous les actifs silicium d'un convertisseur par exemple. Corollairement, cette possibilité fera diminuer le nombre de composants à assembler, donc facilitera la technologie 3D tout en participant à l'augmentation de la fiabilité.

Les verrous à l'horizon 2020 sont de deux types :

- Technique :
 - Composants de puissance à technologies variables
 - Intégration monolithique intrusive et particulièrement couplée (isolation électrique)
 - Technologies communes, conception couplée et contraintes globales (intégration).
 - Performances et robustesse, versatilité
 - Prototypage reproductible et fiabilisé (différencier techno/conception)
- Conceptuelle :
 - Absence ou manque de standard au niveau des modèles et procédés technologiques
 - Associer les différentes sensibilités et compétences
 - Identifier les supports de conception et de modélisation appropriés
 - Identifier et faire vivre le support technologique industriel
 - Assurer le lien entre fondeur, concepteurs et clients potentiels

La prospective fait valoir la nécessité d'une plate-forme cohérente à l'image du projet CAP-CIS par exemple.

C.2.g- Architecture et technologie hybride des systèmes

Les problématiques de cette thématique comportent un volet relatif à la conception. Les verrous sont donc relatifs à la technologie. Une grande partie de ces verrous technologiques trouveront une solution à travers les matériaux et leurs procédés d'élaboration. Finalement la prospective concerne les solutions innovantes d'assemblage au sens de la 3D.

L'intégration fonctionnelle a pour but de ramener le plus grand nombre de fonctions actives au sein du silicium. Ceci ne peut que simplifier le nombre de dispositifs actifs à interconnecter mais ne résoudra pas les verrous à l'étape ultime d'assemblage, nécessairement hybride.

Les problématiques dépendent principalement du niveau de puissance et du niveau de tension présents dans l'assemblage ainsi que de l'environnement des applications. Le pôle ISP3D vise la gamme basse et moyenne de puissance (kW) en environnement normal, et les applications en environnements sévères (de tension ou de température). L'électronique très haute puissance n'est pas concernée économiquement par l'intégration 3D. Par contre les aspects de haute-tension sont pris en compte par le pôle.

Pour accéder à des applications très haute-tension et/ou haute-température ambiante³, le pôle ISP3D considère deux matériaux semi-conducteurs à grand gap : [SiC](#) et [GaN](#). Le diamant fait l'objet d'étude mais subit un retard technologique qui ne permettent pas encore d'envisager un système du fait de performances encore médiocres. Les principaux verrous sont les suivants :

- Composants SiC de 15 kV puis 30 kV (unipolaires ou bipolaires, à voir).
- Composants GaN de 1 kV.
- Faisabilité de composant en diamant.
- Connexions et modules spécifiques en haute-température comme en haute-tension, avec le verrou supplémentaire de l'isolation en haute-tension.
- Solutions de dispositifs passifs compatibles, notamment en température.
- Architectures encore non prouvées en très haute-tension.
- Fiabilité à initier en haute-température comme en haute-tension.

3 Voir la fiche [#8.1.Prospective HVHT: Applications à haute tension et/ou à haute température pour l'intégration de puissance](#)

C.3- Les convertisseurs électromécaniques

C.3.a- Intérêts et usages des convertisseurs électromécaniques

La majorité des systèmes de production d'énergie électrique utilisent des générateurs électromagnétiques, que ce soit pour les systèmes fixes ou embarqués. À partir de ressources renouvelables, on peut citer notamment l'hydraulique, l'éolien et la biomasse. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne est celle qui offre la plus forte croissance, avec un taux d'environ 30% par an en énergie livrée. En parallèle son coût est en forte décroissance : le prix de revient du kWh éolien a été divisé par 5 en 20 ans. Plusieurs solutions innovantes laissent à penser que l'hydraulique houlienne serait à même de fournir 5% de l'énergie consommée en Europe d'ici 2050. Dans ces domaines, des travaux sont encore à réaliser que ce soit au niveau de la recherche de structures innovantes ou de l'optimisation des performances des structures existantes.

La micro-génération d'énergie embarquée (exploitation de l'énergie de la marche par exemple) est aussi une problématique de recherche prometteuse, tant le nombre de systèmes nomades fonctionnant avec l'énergie électrique augmentent considérablement ces dernières années.

Du côté de la consommation d'énergie, on peut considérer que lorsqu'il s'agit de produire de l'énergie mécanique, l'électricité constitue l'un des meilleurs moyens d'obtenir une conversion efficace. Pour les puissances très faibles (inférieures à quelques watts), les convertisseurs piézoélectriques ou électrostatiques peuvent être intéressants, mais pour des niveaux de puissance supérieurs, c'est toujours les convertisseurs magnétiques qui sont les plus performants.

Si dans le domaine de la production industrielle, l'électricité est utilisée depuis déjà de longues années pour la conversion en énergie mécanique (robotique, laminoirs, usinage...), elle est de plus en plus présente dans tous les usages embarqués, notamment dans les transports.

Dans l'automobile classique, le nombre d'actionneurs dans une voiture particulière ne cesse d'augmenter. Des usages classiques tels que le démarreur, les ventilateurs ou les essuie-glaces, les actionneurs sont utilisés maintenant pour l'ouverture des vitres, la condamnation centralisée des portières, le positionnement des sièges ou des rétroviseurs... Les constructeurs prévoient l'utilisation d'une cinquantaine d'actionneurs à l'horizon 2015. Leur rendement, leur compacité et leur coût devront être particulièrement optimisés.

Bien entendu, le véhicule hybride ou tout électrique exploite encore plus le vecteur électricité. Cela se justifie par la qualité de la conversion énergétique. Par exemple, pour une puissance de l'ordre de 75 kW (ordre de grandeur de la puissance de propulsion d'une voiture), un moteur électrique a un rendement compris entre 90 et 95% alors que le rendement d'un moteur à essence s'établit globalement autour de 45% au point optimal et celui d'un moteur diesel autour de 55%. Ce rendement chute en usage moyen. Le gain en énergie qui s'ouvre conduit alors à associer une machine électrique pour adapter la puissance fournie par le moteur thermique maintenu à son point optimal de rendement. En ce sens, les convertisseurs électromécaniques (généralement associés à de l'électronique de puissance) ont un rôle clé à jouer.

S'agissant de véhicule électrique, la réversibilité des convertisseurs électromécaniques autorisent la régénération de l'énergie mécanique lors du freinage. Cependant, l'argument du rendement des moteurs électriques est à tempérer par des considérations de coût, de densité de l'énergie stockée, de durée de vie voire de recyclabilité, dans un système embarqué. Cet argument doit donc motiver des efforts en matière de stockage d'énergie électrique. Par exemple, en ce qui concerne la traction ferroviaire urbaine, la ligne 1 de trolley de Lyon est une des plus anciennes et la plus utilisée en Europe. Un trolley nécessite 1 kW de puissance moyenne et 100 kW crête lors des démarrages. Une source solaire associée à des super-condensateurs, des volants d'inertie, voire des batteries permettrait de résoudre la contrainte pour tirer parti d'une production durable. Le biberonnage est une technique pour supprimer les caténaires. Il s'agit de « recharger » le véhicule électrique urbain dans les stations là où l'arrêt est nécessaire à la descente et la montée des passagers. Cette technique permettrait de généraliser l'utilisation de bus électrique. Par ailleurs, on note l'émergence de cette tendance à l'hybridation entre propulsion thermique, électrique et stockage dans un large spectre

d'applications, notamment dans les systèmes nomades, dans les transports (automobile, ferroviaire, aéronautique et spatial).

Concernant la traction ferroviaire extra-urbaine, l'usage de l'électricité est déjà généralisé, que ce soit à partir d'un générateur diesel-électrique ou à partir d'un réseau alternatif ou continu.

Finalement, concernant l'aéronautique, même si nous sommes encore loin de l'avion tout électrique du type Solar Impulse, l'usage d'actionneurs électriques à la place d'actionneurs thermiques, hydraulique et/ou pneumatiques se généralise. Des projets comme « l'avion ou navire plus électrique » en Europe permettent de développer des solutions utilisant le vecteur électricité, que ce soit pour des raisons de maîtrise de la masse, de meilleure gestion de l'énergie ou encore de fiabilité accrue. De nombreux travaux restent à mener dans ce domaine.

C.3.b- Conception des convertisseurs électromécaniques

Le nombre et la variété des applications des composants électriques augmentent, comme les contraintes d'utilisation, le souci de maîtriser le cycle de vie, et la pression sur les temps de développement ou l'écobilan d'usage du produit. De plus, les dispositifs deviennent de plus en plus complexes à développer car les concepteurs, mais surtout le client final, sont de plus en plus exigeants. Ceci est accentué par une forte concurrence internationale à laquelle les entreprises sont soumises. Il n'est plus possible de se satisfaire d'un système qui fonctionne, il doit être le plus performant, le plus économe, avec le plus faible impact environnemental possible, et doit être économique. L'enjeu est crucial de formaliser les méthodes et les outils pour la conception optimale afin de permettre aux entreprises de surmonter la complexité croissante des systèmes. Dans ce contexte, les outils de conception, de dimensionnement et de prototypage virtuel orientés métiers contribueront largement à la compétitivité des équipementiers dans ces secteurs. Ces outils s'adressent aussi bien aux équipementiers développeurs des dispositifs qu'aux intégrateurs dont le souci est d'optimiser les systèmes électriques conçus à partir de ces dispositifs.

L'approche doit être systémique, c'est à dire prendre en compte l'ensemble du système au moment de la définition du composant. Cette tâche est particulièrement ardue car les systèmes du génie électrique sont toujours fortement pluridisciplinaires : thermique, électrique, électronique de puissance, électronique de commande, automatique, mais aussi mécanique. La totalité du cycle de vie (fabrication, exploitation et recyclage) doit être pris en compte pour l'évaluation du bilan énergétique et écologique réel des solutions proposées. Des logiciels d'écoconception commencent à voir le jour (par exemple la base de données EIME développée par la société CODDE) et permettent d'évaluer correctement l'empreinte écologique d'un produit fini. Il faut prendre en compte :

- les matières premières (processus de production, l'épuisement potentiel des ressources...)
- le coût énergétique à la fois de l'utilisation (sur un cycle de fonctionnement réaliste), de fabrication du produit, de son recyclage
- le recyclage du produit et le traitement des déchets
- les contraintes environnementales (vibrations, bruit et CEM)

À titre d'exemple, on peut développer le cas d'une motopompe industrielle de 1 kW. Elle présente un coût sur son cycle de vie réparti en 78% pour l'énergie consommée (électricité), 16% de coût d'achat et 6% de maintenance, pour une durée de vie de 15 ans et 4000 heures de fonctionnement par an. En tout cette motopompe restituera 5 MWh si elle est équipée d'un variateur de vitesse, et seulement 2 MWh avec une connexion directe au réseau électrique triphasé (malheureusement le cas de 80% des moteurs industriels). La fabrication de cette motopompe consommera environ 20 kWh et son recyclage guère plus. L'écobilan est donc du même ordre de grandeur que le rendement global de la conversion électromécanique, soit 80% ou 30%. Ceci renforce l'intérêt stratégique lié aux convertisseurs de puissance efficaces associés aux systèmes efficaces de conversion électromécanique.

Quoi qu'il en soit, les outils existants à l'heure actuelle sont le plus souvent des bases de données et des bases de "qualification éco" de produits existants. Un outil permettant non pas seulement de

qualifier mais surtout d'aider le concepteur à dimensionner et à optimiser le convertisseur (géométrie mais aussi matériaux, contrôle, ...) est aujourd'hui nécessaire. Cet outil pourra également comparer l'impact global des architectures existantes de machines électriques et aider à la recherche de nouvelles architectures compatibles avec les exigences de développement durable. Enfin, un tel outil pourrait interagir avec le monde industriel afin d'infléchir, si nécessaire, les processus de fabrication et de recyclage en fin de vie.

Par ailleurs, aujourd'hui, compte tenu des applications des machines électrique et des moyens matériels et logiciels de calcul, le dimensionnement et l'optimisation des chaînes de traction ou de production d'énergie est souvent complexe. La notion de point nominal (couple-vitesse par exemple) est caduque. Il est important dans la plupart des cas récents de développer des approches multi-sollicitations. Il s'agit dans ce cas, à défaut de redéfinir le point dimensionnant, de réaliser des optimisations en sollicitations intermittentes sur un large cycle de fonctionnement (cycle type) ce qui implique des modèles adaptés (multi-niveaux). En outre, ajoutant à cette complexité, les sollicitations ne peuvent plus être considérées comme déterministes (parfaitement prévisibles). En effet, celles-ci sont dans la réalité des sollicitations incertaines pour lesquelles il est nécessaire à la fois de développer des modèles de sollicitations probabilistes adaptées et des méthodes de résolution efficaces, notamment les méthodes statistiques. A titre d'exemple, on peut citer les sollicitations (intermittentes et aléatoires) subies par un aérogénérateur ou par un moteur de propulsion pour véhicule électrique ou hybride.

Enfin, il convient de noter que la conception commence dès la formalisation du cahier des charges. En effet, la définition des performances attendues et des contraintes à respecter pour un convertisseur électromécanique fait partie également de la démarche de conception. À ce jour ces tâches sont essentiellement confiées à l'acteur humain et sont traitées par des techniques de coordination et de supervision.

Finalement toutes ces approches de conception nécessitent le déploiement de méthodologies et d'instrumentations spécifiques prenant en compte le système dans lequel prend place le convertisseur. Ces approches peuvent être désignées par le vocable synthétique de **méthodologie de conception optimale systémique**.

C.4- Actions

C.4.a- Enjeux, verrous et recherches à mener

- **Convertisseurs électromécaniques haute vitesse** (par exemple les électro-broches à grande vitesse pour l'usinage haute précision des céramiques ou encore les convertisseurs utilisés pour le stockage inertiel rapide)
Enjeux : 250 000 tr/min - 1kW
Verrous: structures des actionneurs en liaison avec les matériaux capables de supporter les contraintes mécaniques et thermiques, modélisation multi-physique (mécanique-magnétique-thermique), alimentation électrique à haute fréquence de découpage.
- **Générateurs électromécaniques haute vitesse**, à haute température et forte compacité (génération électrique avec turbines à gaz ou intégrés au réacteur dans les systèmes embarqués : aéronefs, automobile)
Enjeux : vitesse périphérique, barrière des 10 kW/litre pour les systèmes embarqués...
Verrous : limites en température et en contraintes mécaniques des matériaux, capacité et technique de refroidissement, vieillissement et fiabilité.
- **Convertisseurs électromécaniques basse vitesse/fort couple** : éolien, moteurs de traction sans réducteur pour les applications de transport.
Enjeux : supprimer les réducteurs et augmenter les couples massiques ; atteindre, en régime

impulsionnel, la centaine de Nm/kg de partie active en attaque directe.

Verrous : les problèmes thermiques dont le refroidissement au raz des puces de puissance, la saturation magnétique des matériaux pour atteindre des densités de forces élevées (pressions magnétiques limitées actuellement à 4 bars environ pour des inductions dans les entrefers de l'ordre de 1Tesla)

- **Convertisseurs électroniques de puissance à forte intégration** (exemples d'applications : alimentation basse tension pour appareils nomades, [UPS](#), traction ferroviaire, aéronautique, etc.).

Enjeux : puissance massique, ratio géométrique, rendement, fiabilité, intelligence, fabrication collaborative, maintenance réduite, faible coût.

Verrous : intégration monolithique et hybride 3D (couplages de phénomène, technologie, en particulier intégration des passifs, Compatibilité Electromagnétique ou CEM, thermique...)

- **Convertisseurs électroniques haute température et/ou haute tension** (applications : contrôle et protection des réseaux de transport et de distribution de l'électricité, traction ferroviaire et propulsion maritime, aéronautique, forage, militaire...)

Enjeux : ambiante à plus de 300 °C, 30 kV par composant, 100 kV pour le convertisseur

Verrous : composants actifs et passifs haute température, haute tension, fiabilité.

- **Optimisation de l'association convertisseur machine** : dans des contextes particuliers tels que la montée en vitesse et en fréquence, l'optimisation des 'éléments' convertisseurs électroniques et électromécaniques est évidemment nécessaire comme nous l'avons déjà souligné. Mais des avancées potentielles relèvent aussi de l'association judicieuse de ces éléments et de leurs interfaces (filtrages, câblages,...) vis-à-vis des compromis à rechercher en terme masse/compacité, d'efficacité énergétique, de qualité (CEM,...). On peut citer l'exemple aéronautique du système de conditionnement d'air électrique où le compresseur d'air électromécanique tournant à plus de 80 000 tr/min requiert tant une optimisation des convertisseurs électronique et électromécanique qu'une réflexion d'ensemble en terme d'association convertisseur – filtre – câble - machine.

Enjeux : optimisation système en terme de fiabilité, efficacité énergétique, qualité (CEM,...), masse/compacité

Verrous : modèles de conception multi-physiques, multi-critères

- **Modélisation** de la complexité multi-physique (par exemple couplage de plusieurs phénomènes magnétique, électrique, thermique, mécanique, mécanique des fluides), multi-échelle de temps (par exemple modélisation de phénomènes transitoires très courts qui ont une influence sur le vieillissement à long terme des composants électroniques), multi échelle d'espace (influence des phénomènes locaux tels que la saturation magnétique ou la présence de « points chauds » sur le comportement global de systèmes complexes), multi niveaux de représentation (différentes granularité de modèles avec des niveaux d'hypothèses et des formalismes de représentation différents, passage de modèle microscopique à des modèles macroscopiques par réduction de modèle). Il s'ajoute également la modélisation à caractère géométrique pour les opérations d'optimisation vis-à-vis des critères de puissance massique et volumique. De plus, l'analyse amont de la fiabilité exige une approche de modélisation statistique. Enfin, outre les aspects physiques, la conception fait appel à de multiples autres domaines tels que les modélisations économiques ou d'impact écologique.

Enjeux : brique de base du prototypage virtuel ; modèles directs utiles pour le dimensionnement (qui consiste en l'inversion du modèle direct), modèles pour la validation physique du fonctionnement des systèmes.

Verrous : pertinence de la connaissance et de la caractérisation dans des systèmes, méthodes mathématiques d'analyse et de résolution (notamment des phénomènes couplés) ; formalismes unifiés de représentation des phénomènes ; expressions statistiques des phénoménologies.

- **Processus de conception** : Ce processus s'appliquera progressivement à la conception de [convertisseurs électroniques de puissance](#) et de [convertisseurs électro-mécaniques](#): langages de description de modèles (unification, standardisation des représentations) - générateurs de

composants logiciels métiers inter opérables (pour faciliter la capitalisation et la diffusion des modèles dans l'industrie et les laboratoires) - outils « service » autour des modèles aux formalismes standardisés (calcul de sensibilité, optimisation, tolérancement, inversion de modèle...) - bases de données partagées de connaissance, capitalisation de la connaissance - compréhension, modélisation et formalisation de la démarche de conception en vue de l'amélioration de son efficacité.

Enjeux : réduction du cycle de conception sous contraintes économiques, écologiques (écoconception) grâce à l'instrumentation du processus de conception (prototypage virtuel, optimisation) et grâce à la réduction du nombre de prototypes

Verrous : Interopérabilité des modèles, standardisation de composants logiciels, choix des bons algorithmes d'optimisation en fonction des objectifs, formalismes, langages, réalisation d'environnements logiciels partagés, aspects pluridisciplinaires (mathématiques appliqués, sciences cognitives, gestions de l'industrie, aspects juridiques liés au partage de la connaissance).

- **Écoconception** : concept, outils, bases de données pour une conception s'inscrivant dans un développement durable

Enjeux : développer des outils qui permettent à la fois une prise en compte des contraintes environnementales dans la conception et le dimensionnement des convertisseurs.

Verrous : Modélisation des cycles de vie des convertisseurs : coûts énergétiques et empreintes environnementales de la réalisation, de l'usage et du recyclage.

C.4.b- Moyens technologiques et humains disponibles

- plate-forme technologique ouverte pour l'intégration monolithique (LAAS)
- plate-forme technologique pour l'intégration hybride (3DPHI)
- pas de plates-formes technologiques ou logicielles partagées dans le domaine des convertisseurs électromécaniques
- moyens humains : 25% des effectifs de SEEDS soit environ une petite centaine de chercheurs

C.4.c- Résultats attendus

- plate-forme logicielle ouverte pour le partage de modèles et de méthodologies de conception
- plate-forme logicielle partagée pour la modélisation multi physique macroscopique
- plate-forme technologique autour des machines rapides
- plate-forme technologique autour de l'intégration des convertisseurs et des démonstrateurs technologiques d'éléments de convertisseur et de convertisseur de puissance.

C.4.d- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

Convertisseur électromécanique :

- Programmes nationaux : 1 – très peu couvert (quelques projets ANR-PREDIT [par exemple « Machines électriques embarquées à Grandes Vitesses » déposé en mars 2007], mais pas d'appels d'offres spécifiques à ce jour)
- Programmes internationaux : 1 - très peu couvert (des bribes dans la première tranche du 7^{ème} PCRD)

Convertisseurs électroniques de puissance

- Programmes nationaux : 1 - peu couvert (2 projets ANR spécifiques à ce jour : 3DPHI et CoTHT)
- Programmes internationaux : 1 - très peu couvert en Europe (des bribes dans le premier

appel du 7^{ème} PCRD). Très couvert aux USA et Japon (Le programme DARPA prévoit 62 Milliards de dollars pour aboutir au déploiement de solutions énergétiques de remplacement au pétrole).

2) Nom des programmes nationaux et internationaux concernés

Convertisseurs électromécaniques :

- [ANR-RNTL](#) : couverture très partielle en ce qui concerne les outils informatiques pour la conception (optimisation)
- ANR-PREDIT : couverture partielle ; les convertisseurs sont vues comme des composants de systèmes pour les transports
- FP7: rien si ce n'est quelques éléments dans l'appel à projets FP7- AERONAUTICS and AIR TRANSPORT (AAT.2007.3.4.1. Design Systems and Tools)

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance [3 : dans la moyenne])

- méthodes et méthodologies de conception, instrumentation du processus de conception : 4, plutôt à jour.
- originalité et innovation des structures de convertisseurs électromécaniques : 3, dans la moyenne

4) Disciplines concernées (0 : pas concerné -> 5 : très concerné)

- énergétique, thermique (5)
- matériau (5)
- architecture électronique (5)
- mécanique (3)
- génie industriel (3)
- informatique (4)
- mathématiques appliquées (2)

C.5- Références

Nota : il y a similitude entre le programme Energie et le projet californien PIER. Par ailleurs la Californie est un « pays » comparable à la France.

The PIER Program, managed by the California Energy Commission (Commission), annually awards up to \$62 million to conduct the most promising public interest energy research by partnering with Research, Development, and Demonstration, (RD&D) organizations, including individuals, businesses, utilities, and public or private research institutions.

PIER funding efforts are focused on the following six RD&D program areas:

- Buildings End-Use Energy Efficiency
- Industrial/Agricultural/Water End-Use Energy Efficiency
- Renewable Energy
- Environmentally-Preferred Advanced Generation
 - Energy-Related Environmental Research
 - Strategic Energy Research.

Par ailleurs les USA ont reconnu le CPES comme Centre de Recherche pour les questions d'électronique de puissance, de même que l'AIST/PERC au Japon. ECPE souhaite acquérir ce statut en Europe. SEEDS pourrait jouer le même rôle en France.

Principales conférences et revues scientifiques relatives au thème

IEEE Power Electronic Conference (PESC)

European Power Electronic Conference (EPE)
IEEE Symposium on Power Systems and Devices (ISPSD)
IEEE Transactions on Power Electronics (TPE)
COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering
IEEE Transactions on Magnetics
RIGE : Revue Internationale de Génie Électrique)
OIPE : Optimization and Inverse Problem in Electromagnetism)
COMPUMAG : Conference of the Computation of Electromagnetics Fields
CEFC: Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation

Fin de l'ère pétrole

<http://www.energyshortage.com/>

http://www.energyshortage.com/articles/LBST_Countdown_2004-10-12.pdf

Peak Demand Electricity Shortage

http://intranet.csreurope.org/news/csr/one-entry?entry_id=384779

<http://www.euractiv.com/en/energy/energy-competitiveness-environment/article-156933>

[Energy, competitiveness and the environment](#)

http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/international/index_en.htm

Energy & transport international relations

Premiers faits quant au manque d'énergie

<http://www.co.contra-costa.ca.us/energyshortage.htm>

<http://peakdemandenergy.com/>

Premières solutions globales

http://www.chinadaily.com.cn/english/doc/2004-05/15/content_331045.htm

Wind energy: Key to solve energy shortage

http://www.bpa.gov/power/pgp/dryyear/11-2006_Final_Dry_Year_Tools_and_Principles.pdf

guide to energy shortage

<http://www.physicsforums.com/archive/index.php/t-99590.html>

Space Elevator to Solve World's Energy Shortage

<http://eedrt.com/>

EEDRT (Effective Energy Demand Reduction technology, concentrate thermal energy which we use to power thermal differential motors that directly power a compressive cooling cycle)

http://www.fromthewilderness.com/free/ww3/081803_hydrogen_answers.html

Why Hydrogen is No Solution - Scientific Answers to Marketing Hype, Deception and Wishful Thinking

Renewable Energy: Economic and Environmental Issues, David Pimentel et al. Bioscience, Vol. 44, No. 8, September 1994. <http://www.dieoff.com/page84.htm>

<http://www.eere.energy.gov/>

Clean energy technology and a vision for victory

The Wall Street Journal Focuses on Data Center Energy Efficiency

<http://www.senate.gov/~finance/press/Bpress/2005press/prb030906a.pdf>

http://www7.nationalacademies.org/guirr/Stine_Presentation.pdf

Creation of ARPA-E: Advanced Research Projects Agency — Energy

<http://www.awea.org/pubs/factsheets/Cost2001.PDF>

Comparative Cost Of Wind And Other Energy Sources

<http://www.uic.com.au/nip08.htm>

The Economics of Nuclear Power

Efficacité des systèmes électriques

<http://www.electricitycommission.govt.nz/opdev/elec-efficiency/>

<http://www.electricitycommission.govt.nz/pdfs/opdev/elec-efficiency/appropriation/report-to-minister.pdf>

Plusieurs objectifs chiffrés : éclairage, industriels...

<http://www.rmi.org/sitepages/pid321.php>

Electric Efficiency, Negawatts and Sowbellies.

<http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/Newsroom/SummerSeminar2006/01-Specker.pdf>

Advancing the Efficiency of Electricity Utilization

http://www.lyonrec.coop/home_business/electric_benefits/index.html

<http://useelectric.com/index.asp>

Electricity Efficiency and Benefits

<http://www.nemw.org/spark.pdf>

Environmentalists Stymie Electricity Efficiency and Innovation

http://www.eei.org/industry_issues/retail_services_and_delivery/wise_energy_use/how_to_save_electricity_in_your_home/tips_home.pdf

http://www.gepower.com/prod_serv/products/gas_turbines_cc/en/h_system/index.htm

60 Percent Fuel Efficiency

Intérêt de l'intégration (au sens général, quelque soit l'échelle)

<http://www.hud.gov/offices/cpd/affordablehousing/training/web/energy/challenges/>

Rehab-Energy Efficiency Integration Challenges and Issues -> Useful Resources for Common Energy-related Housing Problems

<http://www.arpa.mil/mto/ripe/>

robust integrated power electronics

<http://www.epsma.org/news.htm>

European Power Supplies Manufacturers Association -> voir Oct. 2006

<http://certs.lbl.gov/pdf/std-power-electronics.pdf>

Integration of Distributed Technologies – Standard Power Electronic Interfaces

http://www.energy.ca.gov/pier/esi/esi_reports.html

Advanced Power Electronics Interfaces for Distributed Energy - Workshop Summary.

Advanced Switches for Soft Blackouts, Critical Infrastructure Protection, Unanticipated Discovery of Emergency Voltage Reduction for Grid Protection.
Rate Structures for Customers with On-Site Generation: Practice and Innovation.
Demand Shifting with Thermal Mass in Large Commercial Buildings: Field Tests, Simulations and Audits.
A Vision of Demand Response – 2015.

D- Transmission d'énergie électrique et CEM

D.1- Contexte général

Ce chapitre regroupe les aspects relatifs à l'interaction entre l'énergie électrique et l'électromagnétique. Cette interaction peut être :

- voulue: transmission d'énergie par ondes électromagnétiques [HF](#)
- ou subie: [CEM](#) ou Compatibilité Electro-Magnétique.

D.1.a- Transmission d'énergie par ondes électromagnétiques HF

La transmission d'énergie à distance est une problématique qui a donné lieu à de nombreux projets. Dans ce domaine, on trouve essentiellement des travaux sur le transfert massif d'énergie depuis l'espace vers la terre (Solar Power Systems) qui sont liés aux préoccupations énergétiques de l'après «énergies fossiles».

Le second volet nouvellement traité concerne **la transmission d'énergie sans contact pour des systèmes nomades** et par conséquent mettant en jeu des **niveaux d'énergie très faibles** et des distances plus courtes. Deux techniques sont envisageables : transfert proche par induction électromagnétique moyenne fréquence, transfert par faisceau micro-ondes sur de distances plus grandes.

Le critère de distance dans ce type de transmission d'énergie sans contact est ici fondamental au vu des applications visées : alimentation de systèmes nomades dans le contexte du développement de l'intelligence ambiante. Un des problèmes cruciaux à résoudre est alors leur alimentation. On peut difficilement penser que tous ces systèmes pourront être reliés par fils ou posséder des alimentations de type pile. Ce dernier type d'alimentation, pratique, pose cependant le problème de la durée d'autonomie et le problème du recyclage.

La **transmission par faisceau micro-ondes** apparaît donc la plus adaptée du fait de la portée accrue par rapport aux techniques par induction magnétique et de la possibilité d'utiliser des antennes directionnelles.

Le verrou principal à lever tient au fait que le rendement global du système doit être maximal. En effet, la puissance disponible transportée par une onde rayonnée est limitée en intensité pour des raisons normatives de sécurité. Dans des environnements très particuliers, la puissance disponible pourrait être plus élevée.

Un dispositif de transmission d'énergie sans contact est constitué d'un système émetteur (non critique) et d'un système de réception (figure 1). L'énergie véhiculée par l'onde électromagnétique est captée par une antenne de réception (ou un réseau d'antennes), puis ce signal alternatif est redressé. L'association de l'antenne et du redresseur est communément appelée rectenna (pour rectifying antenna). Le signal redressé est ensuite filtré et éventuellement régulé pour être utilisé comme source d'énergie électrique continue par une charge quelconque.

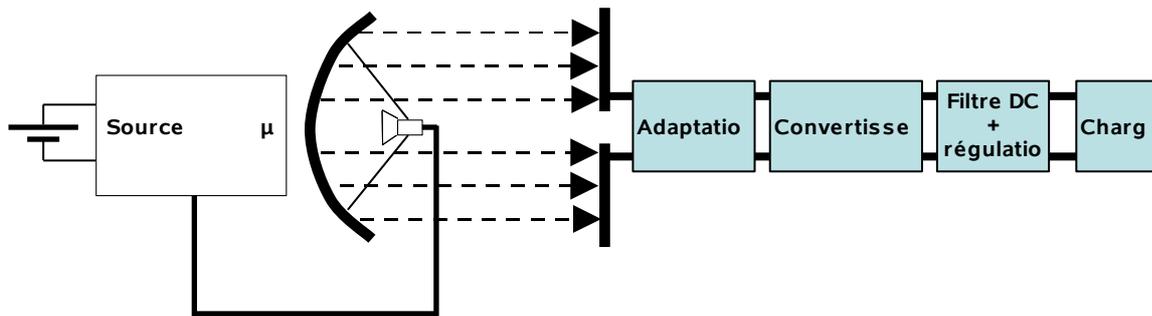


Figure 1 : Synoptique d'un dispositif de transmission d'énergie par faisceau micro-ondes

Les travaux réalisés à ce jour ont permis de mettre en œuvre des solutions originales à plusieurs niveaux :

- l'antenne présente la plus grande surface efficace possible. Pour cela des solutions utilisant des formes d'antennes particulières ont été mise en oeuvre.
- la conversion d'énergie a un maximum de rendement. Des solutions de redressement et de filtrage originales permettent d'obtenir une puissance maximum en sortie du dispositif.
- les adaptations entre les tronçons du circuit sont optimisées. Les interfaces entre les différentes parties du système ont été conçues et optimisées à l'aide de simulations électromagnétiques, de même que les couplages à l'intérieur du circuit global.

D.1.b- CEM

Les dispositifs d'électronique de puissance envahissent tous les domaines d'application, industriels, domestiques, santé, transports. La pollution électromagnétique qu'ils engendrent s'accroît pour plusieurs raisons :

- leur nombre et domaines d'usage s'accroissent,
- les fréquences et vitesse de commutation des interrupteurs de puissance s'accroissent, facilitant largement les couplages parasites proportionnels à la dérivée des grandeurs parasitantes,
- la cohabitation de convertisseurs statiques et d'électronique rapide bas niveau (numérique ou télécom) se développe dans les équipements ; le domaine des transports (aéronautique, automobile, ferroviaire) est significatif de cette évolution.

Ces évolutions ont des conséquences lourdes dans différents domaines :

Economique : le coût des fonctions liées à la CEM (limitation des émissions, protection contre les agressions) tend à croître ; on admet qu'actuellement, le filtrage représente un coût moyen de l'ordre de 20 à 30% d'un équipement de conversion statique et qu'il occupe de 20 à 50% de son volume selon la puissance. Une prise en compte de la [CEM](#) dès la phase de conception d'un produit permet de mieux optimiser ces coûts. D'autre part, une vision globale de la [CEM](#) dans un système complexe et ses interactions avec son environnement doit aussi pouvoir être prise en considération dans le même objectif de maîtrise des coûts.

Fiabilité et sûreté de fonctionnement : des domaines tels que le médical ou le transport aérien doivent prendre en considération la [CEM](#) pour d'évidentes raisons de sécurité. Dans d'autres domaines tels que l'automobile, l'équipement industriel ou la domotique, la [CEM](#) mal gérée peut avoir de graves conséquences économiques (indisponibilité des équipements, etc..). Ici aussi, l'approche de la [CEM](#) dans un système complexe doit pouvoir être prise en considération.

En conséquence, une meilleure connaissance de la [CEM](#) dans les systèmes intégrant de la conversion statique d'énergie est indispensable.

D.2- Enjeux-verrous

Faces aux enjeux liés à la [CEM](#), les travaux de recherche actuels sont relativement disparates entre les diverses équipes de recherche, et traitent souvent de cas particuliers. Or, sous l'impulsion notamment des secteurs automobile et aéronautique, qui ont pris le virage du "plus électrique", il se dégage un net besoin de capitaliser des connaissances, dans une logique système et sous-système. Il est souhaitable de tirer profit de cette impulsion, en améliorant les échanges entre équipes, mutualisant certains moyens, ... pour que toute la [CEM](#), dans les réseaux industriels, domestiques ou embarqués, puisse en bénéficier.

Cet objectif ne peut être atteint que par la mise en place d'un partenariat actif entre universitaires et entreprises concernées par la thématique.

Ce partenariat doit conduire à :

- mieux fédérer et coordonner les axes de recherche pour une meilleure efficacité et éviter les doublons,
- améliorer la généricité des problématiques traitées
- assurer la capitalisation du savoir, à un niveau suffisamment amont pour les entreprises pour qu'elles n'aient pas de conflit de stratégie commerciale.

D.3- recherches à mener

D.3.a- CEM

Les besoins généraux des différents acteurs en matière de recherche en [CEM](#) de l'énergie concernent les points suivants :

- la prédiction au stade du prototype virtuel des émissions conduites et rayonnées,
- la conception virtuelle avec prise en compte de contraintes [CEM](#) et l'optimisation de la solution,
- la capitalisation des connaissances en la matière,
- les moyens d'essais et mesure et les bancs de caractérisation spécifiques pour la [CEM](#) de l'énergie dans les domaines envisagés.

Dans ce contexte très général et selon les acteurs, les besoins de connaissances vont se particulariser, selon le domaine d'activité :

- le fournisseur de sous-systèmes doit respecter des spécifications, il doit disposer d'outils de prédiction de la [CEM](#) « composants », tant conduite que rayonnée ; il doit aussi disposer d'outils de conception et d'optimisation des dispositifs de réduction des perturbations : synthèse de filtre, optimisation de blindage, etc..
- l'intégrateur doit pouvoir élaborer des cahiers des charges [CEM](#) pour ses sous-traitants de façon à respecter les normes en vigueur vis-à-vis du système complet. Il doit être capable de spécifier le comportement [CEM](#) de différents éléments du système tels les câbles, les charges, les sources, les convertisseurs, etc.. Il doit aussi être capable de simuler le comportement [CEM](#) global du système à partir d'éléments de simulation que lui fournit l'équipementier : sources équivalentes, chemins de propagation, topologie du système, etc..
- l'universitaire souhaite disposer de modèles et de moyens de simulation pour l'analyse de phénomènes [CEM](#), mais aussi pour la conception optimisée de sous-système, il souhaite pouvoir capitaliser ses connaissances et son savoir-faire, il souhaite pouvoir disposer de bancs de caractérisation et de moyens de mesure pour valider ses modèles.

Ces besoins fixent donc des objectifs très généraux qui ne peuvent être atteints que par une coordination renforcée entre les différents acteurs, tant pour la précision et la définition fine des

travaux à organiser que pour la mutualisation des moyens intellectuels et matériels.

On constate que les aspects modélisation et simulation sont des enjeux majeurs et correspondent à des préoccupations structurelles concernant des équipements ou des systèmes issus de technologies classiques. Des problèmes théoriques majeurs subsistent en matière de simulation, ils doivent être traités :

- les problèmes de simulation temporelle avec des échelles de constantes de temps très différentes, qui génèrent des coûts de calcul prohibitifs ou des non convergences,
- la simulation virtuelle de l'instrumentation en [CEM](#), en particulier pour la représentation normative des grandeurs de perturbation. En effet, le comportement [CEM](#) virtuel d'un convertisseur doit pouvoir être observés par une instrumentation virtuelle reproduisant toute la chaîne d'acquisition : [RSIL](#), antennes, analyseur de spectre. Notamment, le comportement non linéaire en fréquence de ces dispositifs (détecteur crête, quasi-crête, moyen) représente une difficulté importante : la modélisation de non-linéarités en fréquence est un domaine théorique jamais traité,
- Le développement de méthodes de modélisation numérique pour permettre de quantifier l'environnement électromagnétique des composants. Ces méthodes doivent pouvoir s'adapter d'une part à des études fines au sein des convertisseurs, présentant des géométries complexes souvent très hétérogènes (matériaux minces ou de petites sections devant d'autres grandeurs), de matériaux non-linéaires dont les modèles de perte ne sont pas bien définis. Par ailleurs, elles doivent également pouvoir traiter des systèmes de taille plus importante (câblages industriels, réseaux embarqués...), prenant en compte des matériaux multiples notamment,
- la réduction de modèles sans perte de précision dans la simulation des systèmes complexes,
- Tenter de sortir d'une [CEM](#) purement "normative", où les composants sont testés individuellement dans des conditions particulières (RSIL, chambre [anéchoïque](#)), pour étudier une [CEM](#) d'interactions, où des tests sont effectués en vraie grandeur.

Toutefois, des actions de recherche qui viseraient à réduire la [CEM](#) en électronique de puissance en termes de structures de conversion doivent aussi être menées :

- vers de nouvelles structures de conversion statique, l'emploi de nouveaux composants, de commandes rapprochées gérant la [CEM](#), de lois de commande minimisant les spectres des grandeurs polluantes,
- vers l'intégration monolithique ou hybride des convertisseurs statiques qui pourrait permettre une meilleure gestion de la [CEM](#) par un confinement structurel des perturbations, ce point nécessite de réaliser une conception sous contrainte [CEM](#),
- vers la mise en œuvre aux meilleurs coûts de solutions actives de filtrage, de compensation et de blindage,
- vers la spécification, le développement et l'usage de matériaux mieux adaptés à la gestion de la [CEM](#) des systèmes, sous-systèmes et charges finales (actionneurs).

1) CEM du sous-système en conduit et rayonné proche

- Elaboration de modèles « circuits » de composants actifs, passifs et leur connectique à partir d'identifications expérimentales, de modèles analytiques paramétriques, de simulations par éléments finis 3D,
- La même approche peut être faite dans le domaine fréquentiel, notamment pour réduire les temps de calculs, contraction de modèles,
- Approche mixte temps-fréquence,
- Constitution de bibliothèques selon les trois précédentes approches,
- Modélisation pour la conception optimisée à contraintes [CEM](#) (y compris méthodes numériques)

- Constitution de macro-modèles dédiés aux intégrateurs, approche par sources équivalentes conduites et rayonnées, par impédances équivalentes (en conduit), par fonction de transfert équivalentes (rayonné).
- Evolution du rayonnement proche d'un convertisseur statique par modification de la topologie locale, conséquence sur les grandeurs parasites conduites,
- Nouvelles structures de conversion statique à faible **CEM**, commandes rapprochées gérant la **CEM**, loi de commande à minimisation des spectres des grandeurs polluantes,
- Dispositifs actifs de réduction des perturbations conduites et rayonnées (antennes actives),
- Intégration monolithique et hybride des convertisseurs statiques pour le confinement des perturbations électromagnétique, conception virtuelle de ces dispositifs avec contraintes **CEM**,
- Optimisation de l'usage des matériaux pour la **CEM** des actionneurs et de la connectique.

2) **CEM du système, conduit et rayonné**

- Mode de représentation de la topologie d'un système complexe : approche matricielle, choix des modèles, calage des modèles, validation sur benchmark,
- Prédiction des grandeurs conduites et rayonnées proches dans un système complexe, approche pire des cas ou approche normative,
- Réduction d'ordre d'un système complexe, analyse des couplages fort ou faible intra-système,
- Méthodes de simulation temporelle multi-échelle à faible coût de calcul,
- Modélisation de l'instrumentation de mesure des perturbations, détections crête, quasi-crête, moyenne,
- Méthodes numériques de modélisation "grands systèmes",
- Prédiction du rayonnement lointain à partir du proche et des grandeurs conduites en tenant compte des aspects 3D du dispositif,
- Optimisation de la maîtrise de la **CEM** dans un système complexe, filtrage et blindage répartis,
- Outils logiciels collaboratifs pour l'échange de données, de modèles et la validation expérimentale selon des protocoles normatifs, plate-forme logicielle.

D.3.b- Transmission de l'énergie électrique sans contact

Les principales recherches à mener concernent la conception de démonstrateurs à haut rendement,

- par couplage inductif (biberonnage ...)
- par transmission par faisceau micro-ondes (systèmes nomades de faible puissance, biberonnage ...)

D.4- Actions

1) Moyens technologiques et humains disponibles

Historiquement, les laboratoires fortement impliqués sur cette thématique (CEM et transmission de l'énergie sans contact) sont : AMPERE, G2ELAB, SATIE,

D'autres équipes ont développé des activités en CEM de l'énergie, citons :

LGEP, L2EP, IREENA

Au total, la communauté nationale des chercheurs permanents dans ce domaine est de l'ordre de 15 à 20 personnes.

2) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

1-2 : peu couvert, quelques actions sont en cours au travers du pôle MOVEO, des récentes propositions de projets ANR/RNTL ont été refusées (Projet PEPSCEM).

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance)

3-4 : la communauté nationale est plutôt bien située au niveau mondial dans le domaine, elle souffre toutefois de manque de visibilité et de manque de concertation entre les différents projets menés. Ce point est en nette amélioration depuis 2-3 ans mais n'est pas encore très visible à l'international.

4) Disciplines concernées

Electronique de puissance et électrotechnique générale, électromagnétisme, ondes et propagation, antennes, métrologie, matériaux.

5) Références utiles

Sites WEB, conférences et revues internationales majeures

IEEE transactions on EMC, IEEE transactions on power electronics, IEEE transactions on industrial electronics, IEEE transactions on industrial applications, congrès IEEE EMC, PESC, IAS, congrès EPE.

E- Sûreté de fonctionnement des dispositifs de conversion de l'énergie électrique

Remarque préliminaire : *La sûreté des réseaux électriques de transport, de distribution, de site (industrie – bâtiments) ou embarqués est abordée dans les thèmes « Entités autonomes ou semi autonomes » et « Réseaux électriques de transport et de distribution ».*

E.1- Contexte général et enjeux

La sûreté de fonctionnement d'un dispositif ou système recouvre une large palette de notions : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité, éventuellement qualité de l'énergie.

L'objectif général est de réduire les probabilités de pannes, de réduire les temps des immobilisations consécutives aux pannes ou liées aux opérations de maintenance, et d'éviter les situations dangereuses.

Les recherches relatives à la sûreté de fonctionnement devraient connaître un développement significatif dans les prochaines années, traiter un plus large spectre de problèmes en s'appuyant sur un plus grand nombre de méthodes. En effet :

- la sûreté de fonctionnement prend une importance de plus en plus grande tant sur le plan économique (coût de la panne par exemple) que sociétal (acceptabilité de la panne) et humain (dangerosité de la panne) ;
- l'interdépendance des différentes infrastructures sur lesquelles reposent les sociétés et économies modernes est de plus en plus grande, ce qui génère des fragilités et des opportunités ;
- Les services associés à un produit ou système lui apportent une valeur ajoutée de plus en plus significative ;
- la « gestion optimale des actifs » (utiliser les équipements au maximum de leur possibilité, les solutions à tout instant les plus intéressantes, ...), tout comme l'optimisation du cycle de vie d'un équipement par rapport à son usage sont devenus des enjeux majeurs tant économiques qu'énergétiques
- Les possibilités qu'offrent la miniaturisation, voire l'intégration des capteurs et le développement d'Internet, permettront à court terme d'envisager de pouvoir s'appuyer sur des bases de données d'exploitation sur lesquelles les méthodes de fouille de données, de traitements statistiques pourront être efficacement appliquées.

Les systèmes électriques industriels ou embarqués demandent de plus en plus de flexibilité, de disponibilité et de sécurité dans leur fonctionnement. Il est donc nécessaire de disposer d'outils capables d'une part d'étudier finement les différents constituants et leur comportement et d'autre part d'assurer un haut niveau de sécurité de ces équipements en fonctionnement.

La sûreté de fonctionnement et plus particulièrement la sécurité fonctionnelle doivent être considérées de manière précoce dans un cycle de conception. Assurer la sécurité fonctionnelle, c'est ramener le risque à un niveau acceptable. Si l'enjeu est flagrant pour certains domaines tels que le nucléaire, la pétrochimie ou encore les transports -aéronautique, ferroviaire...-, d'autres secteurs industriels (énergie, process...) et tertiaires commencent à s'y intéresser ne serait ce par exemple que pour maintenir un certain niveau de compétitivité.

Dans une démarche qui vise à diminuer voire éliminer les dysfonctionnements qui peuvent affecter un système et à optimiser sa disponibilité, la caractérisation préliminaire de la sûreté de fonctionnement au stade de la conception est complémentaire de l'activité de supervision.

- La caractérisation de la sûreté de fonctionnement a pour objectif de fournir des indicateurs de performance (fiabilité, disponibilité, maintenabilité...) d'un système vis-à-vis de sa tenue aux défaillances dont il serait potentiellement l'objet, comme à en planifier les opérations de

maintenance sur la base des risques et des coûts opérationnels du système. Elle peut faire appel à des modèles fins, souvent multi-physiques, des composants ou des constituants et sur les mécanismes de dégradations. Elle peut également s'appuyer sur des retours d'expériences de constructeurs et d'utilisateurs et des modèles comportementaux.

- La supervision a pour objet la détection des comportements anormaux d'un système, la localisation de leurs origines, l'évaluation de leur importance et la mise en œuvre d'actions adaptées (maintenance préventive, alarmes, reconfigurations, ...). Ces comportements sont censés témoigner d'un dysfonctionnement ou d'une panne naissante. La supervision est réalisée en ligne

Concernant le vecteur électricité et les systèmes de conversion d'énergie électrique la problématique de la sûreté adresse tous les niveaux de la chaîne de conversion: du composant ou constituant au système - fixe ou embarqué, de la production à l'utilisation en passant par le transport. La complexité est, selon les cas, générée par la multiplicité des phénomènes et composants et/ou la taille, dans tous les cas par les interactions.

E.2- Verrous et recherches à mener

E.2.a- Composants électroniques de puissance

Bien comprendre les mécanismes de vieillissement et de dégradation principalement par l'expérimentation. Développer des modèles permettant d'évaluer leur durée de vie :

- Indicateur et mode de défaillance
- Prédiction paramétrée par les contraintes d'usage

E.2.b- Constituants

Convertisseurs électroniques de puissance :

Selon les applications, rechercher des structures de convertisseurs qui permettent de pallier la défaillance d'un des constituants, actif ou passif.

Convertisseurs électromécaniques :

Développer des modèles permettant d'obtenir une signature de défaillances soit par mesures directes de grandeurs électriques soit indirectes : mesures de champs rayonnés, vibrations mécaniques ou acoustiques.

Concevoir des structures de machines moins sensibles aux dégradations, par exemple machine 7 phases !

Equipements électriques (entraînements à vitesse variable, armoires électriques, etc.)

Pour les entraînements à vitesse variable, profiter des algorithmes sophistiqués de commande des machines électriques pour d'une part détecter une défaillance au niveau d'un élément : capteurs, convertisseur, machine et d'autre part mettre en place des commandes redondantes permettant dans certains cas de s'en affranchir par le biais d'estimateurs et observateurs robustes.

Pour les dispositifs électriques, les axes de recherche dans les prochaines années devraient concerner l'augmentation de leur disponibilité, avec deux grandes directions :

- la prévention de défaillance qui permet l'optimisation des opérations de maintenance préventive,
- la localisation et l'identification rapide des défaillances et leur évaluation, dont le corollaire est la réduction des temps de maintenance et le respect des conditions de sécurité.

L'enjeu réside dans notre capacité à utiliser toutes les catégories d'informations potentiellement disponibles : la mesure ou la reconstruction, sur la base de modèles d'état ou de signal, de certains

indicateurs utiles pour le diagnostic ; « l'histoire » du dispositif et des conditions d'exploitation ; les données relatives à l'ensemble d'un parc installé ; la connaissance capitalisée des exploitants et des opérateurs de maintenance.

La recherche sera donc très pluridisciplinaire ; Elle sera guidée par les connaissances physiques et industrielles relatives à l'application considérée et par l'expérience de l'exploitant ou des opérateurs de maintenance pour guider dans le choix des méthodes et la façon de les utiliser et de les associer. Elle combinera les méthodes de traitement de l'information, de capitalisation des connaissances et de l'expertise, de fouille de données, d'analyse de situation et de prise de décisions.

Au final, un retour sur la conception devrait être une retombée majeure des progrès que l'on pourra enregistrer sur l'exploitation de ces différentes informations. En particulier la voie est ouverte pour la conception de produits à fiabilité ou disponibilité « adaptées » : selon l'application visée et l'importance relative des conséquences d'une défaillance pourquoi ne pas établir un critère supplémentaire de fiabilité qui serait par exemple du même type que le critère de taux d'utilisation d'un organe sur un cycle de fonctionnement.

E.3- Actions

E.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles

Les moyens humains et technologiques existent en ce qui concerne l'étude des constituants : la modélisation, l'analyse des mécanismes de défaillances, la détection et la localisation des défaillances par estimation d'état ou analyse de signal, les approches de commande (au sens automatique) tolérante au défaut.

Ces activités relèvent principalement de la communauté « Génie Electrique » (GDR SEEDS) en relation étroite avec les communautés voisines de l'automatique et du traitement de signal...

Cependant, sur l'aspect système qui est évoqué, la notion de retours d'expériences nécessitera d'une part une évolution des compétences des différents protagonistes mais aussi un élargissement des partenariats vers d'autres communautés travaillant sur les méthodes heuristiques, la fouille de données, etc. et une forte participation des industriels concepteurs et utilisateurs qui sont les seuls à être en possession de données caractérisant l'usage des systèmes.

De même pour les retombées en matière de conception, la communauté en charge de cette activité est très attentive et aura probablement une forte contribution pour la définition de critères liés au dimensionnement et la conception.

Il semble que le thème de sûreté de fonctionnement ne puisse pas, vu la maturité de la communauté dans le domaine, faire l'objet d'un projet de recherche propre, ou alors sur un système très concret qui réunirait acteurs de la recherche et industriels : armoires électriques, transformateurs, actionneurs pour l'aéronautique, etc....

Dans chacun de ces cas, des données d'utilisation existent et l'objectif serait d'une part de mettre en place des méthodologies regroupant les activités de modélisation, de traitement de données de retour d'expériences, de mise en place d'observateurs et de planification d'opérations de maintenance.

E.3.b- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

1 : Pour ce qui concerne les dispositifs électriques, ponctuellement couvert dans les programmes dédiés à tel ou tel secteur

2) Nom des programmes nationaux et internationaux concernés – liens

Programme CNRS/ DGA concernant les séjours d'études et de recherches de longue durée à l'étranger

<http://www.cnrs.fr/fr/departements/docs/Dossier-DGA.doc>

Commission européenne : Exemple d'illustration

FP7 : Transport

ACTIVITY 7.1.1 THE GREENING OF AIR TRANSPORT

AREA: 7.1.2.1 Aircraft Systems and Equipment for Improved Aircraft Throughput - AAT.2007.2.1.3. Maintenance and Repair

« Advanced concepts and techniques for continuous health and usage monitoring of structures and systems; advanced concepts and technologies for 'smart' maintenance systems, including self-inspection and self-repair capabilities; methods and techniques for on-time maintenance and elimination of unscheduled maintenance ».

AREA: 7.1.3.4 Operational Safety - AAT.2007.3.4.2. Maintenance

« Advanced concepts and techniques for continuous health and usage monitoring; advanced concepts and technologies to enable 'smart' maintenance, including self-inspection and self-repair capabilities »

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance [3 : dans la moyenne])

Domaine d'activité peu couvert en général

4) Disciplines concernées

- Automatique
- Traitement de signal
- Analyse et Mathématiques Appliquées

E.4- Références

- Sites

<http://www.imdr-sdf.asso.fr/v2/extranet/index.php?>

<http://www.rufereq.asso.fr/index.htm>

- Conférences majeures

Peu de conférences dans le domaine du Génie Electrique (constituants)

<http://www.qualita2007.uac.ma/>

<http://www.ewh.ieee.org/cmte/ias-esw/>

IEEE IAS Electrical Safety Workshop

<http://www.esrel2006.com/>

colloque lambdamu sûreté de fonctionnement

The European Safety and Reliability Conference

<http://www.esrahomepage.org/conferences.aspx>

Colloquium on Reliability in electromagnetic Systems

<http://www.iee.org/events/reliability.cfm>

- Revues majeures

Idem : pas de revues dédiées au domaine du Génie Electrique (constituants)

F- Production d'électricité - Systèmes énergétiques autonomes ou semi-autonomes (Bâtiments, sites isolés, réseaux embarqués)

F.1- Contexte général et enjeux

F.1.a- La production d'électricité

Les pertes moyennes d'énergie dans la production d'électricité sont de l'ordre de 66%. Selon les solutions, 25 à 60 % de la source primaire combustible utilisée est convertie en électricité. Le potentiel d'innovation en vue d'une meilleure efficacité est important. A titre d'illustration, les turbines à cycle combiné au gaz ont des rendements qui peuvent atteindre 60%, ce qui dépasse largement celui des centrales thermiques conventionnelles.

La part de l'énergie électrique produite à partir de sources d'énergies renouvelables est de 13% dans l'Europe des 25, de 12% en France (chiffres 2004). L'hydraulique est largement majoritaire (69,5% dont 6% pour la petite et moyenne hydraulique), suivie de la biomasse (15,7%), le vent (13,4%), la géothermie (1,3%) et le solaire (0,2%).

Les directives européennes fixent l'objectif de 21% en 2010. Les investissements devraient principalement concerner l'éolien et la biomasse.

Sur base d'une croissance annuelle estimée à 1.5%, Eurelectric, l'association de l'industrie électrique, prévoit qu'environ 520 GW de nouvelles capacités de production devront être installées d'ici 2030 dans l'UE à 15. Ceci impliquera des investissements considérables, en particulier liés au renforcement des réseaux de distribution et transports de façon à permettre l'insertion massive de ressources de production décentralisée renouvelables : les coûts s'élèveront à des milliards d'Euros.

Par ailleurs, le transport et la distribution de l'énergie électrique entraînent jusqu'à 7% de pertes de l'électricité produite (jusqu'à 2% pour le transport et 10% pour la distribution). Les pertes en lignes en France ont représenté 32,4 TWh en 2005, soit l'équivalent de la consommation d'électricité de 8 millions de foyers français (hors chauffage et Eau Chaude Sanitaire). La production décentralisée maîtrisée devrait permettre d'une part d'optimiser l'efficacité énergétique et, d'autre part, d'augmenter la disponibilité et la qualité de l'énergie.

Remarque : Pour ce qui concerne les réseaux embarqués, la production d'énergie électrique est en partie traitée (générateurs électromécaniques) dans la fiche prospective relative « [conception et optimisation des dispositifs de conversion de l'énergie électrique](#) ».

F.1.b- Les bâtiments

En France, le secteur du bâtiment (habitat et tertiaire) consomme aujourd'hui 47% de l'énergie finale disponible et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre. Ce secteur compte par ailleurs pour 65% de l'énergie électrique produite en France. Face aux inquiétudes sur la disponibilité de la ressource primaire d'énergie et aux interrogations relatives au dérèglement climatique il apparaît une volonté de réduction des émissions et de la consommation d'un facteur 5 et le concept de bâtiment à énergie positive émerge. La part du neuf ne représentant que 2% du parc, l'effort principal ira dans la rénovation de l'ancien (enveloppe), dans une meilleure efficacité de l'appareillage, de l'intégration de systèmes de production (à base de renouvelable et/ou non conventionnels) au niveau décentralisé.

Un bâtiment peut déjà être un lieu de **production décentralisée** utilisant des sources de type

éolienne, solaire, géothermique, etc. Pour favoriser leur implantation, de gros efforts sont concentrés sur le développement de nouvelles technologies visant à

- améliorer le rendement des sources existantes ou à en créer de nouvelles.
- Gérer de manière optimale les flux énergétiques au sein du bâtiment (immobilier), d'un quartier ou d'une ville (urbain) de manière réactive avec le marché, la disponibilité et la prévision de la disponibilité de ressources d'énergie primaires.
- Améliorer l'efficacité des charges.

La mise en œuvre de la directive sur la performance énergétique des bâtiments (2002/91/EC), permettra un gain estimé de quelques 40 Mtep d'ici 2020. Une ampoule économique consomme 5 fois moins d'électricité qu'une ampoule normale. Un remplacement des ampoules peut facilement générer des économies de 100€ par an pour un ménage moyen. Les consommations en mode de veille peuvent grimper à 5%, voire 10% de la consommation totale d'électricité dans le secteur résidentiel.

F.1.c- La cogénération

La **cogénération** recèle un potentiel d'efficacité important. Environ 13 % de l'électricité consommée dans l'Union européenne est produite avec la technologie de la cogénération. Les installations existantes de chauffage urbain et de cogénération, y compris leurs applications industrielles, peuvent économiser 3 à 4% d'utilisation d'énergie primaire par rapport à une production séparée.

Ces cinq dernières années ont vu l'émergence d'une offre de très petites turbines entre 5 et 250 kW pour des usages industriels, dans le tertiaire et dans le résidentiel. En Europe, on dénombre plus de dix mille installations, mais seulement une trentaine en France. A elle seule, la Hollande compte 2500 installations de petites tailles. A titre d'exemple, le parc de petites cogénérations situé dans la ville de Rottweil (25 000 habitants, Allemagne) couvre 20% des besoins électriques de la ville.

La consommation de gaz naturel dans le résidentiel est actuellement de 121 TWh dont 94 % pour le chauffage et l'Eau Chaude Sanitaire (ECS : 9 millions d'abonnés résidentiels). Un remplacement à l'identique des chaudières thermiques individuelles par un système de **micro-cogénération** permettrait une coproduction d'électricité d'une trentaine de TWh avec un rendement électrique supérieur à 30%. Il faut donc développer un plan d'action sur l'efficacité énergétique par l'utilisation combinée des technologies les plus modernes permettant ainsi d'économiser plus de 20% de la consommation d'énergie des Etats membres de l'Union européenne.

F.1.d- Les systèmes et réseaux embarqués

Si la part d'électricité consommée dans les transports ne concerne que 3% de la totalité (transports ferroviaire et urbains), ce domaine ne constitue pas moins un secteur clé en matière de recherche et développement. C'est en effet à une véritable mutation vers le « plus électrique » que nous nous dirigeons et cela pour tous les modes de transports, de l'avion au bateau sans oublier les véhicules automobiles et ferroviaires. En quelques années, la puissance électrique embarquée dans un aéronef devrait presque quadrupler, pour un avion de taille donnée, en raison du remplacement de systèmes hydrauliques et pneumatiques (conditionnement d'air, anti-givrage, commande de vol,...) par un actionnement à puissance électrique. Les navires ont déjà connu cette mutation avec les systèmes à propulsion hybride diesel – électrique. Dans le ferroviaire, même si la majorité des équipements sont depuis longtemps électriques, la puissance thermique (diesel), bruyante et polluante, constitue toujours une part importante du réseau ferré, dont les récentes annonces politiques réclament la suppression imminente. Le ferroviaire pourrait ainsi « montrer la voie » à l'automobile : on constate en effet récemment les premiers frémissements allant dans le sens de l'hybridation du diesel par des organes de stockage électrochimiques ou électromécaniques, ceci en attendant la pile à combustible.

La SNCF, en construisant la locomotive LHYDIE (Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigation en Energétique, projet ANR PREDIT PLATHEE) manifeste sa volonté d'accompagner cette mutation. Sur un tel système, selon les segments de mission, les gains en pollution et consommation sont substantiels, et le dimensionnement du groupe thermique peut être réduit jusqu'à trois quarts. Par rapport à l'automobile, un des gros avantages du ferroviaire (flotte captive) réside dans la connaissance de la mission, autorisant une optimisation de la gestion énergétique. Enfin, dans l'automobile, les projets de véhicules électriques ou hybrides sont nombreux, mais à l'exception de l'exemple typique de la Prius, tardent à franchir la barrière de l'industrialisation massive en raison de questions moins techniques qu'économiques voire politiques (incitations,...). En revanche, comme dans l'aéronautique, nous sommes depuis quelques années dans l'ère du plus électrique en ce qui concerne les accessoires, avec là encore le remplacement de fonctions mécaniques ou hydrauliques par des actionnements à puissance électrique : on peut ainsi citer la direction assistée, le freinage...

F.2- Verrous et recherches à mener

F.2.a- Equipements, unités de génération et de stockage d'électricité

1) Enjeux

- Générateurs électriques optimisés en termes d'architectures et de contrôle pour :
 - les systèmes à base d'énergies renouvelables et/ou non conventionnels (éolien, PV, hydrolien, petite hydraulique, PAC ..).
 - le domaine de l'embarqué : générateurs électriques à forte compacité (actionneurs électromécaniques hautes vitesses, Cf thème « [Conception et optimisation des dispositifs de conversion de l'énergie électrique](#) »).
- Interfaces électroniques de puissance des différents systèmes de production dispersés,
- Systèmes de stockage à courte et longue durée : amélioration de l'efficacité technico-économique par la technologie et par le management : par exemple, possibilité d'améliorer le rendement et la durée de vie par une gestion optimisée du cyclage.
- Gestion de l'intermittence de l'éolien et du photovoltaïque (moindre) à grande échelle ;
- Problématique des modes dégradés, de la fiabilité en général, de la maintenance, de la maintenabilité et de la supervision.

2) Axes de recherche : Les thèmes de recherche à développer.

- La définition et l'optimisation des architectures de puissance. Par architecture de puissance, il faut entendre l'association de sources d'énergie (générateurs tournants, piles à combustible, ...), de dispositifs de stockage et de charges (actionneurs, auxiliaires, ...) interconnectés par des supports de transmission de l'énergie électrique (réseaux continus, alternatifs) à travers des interfaces électroniques de puissance.
- La gestion dynamique des flux d'énergie dans le système ou dans un sous-ensemble du système tenant compte des contraintes, limitations, critères privilégiés et scénarii de fonctionnement retenus ; cela inclut :
 - La répartition optimale de l'effort énergétique et des sollicitations entre les différentes composantes,
 - Le pilotage optimal des charges lors des différentes phases avec anticipation de la demande ou restitution,
 - La gestion optimale des actifs et de la continuité de service à assurer lors de pannes internes ou externes au système.
- Le contrôle robuste et performant des convertisseurs interfaçant les différents constituants de la chaîne de puissance de façon à ce qu'ils suivent les consignes fixées par le système de gestion d'énergie en tenant compte des dérives et dispersions paramétriques, des perturbations

amont et aval, des charge/sources connectées, etc.

- La détection et la localisation des défaillances affectant les composants de la chaîne de puissance, les capteurs ou les dispositifs de contrôle – les processus de reconfiguration exploitant les redondances et la hiérarchie des usages ; la mise en œuvre d’outils d’aide à la maintenance...

3) Verrous et difficultés particulières : Les problèmes scientifiques qui sont posés incluent :

- Les modèles :
 - pour le dimensionnement des constituants (Cf. thème « [Conception et optimisation des dispositifs de conversion de l’énergie électrique](#) ») pour la simulation et la compréhension des interactions (statiques, dynamiques,..) au sein de la chaîne de puissance
 - pour la synthèse des lois de pilotage des constituants et de gestion de l’ensemble (répartition de l’énergie, stratégie de modes dégradés).
 - Pour la représentation du vieillissement des composants et la caractérisation des durées de vie
- Les méthodes de réduction de modèles et d’extraction des informations pertinentes relatives aux performances des solutions
- Les méthodes d’optimisation multicritères de systèmes combinant des variables de conception de nature discrète (paramètres combinatoires liés aux choix de structure et d’architecture, au type d’éléments ou de matériaux...) et de nature continue (paramètres de dimensionnement, variables énergétiques,...). Ces méthodes font appel à des mécanismes de type déterministe (optimisation type gradient) et aléatoires dirigées (algorithmes génétiques par exemple)
- Les méthodes de gestion temps réel des actifs (asset management) et des prises de décisions.
- Les méthodes de détection, de localisation et de caractérisation des défauts affectant les constituants du système (générateurs, éléments de stockage, charges et interfaces de puissance) ainsi que les réseaux d’interconnexion (ruptures de câbles, dégradation d’isolation). Ces méthodes sont basées sur l’analyse des données temps réel disponibles sur les constituants, sur le contexte, sur les données issues du retour d’expérience, etc.
- Les méthodes de capitalisation de l’expérience et de fouilles de données adaptées aux problèmes de la sécurité, de la gestion des actifs, etc.

Un certain nombre de travaux sont en amont et relativement génériques, d’autres consistent en des déclinaisons de résultats génériques vers telle ou telle catégorie d’applications ou application, d’autres consistent à la recherche de solutions spécifiques.

F.2.b- Entités énergétiquement autonomes ou semi autonomes

1) Enjeux

Cette partie concerne l’intégration aux bâtiments, l’autonomie énergétique et la sécurité, la bonne utilisation de la cogénération

Axes de recherche : En ce qui concerne le **bâtiment**, trois axes de recherche peuvent être privilégiés:

- Efficacité énergétique du bâti et de l’appareillage,
- Intégration des ressources renouvelables (le solaire est le plus distribué),
- Gestion optimale des flux énergétiques :
 - En intégrant l’aspect économique, le confort
 - Multi sources (thermique, électrique)
 - Multi origines (renouvelable, gaz, réseau...)

- En temps réel pour répondre à la fluctuation de la ressource, des coûts, de la prévision
- Pilotage coordonné des sources et des charges.

2) **Verrous et difficultés particulières :**

- Le découplage actuel entre la production d'électricité et celle de la chaleur, de la ventilation et du froid, la difficulté de dialogue interdisciplinaire (sémantique, outils et partage de compétences)
- La grande diversité des sources d'énergie, de charges et de vecteurs énergétiques potentiels et le couplage fort entre nature de bâti et usages d'une part, solutions d'autre part. Pour être traité dans toute sa dimension, le problème nécessite une plus grande interdisciplinarité des équipes de recherche.
- Le caractère semi autonome de l'installation, et donc la prise en compte du réseau auquel elle reste connectée et du rôle que peut jouer le bâtiment par rapport au réseau (production d'énergie, participation aux services système, possibilités d'îlotage).

Pour ce qui concerne les deux premiers points, les recherches qui entrent dans le champ de ce projet ne sont qu'une composante (faible) d'un ensemble plus considérable de travaux portant par ailleurs sur les isolants, la thermique des bâtiments, les cellules solaires, les piles, les batteries, etc. Cependant le vecteur électricité est toujours un élément, souvent central de la solution énergétique et les gains que l'on peut obtenir sur les composants électriques ou électroniques de puissance peuvent contribuer au gain global et à faire évoluer la place de l'énergie électrique au sein du mixe énergétique nécessaire pour le bâtiment dans une logique de moindre impact environnemental, de consommation réduite, de dimensionnement moins coûteux des systèmes de production et de stockage locaux, de suppression des conversions multiples actuelles ...

F.2.c- **Systèmes de transports et réseaux embarqués**

1) **Enjeux :**

Systèmes sûrs de fonctionnement, à forte puissance massique, forte efficacité énergétique, faible consommation/pollution et rentables économiquement.

2) **Axes de recherche, difficultés et verrous :**

Plusieurs axes sont communs à ceux explicités ci-dessus :

- Définition et optimisation des architectures du système électrique (du composant au réseau)
- Gestion dynamique des flux d'énergie dans le système : vu les niveaux de puissance électrique embarqués pour la propulsion ou les auxiliaires, un management de l'énergie intelligent (délestage) est primordial pour éviter un surdimensionnement. Ce management de l'énergie doit évidemment intégrer les fonctionnements dégradés.
- Sûreté de fonctionnement :
 - Détection et la localisation des défaillances : à noter à ce niveau que, si des efforts conséquents en matière de recherche existent au niveau 'constituants', les moyens investis sont très insuffisants au niveau 'système' (chaînes d'énergie, réseaux embarqués).
 - Développement d'outils dédiés à la maintenance prédictive

D'autres sont plus spécifiques aux réseaux embarqués, tels que :

- L'insertion dans les réseaux de l'offre technologique relative aux nouveaux composants et constituants (stockage, piles à combustible) à l'intégration de puissance : les nouvelles architectures de réseaux se doivent d'intégrer les avancées technologiques mais doivent aussi, a contrario, susciter de nouveaux besoins et orienter de nouvelles voies d'investigation en matières de matériaux (exemple des matériaux à hautes températures ou des matériaux magnétiques pour la haute fréquence) ou de constituants à fort degré d'intégration.

- Fusion des réseaux 'énergie' et 'information' : des techniques sont en émergence, telles que les systèmes de courants porteurs, qui devraient être synonymes de gains de masse et de réduction des coûts substantiels ;
- Approche stochastique du dimensionnement des constituants du réseau : aujourd'hui les constituants réseaux sont le plus souvent dimensionnés selon le « pire des cas », ce qui tend à surdimensionner le câblage, les équipements et en particulier les générateurs. Une prise en compte probabilité – puissance, prenant en compte le foisonnement des consommateurs permettra l'optimisation du dimensionnement du réseau. Des outils d'analyse systémique adaptés (Monte Carlo,...) doivent être développés ;
- Optimisation multicritère multiphysique : une difficulté majeure consiste à concevoir une architecture réseau et la dimensionner en regard de multiples critères, allant de la fiabilité à la réduction de la masse et de l'encombrement, sans omettre le coût, la stabilité du réseau et la qualité des formes d'ondes (filtrage, CEM), l'efficacité énergétique, la pollution et le recyclage (notion d'éco-conception). Les compromis à trouver vis-à-vis de cet ensemble de critères et contraintes requièrent une approche multiphysique qui pose là encore le problème épineux de la représentation par un modèle systémique pertinent.
- Traitement de la mission : les notions de mission ou d'ensembles de mission (segments) sont essentielles en matière de transport et de systèmes embarqués. Une réflexion théorique, visant une représentation pertinente et « compacte » de la mission est essentielle. Cette réflexion touche notamment au domaine connexe des mathématiques (techniques de classement) et du traitement du signal.
-
- Protections spécifiques aux réseaux à courant continu pour systèmes de très forte puissance (réseaux embarqués navals) : pouvoir de coupure et sélectivité.

F.3- Actions

F.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles

- Plates-formes technologiques Mini réseaux hybrides (G2ELab et L2EP)
- Plates-formes technologiques (IREENA, L2ES et GREAH)
- Moyens humains : 15% des effectifs de SEEDS soit environ une soixantaine de chercheurs et enseignants-chercheurs permanents

F.3.b- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

Equipements et unités de génération et de stockage d'électricité

Programmes nationaux : 1 – très peu couvert (pas de projet [ANR](#) spécifique à ce jour, des bribes dans le projet ANR-PV, et prospective [ADEME](#)), toutefois l'appel 2007 ANR comprend un volet stockage.

Programmes internationaux : 4 - bien couvert dans la première tranche du [7ème PCRD](#)

Entités énergétiquement autonomes ou semi-autonomes :

Programmes nationaux : 1 – très peu couvert (pas de projet ANR spécifique à ce jour, des bribes dans le projet ANR-PV, et prospective [ADEME](#))

Programmes internationaux : 4 - bien couvert dans la première tranche du 7^{ème} PCRD

Systemes de transport et réseaux embarqués :

Programmes nationaux : 4 – bien couvert (ANR PREDIT, uniquement pour les transports

terrestres, moins bien couvert au plan national en aéronautique et transport naval)

Programmes internationaux : 4 - bien couvert dans la première tranche du 7^{ème} PCRD, projet JTI Clean Sky en aéronautique

2) Nom des programmes Nationaux et Internationaux concernés – liens

Programmes nationaux

ANR (PREBAT) B 1 : Les équipements énergétiques du bâtiment (systèmes de production d'énergie renouvelable et systèmes climatiques) Remarque : Ne concerne l'électricité que marginalement

ANR (PREDIT) 3 : Architectures hybrides et électriques

ANR (Pan-H) Piles à combustibles

ANR (PV) 4 : Systèmes complets et leurs composants

ANR (Stockage) Nouveau programme défini en lien avec l'[ADEME](#)

Programmes internationaux, Europe

Programme spécifique [FP7](#)

Energie : Production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables - Rendement énergétique et économies d'énergie

Plate-forme Technologique Européenne SMARTGRIDS

JTI clean sky en aéronautique, 'platform for green operation systems'

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance [3 : dans la moyenne])

Equipements et unités de génération et de stockage d'électricité :

3, dans la moyenne pour les équipements de production

2, plutôt en retard pour les équipements de production décentralisés et pour les sources de production à base d'énergie renouvelable

2, plutôt en retard pour le stockage hors batteries

Entités énergétiquement autonomes ou semi-autonomes :

3, dans la moyenne pour les équipements liés au photovoltaïque

2, très peu impliqués dans les projets européens du 6^{ème} PCRD sur le sujet

Transports, réseaux embarqués :

3, dans la moyenne. Thème fortement soutenu par l'industrie au plan national. Implication européenne et internationale un peu moins avérée.

4) Disciplines concernées (0 : pas concerné -> 5 : très concerné)

- Mécanique (3)
- chimie (4)
- énergétique (4)
- automatique, productique (optimisation et supervision) (4)
- économie (2)
- informatique, traitement de l'information (4)
- mathématiques appliquées (3)

F.4- Références

Sites Web

<http://www.industrie.gouv.fr>

<http://www.systemes-solaires.com>
<http://www.observ-er.org>
<http://www.fondem.org>
<http://www.iea.org/>
<http://www.ademe.fr/>

Revues

- IEEE Transactions on Energy Conversion
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=60>
- Solar energy
http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/329/description#description
- Renewable energy
http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/969/description#description
- Power sources (PAC)
http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/504093/description#description
- EPSR
http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/504085/description#description
- Energy and buildings
http://www.elsevier.com/wps/find/journaldescription.cws_home/504083/description#description

Conférences

- Eolien
European Wind Energy Conferences & Exhibitions
<http://www.ewec.info/>
- Solaire
European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition
<http://www.photovoltaic-conference.com/>
Liste de conférences intéressantes
<http://www.solarbuzz.com/InfoCenterUpcoming.htm>

G- Réseaux électriques de transport et de distribution

G.1- Remarques préliminaires

On distingue plusieurs catégories de réseaux électriques :

1. Le réseau de transport et de répartition : ce réseau a pour vocation à transporter et répartir la production des grosses unités. Il est maillé et par nature paneuropéen. Certains gros consommateurs y sont directement connectés
2. Le réseau de distribution : ce réseau assure la distribution de l'électricité vers les utilisateurs finaux à partir des points de soutirage sur les réseaux de transport et de répartition et de connexion des générations dispersées (GED) qui lui sont désormais directement raccordées
3. Les réseaux de sites isolés (îles) : Ils interconnectent les sites de production et les utilisateurs finaux
4. Les réseaux internes aux unités industrielles et aux bâtiments : ils assurent la distribution de l'électricité vers les charges finales à partir des points de soutirage sur les réseaux de répartition ou de distribution et des points de connexion des unités de génération qui peuvent leur être propres
5. Les réseaux spécifiques des systèmes de transport ferroviaire et urbains : Ils assurent l'alimentation des caténaires et autres supports d'alimentation du matériel roulant à partir des points de soutirage sur le réseau de distribution et des points de connexion des unités de génération qui peuvent leur être propres
6. Les réseaux électriques de bord des avions, navires, rames ferroviaires ou urbaines, voire véhicules routiers

Pour simplifier, les enjeux principaux qui concernent ces différentes catégories sont :

1. pour le réseau de transport et de répartition : les congestions et les risques d'effondrement
2. pour le réseau de distribution : l'insertion de la production décentralisée dans le réseau
3. pour les réseaux de sites isolés : la stabilité en fréquence et le mixe énergétique
4. pour les réseaux internes aux unités industrielles et aux bâtiments : l'intégration du renouvelable et le mixe énergétique
5. pour les réseaux spécifiques aux systèmes de transport ferroviaire et urbains : la qualité et la tenue en tension liée à l'augmentation du trafic
6. pour les réseaux embarqués : la fiabilité, la CEM et la masse

Les réseaux de sites isolés et d'unités industrielles ou de bâtiments et les réseaux embarqués sont abordés dans le thème « Production d'électricité - Systèmes énergétiques autonomes et/ou semi autonomes : bâtiments, sites isolés, réseaux embarqués »

G.2- Contexte général

G.2.a- La production « décentralisée »

Aujourd'hui, la France assure 78 % de sa production d'électricité grâce à son parc de réacteurs nucléaires, ce qui lui permet d'atteindre un taux d'indépendance énergétique proche de 50 %, lui garantissant une grande stabilité d'approvisionnement. Sur les 550,1 TWh bruts produits en 2005, la part de production d'électricité d'origine renouvelable représente 11 % dont 56,2 TWh d'origine hydraulique (10,2 %), alors que la production d'électricité à partir de centrales thermiques classiques représente encore 59,7 TWh (10,8 %). Il est à remarquer que la production d'électricité à partir des centrales thermiques et hydrauliques devrait rester stable dans les années à venir avec des rendements énergétiques qui devraient augmenter.

La France s'est fixée comme objectif, dans le cadre de la directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001, de produire 21 % de sa consommation d'électricité à partir de sources renouvelables en 2010. En considérant un taux de croissance de la demande d'électricité de 1,5 % par an, il faudra nécessairement doubler la production d'électricité d'origine renouvelable pour alors en produire plus de 120 TWh contre 60,5 TWh aujourd'hui.

L'énergie éolienne représente aujourd'hui la principale énergie renouvelable disponible pour remplir l'objectif de la directive, loin devant l'énergie solaire par exemple, qui bénéficie par ailleurs du plus fort potentiel de progrès en termes d'efficacité énergétique, de capacité d'intégration aux bâtiments et de coût.

L'éolien représente en France un gisement potentiel terrestre évalué selon l'Association Européenne d'Energie Eolienne (EWEA) à quelque 75 TWh/an (soit l'alimentation électrique de 20 millions de foyers) et un potentiel offshore inexploité de 475 TWh annuel (troisième gisement d'Europe après le Royaume Uni et le Danemark). Fin 2005, la puissance éolienne installée en Europe était de l'ordre de 40 GW, avec en tête l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark qui à eux trois cumulent 30 GW, la France était à 756 MW. Au 31 mars 2006, la France comptait 150 parcs éoliens pour une puissance électrique cumulée de 918 MW, portant ainsi le nombre d'aérogénérateurs installés à un millier. Fin 2006, cette puissance était portée à 1500 MW alors que la puissance éolienne installée en Allemagne atteint aujourd'hui 20 000 MW, et en Espagne 12 000 MW. Par ailleurs, les projections de l'EWEA sur les puissances éoliennes installées en Europe sont de 75 GW en 2010, 180 GW en 2020 et 300 GW en 2030.

S'agissant du solaire photovoltaïque, si la progression du marché français du photovoltaïque en terme de puissance a été de 60 % en 2004 avec 5,8 MW installés, la France reste toujours très en retard par rapport à l'Allemagne qui a installé 300 MW en 2004. Par ailleurs, la production mondiale d'électricité photovoltaïque a représenté 3,25 TWh en 2004 (dont plus de 50% en électrification rurale), ce qui correspond à une quantité marginale vue des réseaux de transport et de distribution.

Considérant le potentiel français « d'hydroliennes maritimes » estimé à 14 TWh, et celui de la « petite hydraulique » à 4 TWh, le grand éolien devra donc représenter plus de 75 % des 60 TWh d'électricité renouvelable supplémentaires nécessaires en 2010, ce qui imposera la mise en place d'au moins 14 000 MW éoliens sur le territoire national (soit plus de six mille éoliennes à connecter au réseau d'ici trois ans).

On devra donc faire face à la multiplication de points d'injection de puissance, sur le réseau de distribution essentiellement, mais également sur le réseau de transport pour certaines grosses unités éoliennes ou centrales solaires. Ces injections de caractéristiques très différentes vont avoir un impact sur les réseaux à plusieurs niveaux.

G.2.b- Optimisation de l'énergie transférable

Afin de faire face aux intermittences de productions éoliennes, les gestionnaires de réseau, en Irlande ou au Danemark, exigent des fermes éoliennes la possibilité de constituer des réserves pour contribuer au réglage de fréquence. L'Irlande envisage ainsi 700 MW de stockage pour 3000 MW d'éolienne. Ce type d'exigences soulève des difficultés à résoudre :

- D'une part, la constitution de réserves suppose a priori de dégrader volontairement les performances de chaque turbine en fonctionnant à puissance réduite pour garder une réserve primaire de puissance active,
- D'autre part, la réserve constituée par l'éolien dépend du niveau de vent observé, et en cas de chute de la vitesse du vent, la disponibilité de cette réserve à la hausse peut être compromise,

En permettant de contourner ces difficultés, la mise en place d'unités de stockage peut devenir un atout supplémentaire aussi bien pour la production éolienne (rendement plus important et réponse face aux exigences) que pour le réseau électrique (mise en place de réserve, congestion évitée, insertion facilitée...). Mais il s'agit alors d'optimiser le choix et le dimensionnement de cet équipement pour permettre une stratégie gagnant/gagnant entre le producteur et le système électrique.

G.2.c- Le contexte socio-économique

A l'exploitation verticale du réseau, de la production à la consommation, s'est substituée une organisation plus éclatée. Avec la dérégulation, le système de puissance s'est scindé en entités « indépendantes » (production, transport et distribution) ayant leur logique d'exploitation propre, associées à des organismes de régulation et à des services connexes.

En corollaire, les échanges de puissance se sont accrus, en particulier entre nations européennes, sans qu'il y ait d'augmentation conséquente des capacités de transport sur les lignes électriques et en particulier les interconnexions, sous la pression environnementale. Les congestions qui en résultent limitent la circulation des flux de puissance et peuvent mettre en danger les réseaux.

Enfin, le contrôle du réseau européen est aujourd'hui décentralisé et assuré par blocs constitués d'une ou plusieurs zones de contrôle. Cette gestion décentralisée par blocs qui s'accompagne d'échanges d'informations entre gestionnaires de réseaux de transport (GRTs), s'est révélée relativement efficace ces dernières années mais elle ne permet pas d'éviter tous les incidents (Cf. derniers incidents en date) et n'est pas forcément la mieux adaptée pour assurer un fonctionnement correct d'un marché de l'électricité globalisé à l'échelle européenne. Le concept de GRT européen, équipé d'outils de simulation et d'observation globales du réseau paneuropéen fait son chemin.

G.3- Enjeux

G.3.a- Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité

La gestion de l'éolien à grande échelle et l'optimisation de l'énergie transférable sont la clef de la réussite de ce projet ambitieux qui n'est pas sans poser de problèmes au niveau des réseaux de distribution et de transport de l'électricité.

Alors que 202 permis de construire, représentant une puissance de 1 230 MW, ont été délivrés en France entre le 1er février 2005 et le 1er février 2006, et que 661 sont en cours d'instruction, représentant une puissance de 4 651 MW, les premiers problèmes liés au raccordement au réseau apparaissent, car ces gisements sont le plus souvent à l'écart des zones peuplées et dans des zones où le réseau électrique est moins développé.

Au niveau du réseau de transport, les enjeux sont les suivants :

- A court terme, faire en sorte que les réseaux interconnectés fonctionnent correctement en présence d'une production décentralisée « subie »
- A moyen terme, sauf à renforcer et modifier le réseau existant, cette situation pourrait amener à limiter la production éolienne en période de vent important afin d'éviter de surcharger ce réseau durant certains régimes de fonctionnement, induisant une perte financière pour les exploitants des centrales éoliennes, tout en ne contribuant pas à la limitation des émissions de CO₂.

Au niveau des réseaux de distribution, la gestion des intermittences de production est le principal enjeu de l'insertion de la production décentralisée. Celle-ci n'est envisageable qu'à la condition de développer le stockage à grande échelle :

- En premier lieu, le choix des technologies de stockage, leur dimensionnement et leur contrôle doivent être réalisés par rapport aux services attendus en terme de puissance et de durée, voire de variabilité. En outre, dans le contexte où le stockage assurerait les réglages primaires voire secondaires du réseau auquel il est connecté, le temps de réponse du système de stockage peut être de quelques secondes à quelques minutes. Cette étude préalable devrait aboutir à identifier la technologie adéquate de stockage ou la combinaison de technologies.
- Le second enjeu est lié à l'intégration du stockage dans la gestion du réseau. L'utilisation du stockage est conditionnée à sa participation au réglage de l'équilibre production – consommation dans une plage de fonctionnement élargie. Sa supervision doit être intégrée dans la gestion du réseau électrique qui devra lui fixer une marge de puissance ajustable en fonction des besoins du système électrique (consommateurs, réglage de la tension, ...), de la production prévue de la source primaire et du niveau de stockage.
- Le troisième enjeu est lié à la valorisation économique du stockage. Le coût de l'utilisation d'une technologie de stockage mais également la valeur ajoutée par les fonctions ainsi apportées doivent être estimés de manière à pouvoir situer l'intérêt économique de cette solution. L'estimation économique apportée par la fourniture des services pourrait être réalisée en comparant par exemple le fonctionnement du réseau de distribution avec et sans stockage. La réduction obtenue des coûts d'exploitation du réseau, les coûts évités dans l'investissement de nouveaux équipements, l'économie liée à la réduction d'émission de gaz à effet de serre devront être également pris en compte de manière à avoir une vision globale de l'intérêt économique pour l'opérateur de réseau dans le cas où le stockage lui appartient ou pour prévoir l'impact sur les rémunérations du producteurs dans le cas où le stockage est associé directement à l'éolien.

G.3.b- Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée :

Au niveau de la distribution, les enjeux sont les suivants :

- A court terme, faire en sorte que les réseaux fonctionnent correctement en présence d'une production décentralisée « subie »
- A moyen et long terme, remodeler l'architecture des réseaux de distribution, les systèmes de protection et de commande pour « intégrer » la production décentralisée et en faire un élément actif de la sécurité et de la qualité de l'énergie. C'est le concept de réseau « intelligent » flexible, reconfigurable, auto-cicatrisant, avec possibilité d'îlotage ..., intégrant au mieux les énergies locales tout en garantissant, à minima les niveaux de qualité et de continuité de fourniture. L'accroissement de la flexibilité d'un réseau de distribution peut passer, a priori, par une recherche sur de nouveaux chemins pour aiguiller les flux d'énergie (nouvelles architectures/topologies) et l'introduction d'une densité de maillage à définir.

Ce concept ne peut se développer que si la production décentralisée est « dispatchable », malgré l'intermittence des sources. Elle peut alors contribuer aux services systèmes, c'est-à-dire aux réglages tension et fréquence, au même titre que les centrales classiques. Selon la taille des

unités, c'est envisageable au niveau d'une unité de production, en associant des systèmes de stockage par exemple, ou à l'échelle d'un ensemble cohérent d'unités regroupées dans des « centrales virtuelles »

- Enfin, si on pousse le concept de bâtiments ou d'unités industrielles à énergie positive, c'est-à-dire équipés de leurs propres systèmes de génération (capteurs solaires, géothermie, cogénération, etc.), on peut concevoir une architecture de mini réseaux interconnectés entre eux par le réseau de distribution.

Ces nouvelles organisations dans lesquelles, l'énergie est exploitée au plus près de sa production peut contribuer à réduire les pertes de transport et de distribution qui représentent aujourd'hui jusqu'à 7% de pertes de l'électricité produite (jusqu'à 2% pour le transport et 10% pour la distribution). soit 32,4 TWh en 2005 (l'équivalent de la consommation d'électricité de 8 millions de foyers français (hors chauffage et Eau Chaude Sanitaire). La **production décentralisée maîtrisée**, devrait donc permettre d'une part, d'optimiser l'efficacité énergétique et d'autre part, d'augmenter la disponibilité et la qualité de l'énergie.

G.3.c- Infrastructures critiques

La problématique des congestions et des « blackouts » sur le réseau paneuropéen de transport est un défi majeur lié à la sécurité de la fourniture d'électricité. Les problèmes qu'ont connus par exemple l'Italie en 2004 et l'ouest de l'Europe le 4 novembre 2006 en sont des exemples flagrants. Les enjeux consistent à éviter ou à contenir ces problèmes dans un contexte de complexité, de fragilité et de risques accrus, liés :

- à la dérégulation,
- à l'augmentation des échanges, en particulier aux frontières, et à leur caractère « erratique » qui accroissent les charges des lignes et des ouvrages et le couplage des réseaux nationaux,
- à la connexion « subie » de sources d'énergie intermittentes directement sur le réseau de transport,
- à la dépendance croissante des réseaux d'énergie aux systèmes de communication et de traitement de l'information, eux-mêmes sources de défaillances et d'attaques,

En exploitant les opportunités technologiques liées :

- aux méthodes et outils de communication et de traitement (décentralisé) de l'information,
- aux dispositifs électroniques de puissance,
- aux systèmes de stockage,
- aux possibilités de contrôle des échanges de et vers le réseau de distribution par la production, décentralisée et la consommation maîtrisée.

Dans tous les cas il faut garder en tête que le réseau électrique est formé de plusieurs couches d'appareillages et de contrôle qui se sont « empilées le long des années ». Le réseau actuel est loin d'être parfait et est loin du réseau que l'on pourrait concevoir et réaliser ex-nihilo à l'heure d'aujourd'hui. Il est évident que le coût de construction d'une nouvelle infrastructure en démantelant l'ancienne est inimaginable. La première difficulté est donc de s'adapter de manière quasi systématique aux structures et aux usages existants en adoptant une logique d'évolution et non de révolution. On peut cependant s'affranchir de ces contraintes pour les réseaux des pays en voie de développement ou pour les réseaux insulaires.

G.4- Verrous et recherches à mener

G.4.a- Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité

Enjeux : Gestion de l'éolien à grande échelle (7 000 MW sans renforcer le réseau et 14 000 MW avec renforcement du réseau) et optimisation de l'énergie transférable

Verrous et difficultés particulières : développement du stockage à grande échelle, modèles de prévision, participation aux services systèmes (dans les limites structurelles de l'éolien).

Axes de recherche : Les caractéristiques dynamiques du mode de stockage vont entraîner une recherche scientifique forte vis-à-vis de la conception de son dispositif de commande pour lui permettre de contribuer au réglage puissance/fréquence.

- Développement de commande multi-objectif ou de reconfiguration du dispositif de commande,
- Conception d'un outil permettant de réaliser une planification dynamique et rationnelle de l'énergie électrique à stocker de manière à maximiser la production éolienne. Les contraintes sous-jacentes sont l'exploitation aux mieux de la capacité de stockage et la satisfaction au global des besoins en énergie des consommateurs,
- Gestion des modes de marches critiques pour lesquels le moyen de stockage jouera un rôle de réglage, notamment en cas de surproduction au niveau des générateurs éoliens (au regard des besoins réels à l'instant considéré des consommateurs) et en cas de congestion provenant de la Haute Tension.

C'est à ce niveau là que se situera l'apport du stockage vis-à-vis de « l'intelligence » apportée au réseau et qui augmentera l'utilisation et le développement de générateurs éoliens.

Par ailleurs, l'apport du stockage sur le plan économique devra être réalisé. Il faudra alors définir un modèle mathématique qui reflète de manière réaliste les aspects économiques décrits précédemment.

G.4.b- Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée

Enjeux : projets de rupture compatibles avec le réseau actuel (réseaux « intelligents, flexibles, auto-cicatrisants, etc. »). Utiliser la production dispersée pour sécuriser les réseaux, améliorer l'efficacité de la chaîne d'énergie, contribuer aux services systèmes.

Principaux verrous :

Comme dit plus haut le premier est d'ordre structurel. Le deuxième est lié à l'intermittence, le nombre, la dispersion et la relative faible puissance des sources d'énergie

Axes de recherche :

- Outils d'analyse de réseaux en termes de qualité et de disponibilité de l'énergie délivrée aux utilisateurs,
 - Outils d'optimisation de l'architecture des réseaux en présence de production décentralisée,
 - Centrale et consommateur virtuels,
 - Protection des réseaux en présence de production décentralisée,
 - Détection et localisation de défauts dans les réseaux – lois optimales de reconfiguration de réseaux,
 - Planification à long terme: quelle topologie retenir pour l'évolution future des réseaux (introduction d'une certaine densité de maillage et conséquence sur le fonctionnement),
 - Planification à moyen terme: travaux intermédiaires pour aménager les transitions d'une topologie à l'année n à une topologie cible pour l'année $n+k$
- Ces aspects de planification sont des enjeux majeurs pour les responsables des concessions des réseaux de distribution.

G.4.c- Infrastructures critiques

Enjeux principaux: maîtrise des congestions et des « blackouts »

Verrous et difficultés particulières : La « dimension » mathématique du système étudié (nombre de noeuds, mailles et variables d'état, non linéarités, interactions entre sous-ensembles, éventuellement de nature différente (puissance et ICT), diversité des échelles de temps ...), le caractère aléatoire des événements, la diversité des risques, etc.

Axes de recherche

- Modélisation et simulation des grands systèmes complexes et hétérogènes
 - Compréhension des interactions composants-systèmes et systèmes de puissance-STIC, compréhension des dynamiques en jeu,
 - Décomposition optimale en sous-ensembles, réduction de modèles ...,
 - Modélisation des interdépendances entre infrastructures,
 - Modélisation des réseaux de distribution vus du réseau de transport par des équivalents agrégés dynamiques,
 - Modélisation de l'environnement externe, non ou peu observable,
 - Modélisation des producteurs.

- Gestion des actifs (Cf. [sûreté de fonctionnement des dispositifs](#))
 - compréhension et modélisation des mécanismes de vieillissement en conditions réelles d'exploitation,
 - méthodes d'évaluation des durées de vie, de prédiction des défaillances,
 - établissement de bases de données et de connaissances et développement d'outils d'extraction de l'information utile à la planification et à la gestion,
 - méthodes de planification et de gestion temps réel optimales.

- Evaluation des risques et des vulnérabilités
 - Elaboration d'indicateurs macroscopiques temps réel du niveau de sûreté du réseau,
 - Modèles des vulnérabilités, des menaces et des attaques potentielles,
 - Modèles des interdépendances entre réseaux et entre réseau de puissance et système de transmission et de traitement de l'information. Modèles d'analyse des phénomènes de cascade,
 - Modèles et outils pour l'analyse et la simulation des stratégies de défense contre les risques d'effondrement,
 - Modèles et outils de formation des personnels de conduite et d'aide à la planification et à la conduite temps réel,
 - Bases de données et de connaissances sur les événements critiques passés et outils d'extraction des informations pertinentes et d'élaboration des indicateurs utiles à l'évaluation des risques,
 - Méthodes et outils d'évaluation globale et statistique du niveau et des caractéristiques de vulnérabilité des réseaux (puissance et contrôle).

- Congestions
 - outils de prévision et d'analyse des congestions : analyse de contingences, traçabilité de l'énergie, méthodes de sensibilité, facteurs et indices de report de charge, ...
 - méthodes de gestion des congestions par reconfiguration des réseaux, re-répartition de la production ou délestage de charge, ...
 - Planification des ouvrages dans un système dérégulé,
 - Méthodes d'évaluation de la capacité de transfert maximale du réseau (Available Transmission Capacity (ATC)).

- Amortissement des oscillations de puissance
 - Analyse modale des grands réseaux,
 - Réduction d'ordre pour la conception de correcteurs coordonnés par des techniques de commande optimale,
 - Méthodes hybrides associant des correcteurs coordonnés et des correcteurs décentralisés (fonctions d'énergie) avec placement optimal des correcteurs selon le type.

- Mesures de renforcement

- Observabilité des grands réseaux : nombre et placement optimal des systèmes de mesure (PMU : Phasor Measurement Unit).
- Conception de systèmes de monitoring et de supervision (WACS : Wide Area Control System) à l'échelle du réseau paneuropéen.
- Contrôles robustes aux contingences
 - Outils temps réel d'évaluation prospective du comportement du système dans des situations critiques et d'aide à la décision pour les opérateurs de conduite de réseau,
 - Nouveaux concepts de contrôle décentralisé à sécurité intrinsèque,
 - Architectures permettant de contenir les effets de cascade entre infrastructures de transmission et de traitement de l'information d'une part, de puissance d'autre part,
 - Intégration et contrôle d'actionneurs de réseau à base d'électronique de puissance (FACTS : Flexible AC Transmission System) pour participer à la gestion des flux de puissance et du plan de tension.

G.5- Actions

G.5.a- Moyens technologiques et humains disponibles

- Plates-formes technologiques Mini-réseaux hybrides comprenant des simulateurs temps réels de réseaux et de composants de réseaux (ARENE URT, HyperSIM, RT-Lab) couplés à des dispositifs expérimentaux (systèmes de commande et de protection, émulateurs de sources d'énergie et de systèmes de stockage (G2ELab et L2EP)
- Plates-formes logicielles (Eurostag, EMTP, Arène PCNRT) d'étude dynamique de réseaux (G2ELab, L2EP, Supelec)
- SCADA d'ATOS Origin, en cours d'implantation (G2ELab)
- Plate-forme e-terra d'AREVA T&D composée d'un SCADA, d'un EMS/DMS, avec estimateur d'état et du simulateur DTS pour l'entraînement des opérateurs (G2ELab).
- Plate-forme d'économie expérimentale couplée à un logiciel de load flow (Supelec).
- plates-formes technologiques spécifiques (G2ELab, L2EP, IREENA et GREAH)
- Moyens humains : 10% des effectifs de SEEDS soit environ une quarantaine de chercheurs et enseignants-chercheurs permanents – environ soixante thèses en cours

G.5.b- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

- **Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité :**
Programmes nationaux : 1 – très peu couvert (pas de programme [ANR](#) spécifique à ce jour, marginal dans les programmes ANR-PV et stockage, A voir : Programme [ADEME](#) sur les réseaux intelligents en cours d'étude). Rien sur l'éolien
Programmes internationaux : 4
 En Europe, Plateforme Européenne (ETP) SMARTGRIDS, bien couvert dans le 6^{ème} PCRD et la première tranche du 7^{ème} PCRD (programme Energie)
 Aux Etats-Unis, l'EPRI coordonne plusieurs programmes de recherche sur les réseaux énergétiques du futur, dont Intelligrid qui porte spécifiquement sur les réseaux intelligents.
- **Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée**
Programmes nationaux : 0 - pas couvert (A voir : Programme ADEME sur les réseaux

intelligents en cours d'étude ?)

Programmes internationaux : 4

En Europe, Thématique centrale de la Plateforme Européenne (ETP) SMARTGRIDS - bien couvert dans le 6^{ème} PCRDT et la première tranche du 7^{ème} PCRD (Programme Energie). Couvert aux USA et au Japon (Cf. point précédent).

- **Infrastructures critiques**

Programmes nationaux : 3 – Partiellement couvert (projet ANR Sécurité)

Programmes internationaux : 4

En Europe, dans le champ de la Plateforme Européenne (ETP) SMARTGRIDS, bien couvert dans la première tranche du 7^{ème} PCRD (Programme Energie et Programme commun IST-Sécurité)

2) Nom des programmes nationaux et internationaux concernés – liens

- **Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité**

ANR : aucun projet en lien avec l'éolien, couverture très partielle en ce qui concerne l'intégration au réseaux dans le **programme PV Thème 4.2** : L'intégration des systèmes photovoltaïques dans des réseaux intelligents en proposant des solutions pour optimiser la conduite d'un réseau électrique comportant une forte composante de production répartie. A voir le futur programme Stockage

ADEME : programme 6 « Réseaux intelligents et stockage de l'énergie » du plan stratégique de recherche 2007/2010. A voir le contenu

Commission Européenne

7^{ème} PCRD : FP7-ENERGY-2007- 2-TREN

Topic ENERGY.2007.2.3.5: Integration of wind power into the European power system

Topic ENERGY.2007.7.3.5: More efficient integration of renewable energy into future infrastructures

- **Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée**

ANR : aucun projet en lien avec ce thème

ADEME : programme 6 « Réseaux intelligents et stockage de l'énergie » du plan stratégique de recherche 2007/2010. A voir le contenu.

Commission Européenne

7^{ème} PCRD : FP7-ENERGY-2007-1-RTD

7.1: development of inter-active distribution energy networks

7.2: pan-european energy networks

- **Infrastructures critiques**

ANR Programme Sécurité :

1 : l'analyse des vulnérabilités des systèmes et les risques, leur définition et hiérarchisation

3 : les outils de modélisation, de simulation et d'aide a la décision

4 : le traitement de l'information

Commission européenne

7^{ème} PCRDT : ETPs « Industrial safety

Programme spécifique PC7

9. Sécurité : Sécurité des infrastructures et des services d'utilité publique

3. TIC : Intégration de technologies

7^{ème} PCRDT : FP7-ICT-SEC-2007-1

Focus 1. Pervasive and Trusted Network and Service Infrastructures / Critical Infrastructure

Focus 2. Security systems integration, inter-connectivity and interoperability

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5 : en avance [3 : dans la moyenne])

- **Intégration du renouvelable au réseau de distribution et de transport de l'électricité :**
3, dans la moyenne
- **Architecture, protection et management des réseaux électriques de distribution en présence de production décentralisée :**
3, dans la moyenne
- **Infrastructures critiques**
4, plutôt en avance

4) Disciplines concernées (0 : pas concerné -> 5 : très concerné)

- Mécanique (3)
- automatique (optimisation) (3)
- économie (3)
- gestion des risques (4)
- informatique, traitement de l'information (4)
- mathématiques appliquées (4)

G.6- Références

La recherche sur l'intégration des énergies renouvelables, la production distribuée et les réseaux énergétiques de demain est actuellement très active à l'échelle européenne. Dans le cadre des projets européens financés par les 5^{ème} et 6^{ème} PCRD, de nombreux programmes de recherche ont été menés en coopération avec plus d'une centaine de partenaires (organismes publics, laboratoire de recherche, industries...) :

- IRED (Integration of Renewable Sources and Distributed Generation into the European electricity Grid)

www.ired-cluster.org – FP5+6

- Technology Platform for the Electricity Networks of the Future

http://ec.europa.eu/research/energy/nn/nn_rt/nn_rt_dg/article_2262_en.htm - FP6

Aux Etats-Unis, l'Electricity Power Research Institut (EPRI) coordonne plusieurs programmes de recherche sur les réseaux énergétiques du futur, dont Intelligrid qui porte spécifiquement sur les réseaux intelligents.

<http://www.epri.com/portfolio/product.aspx?id=1345>

Revues et conférences majeures

- IEEE Power Engineering Society General Meeting
- IEEE PES T&D Conference,
- IEEE PES PowerTech,
- IEEE Transactions on Power Systems,
- International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems,
- International Conference on Power and Energy Systems-EuroPES,
- Modern Electric Power Systems (MEPS)
- Conference on Applied Infrastructure Research,
- Conference The European Electricity Market Challenge of Unification,
- Power Systems Computation Conference PSCC, Annual North American Power Systems

H- Santé - Environnement

(Le vecteur électricité dans le domaine de l'environnement et de la santé)

Dans le domaine de l'environnement, l'énergie électrique peut servir soit comme support à des nouvelles techniques de dépollution d'effluents divers (gazeux, liquide et/ou solide) rejetés en aval d'un procédé industriel, d'une unité de production ou d'un véhicule, soit servir à la mise en place de techniques propres de fabrication générant peu de déchets nocifs [1].

Les évolutions des technologies dans ce domaine sont contraintes par la réglementation des émissions, qu'elles soient toxiques pour l'Homme, dangereuses pour la nature et les écosystèmes ou dégradantes pour le patrimoine. Cela concerne, l'émission des gaz à effet de serre (SF₆, CO₂, ...), les émissions de gaz ou de particules pathogènes et cancérigènes (selon les réglementations actuellement en vigueur ou en perspective, les expositions moyennes annuelles voire journalières à ce type de polluants toxiques ne doivent pas dépasser quelques dizaines de µg/m³ [2]), le traitement et la purification des eaux et des sols, la limitation de l'emploi des procédés chimiques, etc.

A titre d'exemple, l'utilisation de procédés moins polluants dans l'industrie du textile ou des traitements de surface polymère aurait des impacts considérables. En effet, l'industrie du textile en Europe représente 4% du marché industriel total. Elle consomme par an quelques milliers de milliards de litres d'eau et quelques centaines de milliards de kWh. L'utilisation de procédés plasmas permettrait de réduire la consommation en eau de près de 80% et en énergie d'environ 20% avec une réduction significative des émissions polluantes [3]. On peut noter que dans l'industrie des traitements des films polymères, une diminution des coûts de 1 centime d'euro par m² est considérée comme très importante. En effet, certains procédés ont la capacité de traiter 600m² de film par minute, 24h sur 24h. Là aussi, le vecteur électricité, au travers de l'amélioration des procédés corona et DBD par exemple, est un outil propre et puissant pour la réduction des coûts de production et la préservation de l'environnement.

H.1- Le vecteur électricité dans les domaines de la santé (ou en relation avec la santé)

Dans les domaines de la santé, l'énergie électrique et l'électromagnétisme sont déjà utilisés dans de nombreuses applications en Médecine et en Biologie. Mais des applications nouvelles et/ou dans des contextes plus industriels sont en cours. Ces applications existantes doivent évoluer régulièrement, impliquant de nouvelles contraintes technologiques. Par ailleurs, l'utilisation générale de l'électricité s'accompagne de champs électromagnétiques auxquels les personnes sont, contrairement à ces applications médicales, exposées de manière involontaire et parfois pendant des durées importantes, avec des conséquences possibles sur leur santé en tant que telle.

H.1.a- Applications de l'électricité dans les domaines de la santé.

Pour la médecine, citons, les techniques de **diagnostic** comme l'Imagerie en Résonance Magnétique (IRM), l'Electro-encéphalogramme (EEG), et la Magnéto-encéphalogramme (MEG).

En matière de **thérapie**, les techniques sont également nombreuses comme l'hyperthermie anticancéreuse, l'ablathérapie HF, l'électro-stimulation et surtout la magnéto-stimulation transcranial (TMS) qui est plus récente.

Pour la biologie, et plus précisément à l'échelle cellulaire, là aussi des applications très récentes autour de la manipulation et du tri cellulaires, la caractérisation des cellules en vue de diagnostic, ou la modification momentanée de leur état en vue de traitement (injection de produits pharmaceutiques ou d'ADN). Ces techniques s'appuient sur la mise en œuvre de champs

magnétique (magnétophorèse) ou champ électrique (diélectrophorèse, électroperméabilisation), statiques, alternatifs ou impulsionsnels.

Suivant les domaines, les échelles et donc les grandeurs électriques et les champs électromagnétiques mis en jeu, les problèmes scientifiques et techniques sont complètement différents : d'un côté, on peut être confronté, entre autres, à de la « grosse électrotechnique », par exemple en IRM où les supraconducteurs sont utilisés pour les conducteurs électriques en vue d'obtenir des champs magnétiques de plus en plus importants. D'un autre côté, du fait de l'échelle cellulaire, la conception et la réalisation d'applicateurs se rapprochent du domaine des nanotechnologies (bio-micro-systèmes). Mais dans tous les cas, les progrès se réalisent (ou pourraient se réaliser !) au travers de collaborations transversales impliquant les domaines de la biologie, Médecine, chimie, des mathématiques et du Génie Electrique. L'amélioration des performances des diverses applications actuelles, ou la mise en œuvre de nouvelles applications de ce type passent par une connaissance plus approfondie des interactions entre « système » biologique et système électromagnétique, s'appuyant simultanément sur la modélisation numérique et l'expérimentation.

Même s'il existe aujourd'hui une prise de conscience du risque infectieux au sein des chaînes hygiénistes hospitalières et chez les praticiens, la multiplication des actes médicochirurgicaux avec l'utilisation courante d'endoscopes et de fibroscopes, la pose d'implants, de prothèses et de dispositifs autonomes biocompatibles dans le corps humain maintient la probabilité d'infection à un niveau non acceptable. Les stérilisateur actuels fonctionnent soit en milieu corrosif (vapeur d'eau saturée) à température élevée (autoclave), soit à partir de produits toxiques et dangereux à manipuler (stérilisateur à oxyde d'éthylène), soit en imposant une centralisation très importante due à leur coût de mise en œuvre (stérilisation gamma). Comme l'instrumentation médicale moderne fait de plus en plus appel à la miniaturisation et intègre des éléments fragiles et très sensibles aux agressions physico-chimiques, les problématiques liées à la stérilisation et la décontamination (qui se différencient par les seuils de destruction des éléments pathogènes) du matériel médical sont aujourd'hui au cœur de l'actualité et ouvrent des perspectives à de nouveaux procédés permettant de convertir l'énergie électrique en rayonnement UV, en espèces chimiques actives (à partir de gaz non toxiques) dans des réacteurs de décontamination plasmas [4].

D'après le snitem [5], le marché français de l'industrie des dispositifs médicaux a été estimé en 2005 à 6,7 milliards d'euros (soit environ 17% du marché européen et 4% du marché mondial). Ce marché comprend d'une part (i) les dispositifs à usage individuel (5,1 milliards d'euros) regroupant notamment les consommables (dispositifs d'endoscopie digestive par exemple), les prothèses (orthopédiques et vasculaires) ou les pansements et d'autre part (ii) les dispositifs médicaux dits d'équipement (1,6 milliards d'euros) intégrant en particulier les procédés de désinfection et de stérilisation (estimés à eux seuls à un peu moins de 250 millions d'euros). A titre d'exemple, on peut estimer que la consommation en énergie électrique passe de 43 kWh pour un stérilisateur à oxyde d'éthylène à 4 kWh pour un autoclave est diminuée à moins de 0,5 kWh pour une stérilisation à froid par plasma [6]. Toutefois, cette diminution de la consommation d'énergie électrique est en partie compensée par l'augmentation des coûts de fonctionnement liés à l'utilisation de gaz non oxydants (N_2 par exemple) dans les réacteurs plasmas. Malgré cela, les procédés à l'étude restent très compétitifs car ils stérilisent à froid (température inférieure à 60°C) avec des durées de traitement et un coût global inférieurs ou équivalents.

Les réacteurs à plasmas froids sont également très efficaces dans l'utilisation de l'énergie électrique pour réaliser différents traitements de surface, permettant notamment de modifier l'affinité de ces surfaces envers des cellules ou des organismes vivants. L'amélioration du caractère bio compatible des matériaux permettrait une meilleure croissance de tissus biologiques (avec des

applications à la reconstruction osseuse ou tissulaire, par exemple) ou aiderait à l'intégration de prothèses dans le corps humain [4] alors qu'une diminution des propriétés bio-adhésives permettrait de lutter plus efficacement contre le développement des biofilms dans les canalisations. D'après [7], la mise au point de nouveaux procédés, utilisant par exemple des décharges homogènes à la pression atmosphérique, permettrait de réduire les coûts de production de peau humaine artificielle pour le traitement des grands brûlés de quelques centaines d'euros par m² à environ 1€/m².

H.1.b- Conséquences de l'utilisation de l'électricité sur la santé des personnes

L'utilisation du Vecteur Electricité d'une manière générale s'accompagne de champs électromagnétiques auquel l'être humain est exposé de manière involontaire. Nous vivons en effet dans un environnement électromagnétique de plus en plus perturbé, lié à l'utilisation toujours croissante de l'électricité : lignes électriques, actionneurs, télévisions et écrans d'ordinateur, détecteurs antivols de magasins, téléphonie mobile, fours à micro-ondes, systèmes à induction, etc. Les nouvelles technologies en matière de transmission d'information, les recherches actuelles en matière de transmission d'énergie sans contact pour des applications nomades vont contribuer à polluer encore plus cet environnement, et la maîtrise des problèmes de compatibilité électromagnétique devient cruciale, que ce soit pour les systèmes ou pour les personnes.

Concernant ce deuxième point, de nombreuses équipes de recherche travaillent sur les effets des champs électromagnétiques sur les personnes et leur quantification en Hautes Fréquences (HF), particulièrement pour la téléphonie mobile. Par contre, les recherches menées en BF et MF sont beaucoup plus limitées, et ne permettent pas encore de conclure sur les effets à long terme de ces champs [12]. Dans ce contexte, l'inquiétude du public sur les effets des champs électromagnétiques sur le corps humain est grandissante. L'application du principe de précaution a conduit l'Europe à mettre en place en 2004 une directive visant dans un premier temps à limiter l'exposition des personnes aux champs en environnement industriel [11]. Ces normes s'appuient sur les effets à court terme faisant l'objet d'un consensus scientifique. Elles définissent des niveaux maxima de grandeurs mesurables (les champs rayonnés) et/ou de grandeurs non mesurables (courants induits ou DAS dans le corps humain).

Cette directive européenne sera transposée dans le droit français au plus tard en avril 2008, et la limitation des champs rayonnés qu'elle impose, constitue une contrainte supplémentaire pour la conception et l'utilisation de TOUS les systèmes électromagnétiques. Dans un tel contexte, il est indispensable de maîtriser les interactions entre les sources de champ et le corps humain pour aider à comprendre les effets à long terme sur la santé, pour vérifier la conformité à la réglementation, et pour pouvoir proposer, si nécessaire, des moyens techniques adaptés en vue de réduire l'exposition. On rajoutera que devant ces interrogations autour des effets sur la santé, la tendance réglementaire est d'aller vers des niveaux d'exposition maximale de plus en plus bas.

H.2- Recherches à mener impliquant des verrous significatifs,

H.2.a- Domaine de l'environnement

En ce qui concerne le traitement de surface par plasma, les verrous concernent l'amélioration des procédés utilisant les plasmas dits « homogènes » fonctionnant à l'air libre et à la pression atmosphérique ou utilisant des gaz de fonctionnement peu onéreux, l'étude de la compréhension des phénomènes complexes qui se produisent aux interfaces entre le plasma et la surface, l'étude des couplages source énergie électrique – plasma, l'étude des transferts d'échelles entre des procédés de laboratoire et des procédés industriels.

Dans le cas des traitements en volume, les procédés plasmas, avec ou sans catalyseurs (photocatalyse par exemple), et les précipitateurs électrostatiques sont potentiellement des techniques propres de traitement des effluents gazeux ou liquide. Cependant, la transition à des prototypes in-

dustriels ou à des unités pilotes commercialisables est ralentie en raison [8] (i) des défis industriels tels que le choix des matériaux pour des durées de vie à long terme du procédé, l'efficacité énergétique et le coût en concurrence avec les technologies existantes, le changement d'échelle entre des réacteurs de laboratoire fonctionnant à quelques litres par minute vers des réacteurs industriels fonctionnant à plusieurs mètres cubes par minute et (ii) les questions scientifiques en suspens comme la caractérisation complète et le contrôle des sous produits, la bonne adéquation entre le volume du réacteur, sa géométrie et le temps de résidence des effluents, la compréhension locale des couplages physico-chimiques conduisant à la destruction des polluants. Les recherches dans ce domaine, concernent donc la caractérisation des sous produits formés (souvent présent en très faible quantité) par l'utilisation ou la mise au point de capteurs spécifiques, l'aide par la modélisation couplant les phénomènes électro-hydrodynamiques, chimiques et thermiques pour le choix du design des réacteurs en fonction des espèces à traiter et des conditions de fonctionnement, l'étude des procédés sur des plateformes industrielles tests permettant de valider les procédés en conditions réelles de fonctionnement dans des systèmes embarqués ou non.

En ce qui concerne la dépollution de l'eau par décharge électrique de type arc électrique ou « streamer », les recherches à mener concernent notamment l'optimisation de l'efficacité énergétique en comparaison avec d'autres types de procédés bien connus comme l'ozonation ou la photocatalyse, le développement de générateurs haute tension impulsionnels de puissance, la fiabilité du procédé à long terme.

En ce qui concerne, la limitation de l'utilisation du SF₆ (dont le pouvoir à effet de serre est 25000 fois supérieur au CO₂ avec une durée de vie de plusieurs milliers d'années et dont la concentration dans l'atmosphère devrait doubler d'ici à 2100) comme gaz isolant dans les disjoncteurs haute tension, les verrous concernent par exemple l'étude des mélanges gazeux N₂-SF₆ avec la compréhension des transferts d'énergie entre les deux constituants, l'influence des espèces vibrationnelles et métastables sur la tenue diélectrique des mélanges, la composition et les proportions des différents éléments dans des mélanges en relaxation thermique (période durant laquelle le reclaquage peut se produire). Pour certaines applications, le remplacement de l'isolation gazeuse par des liquides isolants biodégradables (notamment d'origine végétale) est envisageable. Les questions restant posées concernent notamment leurs propriétés diélectriques sous très haute tension, la stabilité chimique de ces liquides à long terme (tenue à l'oxydation), l'analyse du cycle de vie de ces matériaux.

H.2.b- Domaines de la santé (ou en relation avec la santé)

Concernant les applications en diagnostic (IRM, EEG, MEG), les recherches réalisées impliquent depuis longtemps plusieurs communautés, notamment celles du traitement du signal, de la physique, de la chimie, de la médecine et dans une moindre mesure du génie électrique, et sont en évolution permanente. A titre d'exemple, l'IRM est basée sur la superposition d'un champ statique de très forte valeur, et d'un champ radiofréquence. La tendance est à l'augmentation du champ statique (4 T), et à une modification des fréquences. Par ailleurs, des dispositifs de mesures locaux peuvent être insérés dans le patient, ce qui peut avoir une conséquence sur la répartition des phénomènes et d'éventuels échauffements locaux (SAR). Une des difficultés est donc de maîtriser là aussi les interactions systèmes électrique-biologique. Typiquement, ce système (à fort champ) est également concerné par les problèmes d'exposition des opérateurs. Concernant ces techniques, il n'y a pas à proprement parler de verrou technologique, mais leur évolution nécessite des travaux importants impliquant plus les chercheurs du Génie Electrique, notamment en matière de modélisation.

Les applications en thérapie ont elles aussi été développées en marge de la communauté Génie Electrique. Bien que l'on ne puisse pas parler de verrou technologique, ces techniques nécessitent pour progresser (optimisation, focalisation, réduction des durées de traitement, etc), la mise en œuvre de modèles plus sophistiqués. Par exemple, l'hyperthermie radiofréquences, pratiquement

pas utilisée en France, implique des modèles associant en particulier électromagnétisme, et thermique dans le corps humain. L'objectif est ici d'optimiser les sources de champ en vue de chauffer un organe spécifique dans un contexte d'utilisation clinique quotidienne de la méthode.

Le domaine des bio-microsystèmes est en plein essor, et les perspectives d'applications sont nombreuses. Leur évolution passe par la maîtrise des interactions à l'échelle de la cellule (voir inférieure !) impliquant l'électromagnétisme, la biologie, la micro-fluidique, les matériaux, et la physique. Par exemple, en électroperméabilisation, un des verrous est typiquement le modèle précis du comportement d'une membrane de cellule lors de l'application d'un champ électrique transitoire. Un tel modèle ne peut être représentatif du phénomène que s'il s'appuie sur des notions à des très faibles échelles (voire atomiques). Une autre difficulté est la conception et l'élaboration du micro-actionneur proprement dit, impliquant, entre autres, l'usage de matériaux bio-compatibles (exemple : un micro-système de magnétophorèse utilisant des micro-aimants permanents).

Pour la problématique d'exposition humaine aux champs, et plus généralement pour la simulation des phénomènes induits dans le corps humain par les champs involontaires ou volontaires (c.a.d. lors d'applications médicales), il existe deux verrous :

- le modèle en tant que tel, où à quelle échelle faut-il se situer pour représenter correctement les phénomènes. Entre la cellule (« composant » de base), et l'organe, il existe un facteur minimum de 10^6 !
- la vérification expérimentale *in vivo* des résultats de simulations : la mesure des courants induits basses fréquences est actuellement impossible, et la mesure des échauffements en hautes fréquences très difficile.

En résumé, l'évolution des applications de l'électromagnétisme dans les domaines médicaux et biologiques abordés précédemment, doit s'appuyer sur le développement de modèles qui permettront de lever certains verrous technologiques.

Dans le domaine de la stérilisation et de la décontamination par plasma, les verrous significatifs concernent essentiellement la compréhension des mécanismes de destruction des micro-organismes. L'amélioration des procédés passe par cette compréhension qui est très différente en fonction des caractéristiques des sources d'énergie électrique et des décharges utilisées. Elle est également nécessaire pour la validation complète des procédés et leur utilisation dans les cabinets médicaux et dans les hôpitaux qui doivent répondre à des normes européennes strictes et contraignantes.

Pour parvenir à répondre aux problématiques posées, aussi bien dans le domaine de l'environnement que de la santé, il est important de mettre en synergie des compétences très transversales allant du génie électrique au génie des procédés en passant par les domaines des mathématiques appliquées, de la physique, de la chimie, de la biologie et de la santé. Les défis propres au domaine du Génie électrique concernent notamment les choix judicieux des modes de couplage de l'énergie électrique (source de tension impulsionnelle, micro-onde, Radio Fréquence, AC de forte puissance instantanée), la modélisation et la caractérisation des phénomènes électromagnétiques (pour l'étude des couplages champs-milieux ionisés, champs-micro-organismes ou champs-particules polluantes), la modélisation et la caractérisation des propriétés diélectriques de matériaux spécifiques ou de tissus vivants (par exemple lors du dépôt de couche mince par décharge électrique c'est-à-dire sous champ impulsionnel, RF ou micro onde).

H.3- Actions

H.3.a- Moyens technologiques et humains disponibles

Les moyens humains disponibles sont difficilement identifiables car au carrefour de plusieurs

disciplines (Génie Electrique, Génie des procédés, Physique, Chimie, Santé, Biologie,...).

Les laboratoires du Génie Electrique travaillant sur des applications en santé restent très limités en France: Laboratoire AMPERE à Lyon, G2ELab à Grenoble, SATIE à Paris-Rennes, LGEP à Paris. Leur taux d'implication dans ce type de domaine est très variable. Leur spécialité est suivant les cas, modélisation et/ou expérimentation. Des collaborations existent avec certains laboratoires de la Communauté « Ondes », par exemple le laboratoire XLIM à Limoges, sur des sujets liés à la biologie dans le domaine des champs électromagnétiques Hautes Fréquences.

Les laboratoires travaillant sur les décharges électriques ou l'utilisation de champ électrique sont toutefois bien identifiés et dans la plupart des cas ils possèdent déjà des collaborations avec des laboratoires ou des équipes hors du domaine du Génie Electrique. On peut citer le Laboratoire Plasma et Conversion de l'Energie (LAPLACE), le département énergie de SupElec, l'équipe Electrostatique et Matériaux Dielectriques (EMD) du laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELab), le Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP), le Laboratoire de Physique et Technologies des Plasmas (LPTP), Le Groupe de Recherche sur l'énergétique des Milieux Ionisés (GREMI), le Laboratoire d'Electronique des Gaz et des Plasmas de Pau (LEGP).

Les moyens technologiques sont concentrés dans les laboratoires avec des procédés instrumentés couplés dans certains cas à des études de simulation.

H.3.b- Situation

1) Degré de couverture par programmes nationaux et internationaux (0 : pas couvert -> 5 : très bien couvert)

Moyen: 3

2) Nom des programmes nationaux et internationaux concernés – liens

On peut citer les [ANR](#) suivantes (liste non exhaustive) :

- Le projet « PLASMAPAL » soutenu par le LEGP (Laboratoire d'Electronique des Gaz et de Plasmas de Pau) sur le traitement de surface du bois par plasmas,
- Le projet « IPER » (Interaction Plasma Ecoulements Réactifs) soutenu par l'Ecole Centrale de Paris en collaboration avec le LAPLACE et le LPGP sur les mécanismes d'interaction d'une décharge plasma avec un écoulement,
- Le projet « REDUGES » (« Réduction de l'utilisation des gaz à effet de serre », étude des gaz ou liquides isolants en remplacement du SF6 pour l'isolation moyenne tension) entre le G2E lab (équipe Matériaux Diélectriques et Electrostatique) et la société AREVA.
- Le projet « CEMIRBIO » (« Champ ElectroMagnétique Impulsionnel Rapide et BIOlogie » entre AMPERE - Lyon, IPBS – Toulouse (Institut de pharmacologie et de biologie structurale), EM2C – Chatenay Malabry (Laboratoire énergétique moléculaire et macroscopique combustion), XLIM –Limoges
- Le projet « BIORMOD » Détermination de la distribution de température dans le corps humain lors de son exposition à un rayonnement électromagnétique avec AMPERE-Lyon, CETHIL-Lyon, CREATIS-Lyon.

Certaines thématiques du domaine de la santé se structurent par exemple au travers de pôles de compétences régionales tels que l'ARTEB (l'Agence Rhône-Alpes pour le développement des TEchnologies médicales et des Biotechnologie) [9] ou l'ITAV (Institut des Technologies Avancées des sciences du Vivant) qui se met en place en Midi-Pyrénées.

La mise en place d'un projet européen BIOPROP (sur la mise en place de prototype, la compréhension et l'analyse de procédés plasmas de traitement anti-microbien de textile, de surfaces planes de grande taille et d'outils de forme complexes) regroupant des partenaires industriels et académiques italiens, espagnols, belges et français.

Un Projet européen : EU Growth Project STERIPLAS (G1RD-CT-1999-00137) sur la stérilisation par plasma

http://cordis.europa.eu/data/MSS_PROJ_FP5_FR/ACTIONeqDndSESSIONeq25788200595ndDOCeql5ndTBLeqEN_PROJ.htm

<http://www.ruhr-uni-bochum.de/biodecon/extern/consortium/partner.html>

3) Positionnement de la recherche nationale par rapport à la recherche internationale sur le sujet (0 : mal positionnée -> 5) : 4

L'annexe, donne une lecture (certainement non exhaustive mais représentative) de la répartition des principaux laboratoires dans le monde travaillant sur les domaines de la santé et de l'environnement par l'utilisation de l'énergie électrique dans des procédés de type plasmas ou de précipitateurs électrostatiques. Au niveau national, les points forts concernent la stérilisation basse pression (avec le dépôts d'au moins 3 brevets), l'étude en laboratoire des procédés de dépollution notamment pour les systèmes embarqués couplant les procédés catalytiques et la modélisation. Dans ce cadre également, certaines études ont fait l'objet de dépôts de brevets avec des industriels du secteur automobile. Des études sur l'optimisation des précipitateurs électrostatiques ont été également menées à Pau avec le soutien du CEA.

Cependant, les transferts de technologies sont semble-t-il plus en avance au Etats-Unis, en Allemagne avec le développement de prototypes pilotes (camion pilote se déplaçant sur site pour le traitement spécifique d'effluents gazeux en sortie d'usines aux Etats-Unis [10] et développement de prototype à l'échelle industrielle incluant les procédés plasma [10], vente de réacteur plasma en Allemagne [10]). L'étude des procédés de traitement de surface, de stérilisation ou de décontamination à la pression atmosphérique est globalement peu représentée en France.

4) Disciplines concernées (0 : pas concerné -> 5 : très concerné)

Génie Electrique : 5

Physique : 4

Chimie : 3

Mathématiques appliquées : 3

Médecins/Chirurgiens : 3

Biologie : 4

Informatique : 4

Micro-Nanotechnologies : 2

H.4- Références

[1] Environnement et électricité, les techniques propre dans l'industrie, Electra, Dopee85, ISBN 2-86995-021-7, Environnement et électricité, les procédés électriques de traitement des rejets industriels, Electra, Dopee85, ISBN 2-86995-015-2, Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control, NATO ASI Series Ed Penetrante and Schultheis, Springer-Verlag, IBSN 3-540-57174-4

[2] Guide du traitement des déchets, l'Usine Nouvelle, 4^{ième} édition, Dunod, ISBN 2-10-049597-6, Les Composés Organiques Volatils dans l'environnement, Lavoisier Technique & Documentation, ISBN 2-7430-0232-8), <http://europa.eu/scadplus/leg/fr/s15004.htm>

[3] PlasmaTechnologies for Industrial Applications, International Symposium, Stresa, Italy, 2005

[4] Special issue on nonthermal medical/biological applications of ionized gases and electromagnetic field, IEEE Transactions on Plasma Science, vol 30, 4, 1398-1557, 2002, ISSN 0093-3813, P.K. Chu et al., Plasma-surface modification of biomaterials, Materials Science and Engineering, R36, 143-206, 2002.

[5] <http://www.snitem.fr>

[6] S. Adler et al., Cost of low-temperature plasma sterilization compared with other sterilization methods, Journal of Hospital Infection, 40, 125-134, 1998.

[7] <http://www.eng.iastate.edu/abstracts/viewabstract.asp?id=1857>

[8] Microplasma and applications, topical review, J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006)

[9] <http://www.arteb.com/>

[10] <http://www.plasmaenvironmental.com>, Giyoung Tak et al. "Pulsed Corona Plasma Pilot Plant for VOC Abatement in Industrial Streams as Mobile and Educational Laboratory", ISPC 17, Toronto, 2007 (on CD), <http://www.plasmaair.de>

[11] ICNIRP : Guide pour l'Établissement des limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques, et électromagnétique : Champs alternatifs et de fréquences variable dans le temps jusqu'à 300 GHZ.

[12] Organisation mondiale de la santé : <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/fr/>

[13] INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques : <http://www.ineris.fr/>

[14] NIEHS - National Institute of Environmental Health Sciences : <http://www.niehs.nih.gov/>

[15] INRS - Sécurité et santé au travail : <http://www.inrs.fr/>

[16] IEC / CEI - Commission Electrotechnique Internationale : <http://www.iec.ch/home-f.htm>

[17] ANFR Agence nationale des fréquences : <http://www.anfr.fr/>

Annexe : Principaux Laboratoires et Instituts

EUROPE

- Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands
- Institut für Niedertemperatur- Plasmaphysik, Greifswald, Germany
- Institut für Technische Chemie, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany
- Siemens AG, Corporate Technology Department, Germany
- Institute for Technical Thermodynamics, University of Erlangen, Germany
- Institute for Thermodynamics and Combustion, University of Rostock, Germany
- Institute fuer Plasmaforschung, University of Stuttgart, Germany
- Università di Padova, Italy
- Institute of Inorg. Methodology of Plasma, Orabona , Italy
- Department of Electrical Engineering & Department of Chemical Sciences, Università di Padova, Italy
- Centre for Plasma and Laser Engineering, The Szwalski Institute of Fluid Flow Machinery, Poland
- School of Chemistry, The University of Manchester, UK
- Department of Engineering Materials, University of Sheffield, UK
- Electrotechnic Materials Laboratory, Université de Patras, Grèce
- Laboratoire AMPERE, France
- Laboratoire Plasma et Conversion de l'Energie (LAPLACE), France
- Le département énergie de l'école SupElec, France
- Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELab), France

- Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP), France
- Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP), France
- Laboratoire SATIE, Cachan-Rennes, France
- Laboratoire de Physique et Technologies des Plasmas (LPTP), France
- Le Groupe de Recherche sur l'énergétique des Milieux Ionisés (GREMI), France
- Laboratoire d'Electronique des Gaz et des Plasmas de Pau (LEGP), France
- Laboratoire d'Electrotechnique de Pau (LEP), France
- Laboratoire d'Electrochimie Interfaciale et de Chimie Analytique (LEICA) de Rouen, France

AMERIQUE

- Department of Mechanical Engineering & Institute of Applied Radiation Sciences, McMaster University, Canada
- Department of Engineering Physics, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada
- Groupe de physique des plasmas, Université de Montréal, Montréal, Canada
- Electrical & Computer Engineering Dept, Old Dominion University, Norfolk, USA
- Department of Chemical Engineering, Center for Surface Science and Plasma Technology, University of Columbia, USA
- The UTK Plasma Sciences Laboratory, University of Tennessee, USA
- Department of Mechanical Engineering, Drexel University, Philadelphia, USA
- Ford Motor Research Company, Michigan, USA
- Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA
- Department of Chemical and Biomedical Engineering, Florida State University, College of Engineering, USA
- Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois, USA
- Iowa State University, College of Engineering, USA

ASIE

- Graduate Institute of Environmental Engineering, National Central University, Taiwan
- Dept. Electr. Eng., the University of Tokyo, Japan
- Kanazawa Institute of Technology, Japan
- Excited State Chemistry Group, Research Institute for Environmental Management Technology, Ibaraki, Japan
- Department of Mechanical Engineering, Osaka Prefecture University, Japan
- Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan
- Dept. of Chemical Engineering & Clean Technology, Cheju National University, Korea
- Korea Institute of Machinery and Materials, Korea
- Hyundai Motor Company, Korea
- Institute of Electrostatics and special Power, Dalian University of Technology, China

I- Contributions

Bruno ALLARD,
Hamid Ben AHMED,
Seddik BACHA,
Pascal BROCHET,
Jean-Francois BRUDNY,
Noël BURAI,
François COSTA,
Philippe DEGOBERT,
Olivier EICHWALD,
Christophe ESPANET,
Frédéric GILLON,
Afef LEBOUÇ,
Claude MARCHAND,
Juan MARTINEZ VEGA,
Hervé MOREL,
Xavier ROBOAM,
Jean-Pierre ROGNON,
Jean-Luc SCHANEN,
Christian VOLLAIRE,
Frédéric WURTZ

Index

acceptabilité.....	35
actionneur.....	
hydraulique.....	7, 21, 41, 42
pneumatique.....	7, 21, 41
électrique.....	7
ADEME.....	10, 55, 56
aérogénérateur.....	22
aéronautique.....	7, 30, 35, 37
anéchoïque.....	32
ANR.....	12, 24, 45, 46, 55, 56, 63
antenne.....	32
auto-cicatrisant.....	51, 53
automatique.....	37
automobile.....	30
avion.....	21, 48
bâtiment.....	40, 41
biberonnage.....	20, 33
biologie.....	58
blackouts	52, 53
blindage.....	32
brasures.....	16
bruit.....	21
caloporteur.....	18
caténaïres.....	20, 48
CEM.....	15, 21, 23, 29, 48
centrales virtuelles.....	52
champs électromagnétiques.....	58
cofrittage.....	15
compresseur.....	23
conduit.....	31, 33
connectique.....	33
consommation.....	
gaz naturel.....	6, 41
contrôle robuste.....	55
convection.....	17
conversion AC/DC.....	13
convertisseurs électroniques de puissance.....	13
cycle de vie.....	9, 21
DARPA.....	25
défaillance.....	15, 36
dépollution.....	58, 61
diagnostic	37
dimensionnement.....	21, 37
diphasique.....	17
distribution.....	40, 48
domotique.....	30
dysfonctionnement.....	35
EEG.....	58
effet de serre.....	40, 51, 58
efficacité énergétique.....	14

embarqué.....	35
environnement.....	58
estimateur.....	36
FACTS.....	13, 55
ferroviaire.....	30, 35
fiabilité.....	14, 15, 18, 23, 30, 42, 48
filtrage.....	32
FP7.....	25, 38
gestion des actifs.....	54
haute température.....	23
haute tension.....	23
HF.....	29, 58
hybride.....	20, 22, 24, 32
hydraulique.....	6, 8, 20
immotique.....	41
induction électromagnétique.....	29
interconnexion.....	50
intermittence.....	42, 51, 52
interopérabilité.....	24
inversion.....	24
IRM.....	58
langages.....	24
magnétocalorique.....	10
magnétostrictifs.....	10
maintenabilité.....	35, 42
maintenance.....	36
maritime.....	7
médecine.....	58
MEG.....	58
micro-ondes.....	29
microfluidique.....	18
monolithique.....	24, 32
monophasique.....	18
multi-échelle.....	23
multi-physique.....	23
nanotechnologies.....	10
navire.....	21, 48
observateur.....	36
optimisation.....	24
panne.....	35
parasitante.....	30
pertes.....	40, 52
plasma.....	59
plus électrique.....	7, 21, 31
polluant.....	58
production.....	
biomasse.....	20, 40
cogénération.....	7, 41, 52
d'électricité.....	40
décentralisée.....	40, 51, 52, 53
géothermie.....	40, 52
houlienne.....	20

hydraulique.....	40, 42, 49
hydrolien.....	42, 49
micro-cogénération.....	41
PAC.....	42
photovoltaïque.....	49
PV.....	42
solaire.....	20, 40, 49, 52
turbines.....	41
vent.....	40
volants d'inertie.....	20
énergie renouvelable.....	49
énergies renouvelables.....	6
éolien.....	20, 42, 49, 50, 52
prototypage virtuel.....	21, 24
prototype virtuel.....	31
rayonné.....	31, 33
reconfigurable.....	51
reconfiguration.....	36
rectenna.....	29
recyclage.....	21
refroidissement.....	17
réseau.....	
de bord.....	48
de distribution.....	48
de transport.....	48
sites isolés.....	48
risques.....	54
RNTL.....	25, 33
robuste.....	36
RSIL.....	32
sécurité.....	36
semi-conducteurs.....	13
sociétal.....	35
standardisation.....	24
stockage.....	13, 20, 51, 53
stockage.....	
batteries.....	20
super-condensateurs.....	20
énergie renouvelable.....	40
supervision.....	36, 42
sûreté de fonctionnement.....	30, 35
thermique.....	14, 21, 40, 41
TMS.....	58
tolérancement.....	24
toxique.....	58
traitement de signal.....	37
transmission.....	29
0transport.....	30
ferroviaire.....	48
terrestre.....	7
traction ferroviaire.....	21
urbain.....	48

énergie électrique.....	40
UPS.....	23
urbistique.....	41
vibration.....	21
vieillessement.....	23, 36
vitesse variable.....	36
vulnérabilité.....	54
éclairage.....	7, 8, 13
éco-matériaux.....	11
écobilan.....	21
écoconception.....	24
émission.....	31
îlotage.....	51

Glossaire

- ADEME**: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, <http://www.ademe.fr>
- anéchoïque**: sans écho, une chambre anéchoïque sert de référence pour des mesures **CEM** car ces parois absorbent les ondes.
- ANR**: Agence Nationale de la Recherche, <http://www.agence-nationale-recherche.fr>
- Bus-barre**: En anglais Bus-Bar. Technologie de connexion électrique entre différent éléments de puissance. Des feuilles conductrices sont séparées par un fin isolant.
- CEM**: Compatibilité Electromagnétique.
- DARPA**: acronyme anglais, Defense Advanced Research Projects Agency, <http://www.darpa.mil>
- EEA**: Électronique, Électrotechnique, Automatique
- FACTS**: acronyme anglais: *Flexible Alternating Current Transmission System*, c'est un convertisseur électronique de puissance pour la gestion des réseaux électriques.
- FP7**: acronyme anglais, Seventh Framework Programme, 7ème programme cadre européen, <http://cordis.europa.eu/fp7> en français: 7^{ème} **PCRD**.
- GaN**: Nitrure de Gallium, [matériau semi-conducteur à grand gap](#).
- HF**: Haute Fréquence
- hydrolien**: analogue de l'éolien pour la récupération de l'énergie des courants marins par des turbines.
- PAC**: Pile à combustible
- 7^{ème} **PCRD**: Programme Cadre de Recherche et Développement, en anglais **FP7**
- PV**: Photovoltaïque
- matériau semi-conducteur grand gap** : matériau semi-conducteur à large bande interdite autorisant une utilisation à fort champ électrique et haute température. Exemples: [SiC](#), [GaN](#), Diamant
- RNTL**: Réseau National de recherche et d'innovation en Technologies Logicielles, dépend de l'**ANR**, <http://www.rntl.org>
- RSIL**: Réseau de stabilisation d'impédance de ligne, sert à garantir la reproductibilité des mesures de **CEM** conduite.
- SiC**: carbure de silicium, [matériau semi-conducteur à grand gap](#).
- UPS**: acronyme anglais, Uninterruptible Power Supply, alimentation ininteruptible.