

<b>Acronyme</b>	<b>E-CEM</b>		
<b>Titre du projet en français</b>	<b>Compatibilité ElectroMagnétique des systèmes d'Énergie</b>		
<b>Titre du projet en anglais</b>	Electromagnetic compatibility of power systems		
<b>Coopération internationale (si applicable)</b>	Le projet propose une coopération internationale <input type="checkbox"/> mentionner le(s) pays concerné(s)		
<b>Aide totale demandée</b>	<b>A remplir €</b>	<b>Durée du projet</b>	36 mois

- [1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU PROJET.....2](#)
- [1.1. Contexte et enjeux économiques et sociétaux.....2](#)
- [1.2. Positionnement du projet.....4](#)
- [2. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.....6](#)
- [2.1. État de l'art.....6](#)
- [2.2. Objectifs et caractère ambitieux/novateur du projet.....7](#)
- [3. PROGRAMME SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, ORGANISATION DU PROJET.....9](#)
- [3.1. Programme scientifique et structuration du projet .....9](#)
- [3.2. Management du projet.....11](#)
- [3.3. Description des travaux par tâche.....11](#)
- [3.4. Calendrier des tâches, livrables et jalons.....23](#)
- [4. STRATÉGIE DE VALORISATION DES RÉSULTATS ET MODE DE PROTECTION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS.....25](#)
- [5. ORGANISATION DU PARTENARIAT.....25](#)
- [5.1. Description, adéquation et complémentarité des partenaires.....25](#)
- [5.2. Qualification du coordinateur du projet.....30](#)
- [6. JUSTIFICATION SCIENTIFIQUE DES MOYENS DEMANDÉS.....30](#)
- [6.1. Partenaire 1 : IRSEEM.....30](#)
- [6.2. Partenaire 2 : Ampère.....31](#)
- [6.3. Partenaire 3 : SATIE.....32](#)
- [6.4. Partenaire 4 : G2Elab.....33](#)
- [6.5. Partenaire 5 : CEDRAT.....34](#)
- [6.6. Partenaire 6 : Renault.....34](#)
- [6.7. Partenaire 7 : Valeo.....35](#)
- [7. ANNEXES.....35](#)
- [7.1. Références bibliographiques / references.....35](#)
- [7.2. Biographies / CV, Resume.....36](#)
- [7.3. Implication des partenaires dans d'autres contrats.....40](#)

*Avant de soumettre ce document :*

- *Supprimer toutes les instructions en rouge (par exemple en faisant Format → Styles → Menu contextuel du style « Instructions » → Sélectionner toutes les occurrences → suppr.)*
- *Mettre la table des matières à jour (bouton droit sur la table des matières → mettre à jour les champs → Mettre à jour toute la table).*

## 1. CONTEXTE ET POSITIONNEMENT DU PROJET

Le nombre croissant de dispositifs de conversion statique (électronique de puissance) dans une automobile et leur impact de plus en plus important sur l'électronique embarquée et sur le réseau électrique du véhicule imposent des contraintes de plus en plus sévères en terme de fiabilité et sécurité.

Les constructeurs automobiles sont aujourd'hui confrontés à deux préoccupations majeures :

- d'une part, ils doivent s'assurer du respect des normes limitant les émissions parasites de l'automobile et le respect de l'exposition des personnes aux champs EM à l'intérieur du véhicule,
- d'autre part, ils doivent garantir le bon fonctionnement de l'ensemble des équipements dans une ambiance électromagnétique normalement polluée.

C'est pourquoi l'étude CEM d'un véhicule doit aujourd'hui faire partie intégrante du développement d'un véhicule, et doit intervenir dès le début de la phase de conception de celui-ci. Cet aspect est le principal point bloquant que l'ensemble des partenaires du projet vise à dépasser.

Pour évaluer le niveau de perturbations émises par les convertisseurs, le recours à la mesure est d'abord apparu comme la solution la plus naturelle. Malheureusement, cette démarche ne suffit plus, au vu de la complexité des dispositifs car cette approche aboutit à une prise en compte trop tardive de la CEM dans le cycle de conception des systèmes.

En effet, les mesures CEM normatives au niveau de chaque équipement ne garantissent pas nécessairement un niveau global acceptable, car la mise en œuvre d'un ensemble d'équipement est bien plus complexe qu'un équipement individuel. En outre, les mesures en CEM ne sont pas forcément répétitives, le nombre de paramètres mesurables peut être très grand, et le coût d'une campagne de mesures CEM est souvent prohibitif.

Enfin, les mesures étant réalisées sur des produits déjà construits, si le niveau d'émission est trop élevé, les solutions adoptées afin de les réduire sont alors basées sur l'expertise de l'ingénieur et ne permettent pas toujours d'agir de façon optimale. La réduction des coûts et des délais de conception passe donc naturellement par le développement de logiciels de modélisation de plus en plus sophistiqués

### 1.1. CONTEXTE ET ENJEUX ÉCONOMIQUES ET SOCIÉTAUX

L'utilisation de matériels électriques doit tenir compte des contraintes de l'environnement automobile: vibrations, température, encombrement, poids ... De plus, les contraintes de fiabilité imposent des restrictions très fortes quant à la compatibilité électromagnétique (CEM) des matériels électroniques embarqués. En effet, il s'agit de garantir d'une part que l'introduction dans un véhicule de dispositifs électriques de puissance ne nuira pas au fonctionnement des systèmes de commandes électroniques embarqués (antennes, systèmes d'aide à la conduite, calculateurs ...) et d'autre part que les solutions retenues sont fiables (minimisation du nombre de composants, atténuation des courants parasites entraînant des vieillissements prématurés des convertisseurs électromécaniques, ...).

Les dispositifs à mettre en œuvre afin de remplacer les moteurs thermiques sont constitués d'une liaison filaire amenant l'énergie électrique primaire depuis la source de génération ou de stockage, d'un convertisseur d'électronique de puissance chargé de transformer l'onde électrique et d'un actionneur électromécanique. Pour des raisons d'encombrement et de répartition des masses, le convertisseur d'électronique de puissance et l'actionneur peuvent être distants de plusieurs mètres. Par conséquent, une deuxième liaison filaire est nécessaire afin d'acheminer l'énergie électrique depuis le convertisseur à l'actionneur. Dans une telle association convertisseur – machine, les câbles sont un élément essentiel de la chaîne de conversion électromécanique. C'est le câble reliant le convertisseur de puissance à l'actionneur qui est la partie la plus critique d'un point de vue de la CEM. En effet, l'énergie électrique sur de tels câbles est distribuée sous une forme qui présente de fortes variations de tensions et de courants. Ceci est lié soit au fait que l'actionneur (rotatif pour la plupart) doit pouvoir engendrer des mouvements discontinus (translation, vitesse variable, mouvement alternatif, ...) soit aux différentes modulations de l'énergie électrique utilisées à des fins de pilotage des actionneurs. Les variations de tension et/ou de courant présents sur les câbles de puissance engendrent des perturbations électromagnétiques susceptibles de faire dysfonctionner les appareillages électriques - électroniques environnants. Par conséquent, pour des raisons évidentes de sûreté de fonctionnement, les normes CEM en transport terrestre sont draconiennes. C'est à dire que tous les appareils électriques – électroniques embarqués doivent être à même de fonctionner dans un environnement électromagnétique pollué et le niveau de perturbations électromagnétiques émises est très restreint. Outre les effets CEM, l'alimentation des actionneurs électromécaniques par le biais de convertisseurs d'électronique de puissance engendre la circulation de courants de Mode Commun (MC) qui ont pour effet, entre autre, de dégrader les paliers dans les actionneurs rotatifs ou de faire vieillir prématurément les isolants des machines.

En conséquence, étant donné l'aspect inéluctable de l'augmentation des dispositifs électroniques et électriques embarqués, il est fondamental de bien préparer cette évolution technologique. Ceci ne peut se faire que si les problèmes potentiels (la CEM en est un) sont abordés assez en amont dans la phase de développement du projet. En effet, au vu des problèmes de CEM existants dans les associations convertisseurs machines et plus généralement en électronique de puissance et en électronique petits signaux, et des contraintes liées au domaine des transports terrestres, il faut développer de nouvelles technologies adéquates.

Ceci est d'autant plus fondamental dans le domaine de l'automobile que les coûts et surtout les temps de développement d'un véhicule sont extrêmement réduits et que par conséquent, le prototypage numérique doit permettre de résoudre la grande majorité des problèmes. A ce titre la figure 1 ci-dessous exprime clairement les ambitions du consortium créé pour ce projet : intégrer la CEM très tôt dans le «cycle de conception d'un véhicule».

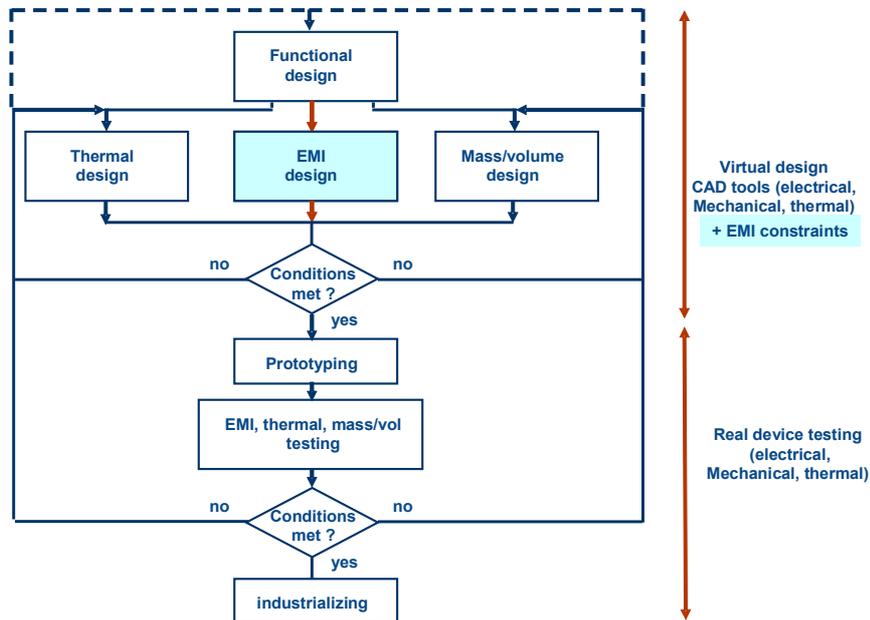


Figure 1 : intégration de la contrainte CEM dans le dimensionnement des systèmes

Malgré près de 20 ans de recherches dans le domaine de la CEM, de nombreux problèmes subsistent. Ceci est dû au fait que dans beaucoup de domaines, les aspects normatifs et de sûreté de fonctionnement associés à la CEM n'étaient pas considérés comme fondamentaux. Avec le foisonnement des dispositifs de puissance et de commande, les problèmes de CEM sont maintenant devenus prépondérants dans beaucoup de domaines et notamment l'automobile.

Depuis une quinzaine d'années, des travaux universitaires ont abordé la problématique de la CEM en électronique de puissance, essentiellement en partenariat avec des industriels fournisseurs de biens d'équipements et sous les aspects des perturbations conduites. Une bonne connaissance des phénomènes est acquise et des modèles performants ont pu être proposés; les principaux acteurs de ces recherches sont historiquement localisés dans les laboratoires tels que AMPERE, G2Elab, SATIE et plus récemment l'IRSEEM. Le projet est commandité par des acteurs industriels majeurs du domaine : VALEO en tant qu'équipementier, RENAULT en tant que systémier et CEDRAT pour la capitalisation logicielle. L'intérêt de ces industriels pour ce projet est certain et l'engagement et le support de ce groupe aux recherches dans ce domaine date de plusieurs années.

La coordination des recherches en CEM au niveau national a déjà commencé. L'objectif final est de lever un certain nombre de verrous limitant le déploiement des systèmes de puissance du fait de leur impact sur les systèmes bas niveau.

## 1.2. POSITIONNEMENT DU PROJET

Ce projet s'inscrit dans le présent appel dans l'axe thématique *efficacité énergétique et réduction des émissions, sous thème motorisations électriques et hybrides : électronique de puissance, compatibilité électromagnétique*. En effet le texte du présent appel stipule que *la pénétration de l'énergie électrique dans les véhicules terrestres présente un potentiel majeur de réduction des émissions de CO2. Par ailleurs, elle confère à la France de nombreux atouts compte tenu de sa production d'électricité à très faible contenu en carbone.*

Une des manières de réduire considérablement les émissions carbone des transports est donc d'envisager la propulsion tout électrique des véhicules de transport terrestre. De ce fait, le recours aux convertisseurs de puissance va aller grandissant dans les véhicules modernes. Afin que l'introduction des convertisseurs de puissance dans les véhicules de transport terrestre se fasse en bonne harmonie avec les systèmes bas niveau ainsi qu'avec les contraintes liées à l'exposition des personnes à l'intérieur des véhicules, il est devenu fondamental de pouvoir anticiper le comportement CEM des systèmes de puissance à un stade très précoce du dimensionnement. A ce titre, ce projet de recherche propose donc de développer des outils permettant la prise en compte de la CEM des systèmes de conversion statique d'énergie lors de l'étape de conception numérique. Les méthodes proposées doivent pouvoir s'adapter à des modélisations rapides requises lors de la phase de pré-dimensionnement ou bien à des simulations plus coûteuses en temps donnant accès à des résultats quantitatifs.

Le présent projet vise à :

- donner des moyens de financement des travaux sur les verrous identifiés (développés au paragraphe 2.2)
- assurer la capitalisation du savoir, à un niveau suffisamment amont

Au vu des enjeux économiques et technologiques que représente la CEM dans les transports il est essentiel de passer à un niveau supérieur de capitalisation des méthodes, des outils et des moyens de mesures que celui atteint aujourd'hui au travers des collaborations passées. L'aide demandée au travers de ce projet vise à réaliser cet objectif.

Ce projet s'inscrit dans la continuité d'un programme (O2M 2007-2010) financé par le FUI et labellisé par les pôles de compétitivité MOV'EO et SYSTEMATICS. Dans le programme O2M, le sous-projet 4 (CEM) piloté par le CEDRAT et l'IRSEEM correspondait à des travaux sur la CEM des systèmes mécatroniques. L'objectif principal du sous projet résidait dans l'amélioration et l'articulation d'outils logiciels permettant la simulation CEM (Compatibilité ElectroMagnétique) globale d'un système dans la plateforme mise en place dans le cadre du projet O2M. La réussite de cet objectif passait par l'amélioration des performances des outils de simulation CEM mais également par le couplage entre les logiciels InCa3D et Portunus pour les parties conduites et rayonnées. Pour alimenter ces outils, les efforts ont également porté sur :

:

- ✓ l'extraction de modèles de composants actifs et passifs sur une large gamme de fréquence,
- ✓ l'étude de l'influence de la température sur le comportement CEM des composants
- ✓ la modélisation des interconnexions électriques (capacitives et magnétiques)
- ✓ les interactions en champ proche de composants passifs

Il faut noter que tous les intervenants du présent projet étaient dans ce sous-projet. Malgré des résultats très encourageants, de nombreux aspects incontournables n'ont pas été abordés et le niveau de capitalisation atteint pour les modèles et les méthodes est nettement insuffisant. Le projet proposé se propose donc de combler ces lacunes afin de :

- ✓ pouvoir fournir des outils performants permettant aux acteurs industriels et ainsi de prendre une avance concurrentielle considérable dans ce domaine,
- ✓ permettre aux laboratoires participant de capitaliser leur connaissance au sein d'une plate forme logicielle performante,
- ✓ de faire sauter les verrous scientifiques identifiés et ainsi de développer des méthodes génériques pouvant donner lieu à des retombées dans de nombreux domaines scientifiques et industriels.

Ce projet est par ailleurs tout à fait unique au niveau national et international en terme de fédération de laboratoires et d'industriels et de capitalisation de méthodes, de modèles et donc d'outils logiciels pour prendre en compte les problèmes de CEM dans le maquettage numérique des systèmes de puissance complexes.

## 2. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

### 2.1. ÉTAT DE L'ART

Comme indiqué en introduction, l'étude de la CEM au sein d'un ensemble complexe ne peut plus être assurée au moyen de la seule mesure comme dans le passé [Giov04, Cost05]. L'alternative de la simulation est celle qui vient la plus naturellement à l'idée, pour réduire les coûts et délais de développement, et assurer l'optimisation et la robustesse des systèmes. A ce jour, il n'existe pas de solution logicielle permettant de modéliser des systèmes complexes. Les solutions existantes sont réparties en plusieurs familles :

- logiciels de calcul électromagnétiques 3D dans le domaine temporel ou fréquentiel qui ne permettent pas la modélisation de systèmes complexes (facteur d'échelle, non linéarité des composants ...) [Fern009], [Benh08], [Lese09], [Malk08], [FernN09]
- logiciels circuits qui ne prennent pas facilement en compte les effets parasites des liaisons électriques et l'environnement électromagnétique (cantonnés aux simulations en conduit) [Floc09]
- logiciels de réseaux qui sont adaptés aux calculs de réseaux électriques complexes

En définitive, la solution réside dans un environnement capable de faire cohabiter ces différents modèles car aucune méthode ne permettra une modélisation complète d'un système industriel.

Actuellement, face aux enjeux liés à la CEM dans les domaines émergents de l'électronique de puissance que sont les transports et notamment l'automobile, les travaux de recherche en CEM doivent être approfondis et une meilleure cohérence de leur conduite doit être recherchée pour améliorer les échanges entre équipes, mutualiser certains moyens, et capitaliser des connaissances. Dans ce contexte, il apparaît que la pierre angulaire d'une telle démarche repose sur la capitalisation et le partage des briques logicielles déjà développées ou à développer. En effet, seule la mise en commun au sein d'une plateforme unique de modélisation en CEM peut apporter une réponse pertinente aux problèmes de plus en plus complexes posés par les industriels du transport [Wang06]. Des problèmes théoriques majeurs subsistent en matière de simulation, des travaux de recherche sont en cours à cheval entre AMPERE et le G2Elab ainsi qu'au SATIE et à l'IRSEEM pour lever une partie de ces verrous (5 thèses sont actuellement en cours, elles sont pour la plupart financées par les industriels partenaires):

- la modélisation de sous ensemble complexes tels que les convertisseurs statiques (1 thèse AMPERE-G2Elab),
- la modélisation des interactions magnétiques et capacitives dans les interconnexions électriques (1 thèse G2Elab),
- la modélisation des interactions en champ proches entre composants passifs (1 thèse Ampère – G2Elab)
- la modélisation des sources de MC et de MD générées par les composants actifs (thèse SATIE)
- la modélisation large bande de composants passifs (1 thèse IRSEEM)

Outres ces verrous sur les briques élémentaires que sont les modèles pertinents pour chaque sous ensemble, des efforts sur la possibilité de faire cohabiter au sens de la modélisation tous ces modèles sont à mener pour structurer de façon durable les recherches dans ce domaine. Cet effort amène de nouvelles thématiques de recherche qui sont liées à la pertinence du découpage d'un système complexe (équipement électrique d'un véhicule) en sous ensembles modélisables indépendamment et par différentes méthodes. En effet, si la séparation de certains constituants d'une chaîne de puissance est à peu près maîtrisée en mode conduit, le même travail de réflexion reste à mener en mode rayonné (champ proche et lointain). Se pose aussi le problème de co-simulation (couplage de code) utilisant différentes méthodes numériques et/ou analytiques pour modéliser différentes parties d'un système ou bien différents phénomènes d'un même sous ensemble. On peut citer aussi les problèmes de simulation temporelle avec des échelles de constantes de temps très différentes, qui génère des coûts de calcul prohibitifs ou des non convergences, la simulation de structures géométriques très hétérogènes (matériaux minces ou de petites sections devant d'autres grandeurs) et ou de matériaux non-linéaires dont les modèles de perte ne sont pas bien définis, par des méthodes numériques telles que les éléments finis pose des problèmes quant au réalisme des géométries pouvant être traitées. C'est cet aspect global et fédérateur du problème de simulation numérique en CEM (cette approche peut être étendue à toutes les modélisations de systèmes complexes) qui sera aussi abordé dans ce projet. Actuellement, certaines techniques sont utilisées de manière à palier aux problèmes de CEM sur les matériels existants. Les résultats sont souvent peu satisfaisants car les techniques existantes visant à réduire les perturbations existantes en CEM sont critiquables pour au moins plusieurs raisons:

- d'une part les solutions (filtrage, blindage ...) sont basées sur une connaissance très empirique de la nature des sources et des perturbations engendrées et sont donc très loin d'être optimales d'un point de vue de leur dimensionnement
- d'autre part, ces techniques s'attèlent à réduire des perturbations existantes, il paraît intéressant d'essayer de minimiser la source de ces perturbations
- les charges et actionneurs sont un vecteur important de couplage à l'environnement des perturbations électromagnétique, ce domaine est pour l'instant peu connu ni exploré
- toutes ces techniques ne prennent pas en compte les contraintes spécifiques à l'automobile (cyclage thermique, vibrations, poids, encombrement, fiabilité ...) et ne sont donc pas optimisées en conséquence

## 2.2. OBJECTIFS ET CARACTÈRE AMBITIEUX/NOVATEUR DU PROJET

Les techniques existantes (filtrage actif et passif, blindage ...) visent à réduire au maximum les perturbations (ou leurs effets) dans certaines parties du système (câbles, convertisseurs, actionneurs). Il semblerait intéressant de disposer de modèles permettant de répartir les contraintes CEM sur l'ensemble des constituants (répartition en fréquence, en niveau) car l'optimum pour chaque sous ensemble ne donne pas forcément un comportement optimal pour le système entier. Ceci est une approche totalement en rupture avec l'existant de plusieurs point de vue : approche systémique, modélisation globale multi systèmes, optimisation sous contraintes ... Des outils nouveaux sont à concevoir pour parvenir à ces fins.

Le projet proposé couvre les besoins généraux des différents acteurs en matière de recherche en CEM des systèmes d'énergie, à savoir :

- 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 dans un contexte 'système',
- la capitalisation des connaissances en la matière,
- les moyens d'essais / mesure et les bancs de caractérisation spécifiques pour la CEM des systèmes d'énergie dans les domaines envisagés.

Comme expliqué précédemment, 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 dans ce programme. Par ailleurs, il est indispensable de pouvoir faire évoluer les méthodes et modèles en fréquence afin d'aborder les phénomènes rayonnés au niveau prédictif et de pouvoir adapter ces modèles aux nouvelles technologies (Carbure de Silicium, intégration monolithique ...) génératrices de perturbations dans une gamme de fréquence plus étendue que les technologies actuelles.

Toutefois, des actions de recherche qui viseraient à améliorer la CEM en électronique de puissance en termes structurels doivent aussi être menées.

Le projet propose donc d'aborder les différents points ci-dessous.

#### **Aspect sous système (local) :**

##### Elaboration de nouveaux modèles (constitution de bibliothèques) :

- Constitution de macro-modèles dédiés aux systémiers, approche par sources équivalentes conduites et rayonnées, par impédances équivalentes (en conduit), par fonctions de transfert équivalentes (en rayonné)
- Modèles de rayonnement en champ proche de composants complexes pour simulations locales (intraconvertisseur)
- Modèle CEM en conduit et rayonné des actionneurs électriques en vue de la réduction de leur capacité à perturber

##### Nouvelles méthodes de modélisation :

- Modélisation des chemins de propagation de façon prédictive (aspects inductif et capacitif): intra convertisseurs (layout, bus barres, interaction entre composants en champ proche ...), dans les câbles : blindés, avec blindages innovants (1 seul fil de masse), non blindés, dans les actionneurs (rotatifs, linéaires)
- Représentation des impédances de ces chemins en fonction du type de modèle pour lequel ils sont destinés (temporel ou fréquentiel), avec un horizon fréquentiel adapté au modèle destination

##### Modélisation des sources :

- Modélisation des sources en Mode Commun (MC) et Mode Différentiel (MD) dans le domaine temporel : caractérisation des modules / composants Semi Conducteurs (SC) pour simulation fonctionnelle et CEM Basse Fréquence (BF) ( $f < 5$  MHz)
- Modélisation des sources en MC et MD dans le domaine fréquentiel : caractérisation des modules / composants SC en commutation => modèles de source paramétrables (point de fonctionnement, température, type de commande, ...) pour simulations fréquentielles

- Bancs spécifiques à mettre en œuvre pour les modélisations temporelles et fréquentielles

**Aspect système (global) :**

Méthodes de Modélisation :

- Conception optimisée sous contraintes CEM (méthodes de modélisation spécifiques : temps de calcul, précision ...)
- Modélisation multi-échelle (fréquentielle et/ou géométrique): approche mixte temps-fréquence, réduction de modèles avec ou sans perte d'informations (simulations systèmes ou macro modèles pour systémiers), découpage structurel de systèmes complexes pour modélisation par sous ensemble et analyse des couplages fort ou faible intra-système
- Prise en compte des incertitudes en CEM (géométriques, valeurs des composants, propriétés des matériaux ...) : méthodes non intrusives (krigeage, Monté Carlo ...), méthodes intrusives
- Etudes paramétriques : connaissance au sein d'un système complexe des paramètres influents sur la CEM

Elaboration de nouveaux modèles (constitution de bibliothèques) :

- Modèles systèmes de convertisseurs statiques pour aborder l'ensemble du réseau de bord sur un plan CEM
- Modèles de rayonnement en champ lointain de sous systèmes entiers pour simulation globales (inter système)
- Prédiction du rayonnement lointain à partir du champ proche (issu de mesures ou de simulations : MC seulement ?)

Nouvelles approches pour la réduction de la CEM :

- 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 (filtres actifs, antennes actives)
- Intégration monolithique et hybride des convertisseurs statiques pour le confinement des perturbations EM
- Optimisation de l'usage des matériaux pour la CEM des actionneurs et de la connectique

### **3. PROGRAMME SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE, ORGANISATION DU PROJET**

#### **3.1. PROGRAMME SCIENTIFIQUE ET STRUCTURATION DU PROJET**

Pour mener à bien les recherches nécessaires à l'aboutissement de ce projet, il est envisagé de scinder les actions en six tâches distinctes et complémentaires qui pourront être menées parallèlement. Au travers des tâches proposées c'est l'ensemble des verrous bloquant le développement de solutions logicielles performantes et adaptées à la prise en compte de la CEM au niveau du prototypage numérique qui sont abordés : la modélisation des sources de perturbations, des composants et chemins de propagation en électronique de puissance

ainsi que les aspects de modélisation et d'optimisation globales au niveau de systèmes complexes (câbles de puissance, système électrique global d'une voiture ...).

Par ailleurs, la plupart des développements de ce projet nécessiteront des mesures expérimentales sur des prototypes de complexité industrielle. A ce titre Valeo et Renault pourront être amenés à fournir des systèmes (ou des parties de systèmes) qui serviront à évaluer la pertinence des modèles par comparaison entre résultats numériques et expérimentaux.

- **Tâche 1** : coordination du projet

La coordination du projet sera réalisée par Valeo dont certains membres ont une bonne expérience dans ce domaine : animation scientifique, gestion des délais et des livrables, coordination, organisation de réunions ....

- **Tâche 2** : modélisation des sources de perturbation en électronique de puissance

Il s'agira de mettre au point des techniques de caractérisation et d'extraction de paramètres pertinents permettant de renseigner des modèles paramétrables de sources équivalentes adaptées aux simulations temporelles ou fréquentielles. Chacun des modèles aura des objectifs de pertinence fréquentielle différents : typiquement 10 MHz maximum pour les modèles temporels et 200 MHz pour les modèles fréquentiels. Deux approches s'appuyant sur des techniques d'extraction similaires seront abordées : une modélisation au niveau composant ou cellule de commutation élémentaire et une deuxième approche au niveau convertisseur.

- **Tâche 3** : bibliothèques de composants

La caractérisation de composants passifs complexes doit permettre d'extraire des modèles sur une plage de fréquence étendue et intégrant en plus l'interaction en champ proche avec leur environnement électromagnétique (autres composants, pistes, blindage ...). En particulier, les actionneurs électriques feront l'objet d'une modélisation de leur contribution à la transmission des perturbations conduites.

- **Tâche 4** : modélisation des chemins de propagation des perturbations

Développer des modèles large bande (DC – 200 MHz) des impédances parasites de la connectique des systèmes complexes est un défi majeur de la modélisation CEM. Cet aspect sera abordé au travers du développement de solutions numériques basées sur des méthodes intégrales combinées avec développement multipolaires rapides (Fast Multipole Method ou FFM). En effet, il apparaît que cette approche présente des avantages en terme de précision et de réduction des lourdeurs de calcul par rapport aux approches traditionnelles du type méthodes éléments finis ou méthodes intégrales classiques.

- **Tâche 5** : modélisation système et optimisation locale et globale

Il s'agit ici d'introduire un nouveau niveau de modélisation CEM des systèmes complexes. Au-delà de l'aspect modélisation pour la prédiction lors de la phase de prototypage numérique (qui est déjà en soit un défi majeur), il faudra initier des couplages de modèles avec des algorithmes d'optimisation (déterministes ou stochastiques) afin de trouver de nouvelles solutions locales (par exemple conception optimisée d'actionneurs sous contraintes CEM) et globales (répartition des contraintes sur les différents constituants) aux problèmes CEM des systèmes complexes. Par ailleurs, le passage des modèles dans le domaine d'utilisation industriel amène des

besoins nouveaux tels que la prise en compte des incertitudes sur les constituants d'un système (matériaux, composants, géométries ...). Dans le prolongement de cette voie de recherche, il sera intéressant d'étudier l'impact des variations de certains paramètres sur le comportement CEM de l'ensemble du système afin de converger vers une approche d'optimisation robuste.

- **Tâche 6** : capitalisation logicielle et validation expérimentale

La capitalisation du savoir au niveau des techniques d'extraction de modèles, des modèles eux-mêmes et des outils de simulation utilisant ces modèles ne peut se faire que si il existe au sein du groupe un acteur industriel dans le domaine de la modélisation des systèmes électriques. Les utilisateurs finaux auront pour rôle d'orienter la structuration finale des résultats pour rendre exploitables par des ingénieurs les méthodes et modèles développés tout au long du programme. Ils fourniront aussi des systèmes de complexité industriels et les informations requises à des fins d'expérimentation et de validation des modèles et méthodes développées.

### 3.2. MANAGEMENT DU PROJET

Les acteurs de ce projet ont déjà mené des recherches conjointes (co-encadrements de thèses, contrats de recherche ...) dans le domaine de la CEM entre autres. Les équipes se connaissent bien, les compétences de chacun sont reconnues par les autres membres. L'animation de ce projet ne pose pas de problème, des réunions de travail et de coordination (présentation des résultats de recherche – 3 par an) serviront à coordonner les travaux de recherche (3 par an). D'autres réunions de travail plus fréquentes n'impliquant que les acteurs d'une action permettront de faire avancer les recherches.

Les productions logicielles, les résultats expérimentaux, les bibliothèques et les plateformes de test seront partagées par tous les acteurs du projet et pourront être étendus à d'autres (industriels utilisateurs finaux non concurrents - transport aéronautique par exemple-, laboratoires, industriels dans le domaine du logiciel ...) avec l'accord de tous les participants initiaux. Les clefs de la réussite d'un tel projet résident dans la création d'un outil logiciel « vivant », assez ouvert pour pouvoir évoluer perpétuellement et dont la communauté des auteurs qui sont aussi les utilisateurs trouvent un intérêt capital à le faire « vivre » bien au-delà des 3 années de ce projet.

En définitive, le support demandé au travers de ce dossier est la mise de fond essentielle au démarrage d'un projet aussi ambitieux tant du point de vue scientifique (les recherches développées dans le cadre de ce projet auront des retombées bien au-delà des applications en CEM) que fédératif.

### 3.3. DESCRIPTION DES TRAVAUX PAR TÂCHE

#### 3.3.1 TÂCHE 1 : COORDINATION DU PROJET - VALEO

Il s'agit d'une tâche de coordination indispensable pour le bon déroulement de l'étude. Ceci d'autant plus que les partenaires sont localisés sur différents sites. Cependant, il ne s'agit pas d'une collaboration nouvelle dans la mesure où l'ensemble des partenaires est actuellement impliqué dans un projet commun O2M financé par le FUI. Le coordinateur

Valeo a une bonne expérience dans le domaine de l'animation scientifique et dans l'organisation du travail en réseau.

### 3.3.2 TÂCHE 2 : MODÉLISATION DES SOURCES DE PERTURBATION EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE - **SATIE** / G2ELAB

Une des difficultés dans l'analyse CEM des réseaux de bord modernes est la prise en compte des convertisseurs statique de plus en plus nombreux. Le découpage utilisé pour atteindre de bons rendements génère par ses fronts de courant et de tension, des perturbations pouvant atteindre des fréquences équivalentes assez élevées (jusqu'à environ 100 MHz). Bien rendre compte de ces signaux nécessite la prise en compte de toutes les "imperfections" dues à la réalisation technologique, au sein du convertisseur notamment.

Une première approche dont le degré de maturité commence à être bien avancé consiste en une modélisation extensive du convertisseur, décrivant le plus précisément possible les technologies de semiconducteurs, de câblage et de composants passifs utilisés, ainsi que leurs modèles électriques équivalents [Revol03], [Popescu99]. Une simulation temporelle de l'ensemble, au cœur d'un environnement électromagnétique défini, permet l'évaluation des perturbations émises. Il est malheureusement difficile d'utiliser cette méthode au niveau d'un réseau embarqué, dans la mesure où le nombre de convertisseurs est très important, et où le réseau lui-même devra être pris en compte dans la modélisation (Tâche 3 et 4). Ainsi, l'état de l'art actuel permet l'étude du convertisseur sur un réseau normalisé (Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne) aux impédances bien définies en mode différentiel comme en mode commun. La méthode retenue depuis maintenant quelques années par la communauté CEM en électronique de puissance consiste à remplacer les semiconducteurs en commutation par des sources équivalentes, excitant un réseau passif composé des divers éléments du convertisseur et de son environnement. La résolution du problème s'effectue alors dans le domaine fréquentiel, ce qui est bien plus performant que le pas à pas dans le temps.

La première approche proposée partira donc d'une modélisation à base de sources équivalentes décrivant la commutation, pour permettre de reproduire les émissions conduites du convertisseur. Autour de ces sources, la modélisation du convertisseur se complètera par la prise en compte des éléments environnant les semiconducteurs: éléments de stockage, de filtrage et interconnexions associées. L'ensemble de ces sources et de ces impédances, construit à partir de la connaissance fine de la réalisation du convertisseur, permettra de dégager un modèle équivalent du convertisseur. Ce modèle pourra être décliné dans sa version complète, ou projeté sur les bases classiques du Mode Différentiel/Mode Commun en vue de simplifications éventuelles.

Une autre approche qui est conceptuellement en rupture par rapport à cette modélisation extensive du convertisseur commence à émerger en vue des analyses réseau [Baisden09], [Foissac09]. Il s'agit de caractériser le convertisseur vu de ses points de connexion au réseau, sans aucune connaissance de sa constitution interne. Un modèle générique à base de sources équivalentes et d'impédances associées (type multipôle actif) est proposé qu'il s'agit d'identifier. Pour cela, plusieurs essais sont réalisés en modifiant les conditions de raccordement à l'alimentation. Le résultat d'identification de cette "boîte noire" représente ainsi globalement le comportement du convertisseur connecté à tout type de réseau.

Les deux approches sont parfaitement complémentaires, puisque l'une permet de réagir sur la conception interne au convertisseur et de mieux comprendre son comportement, alors que la deuxième est plus orientée vers l'insertion du convertisseur sur le réseau et des interactions entre plusieurs dispositifs. Par ailleurs, la comparaison des résultats des deux approches en terme de sources équivalentes identifiées sera riche d'enseignements en terme de compréhension des mécanismes de génération des perturbations. En effet, la modélisation extensive partant d'une connaissance présupposée de la structure du convertisseur devrait déboucher au final, après simplification, sur des sources et des impédances peu différentes de l'approche "boîte noire".

Cette tâche 2 sera réalisée par les deux partenaires via le coencadrement d'une thèse, dont la localisation principale sera sur le G2ELab les deux premières années, et sur le SATIE en dernière année. Les deux partenaires se connaissent particulièrement bien dans ce domaine de la CEM, et la cohérence du suivi en bénéficiera. Cette Tâche 2 se déroulera de la manière suivante:

### **Tâche 2.1. Etude Bibliographique sur les approches de modélisation CEM en électronique de puissance**

#### **Tâche 2.2. Modélisation extensive de convertisseurs.**

Sur la base d'un exemple particulier, l'onduleur triphasé, il s'agira de mener à bien la modélisation extensive, incluant les différents composants du convertisseur et des technologies de réalisation de câblage variées. Une étude de sensibilité permettra d'appréhender le degré de précision nécessaire sur la connaissance des imperfections de ces divers éléments vis-à-vis du comportement CEM global du convertisseur. L'approche menée ici sera sous tendue par des simulations temporelles et des mesures sur un réseau normatif.

#### **Tâche 2.3. Amélioration des modèles de source intra-convertisseur.**

La tâche 2.3 est dédiée à l'amélioration de la connaissance de ces sources et à leur retranscription par des modèles mixtes temporels/fréquentiels analytiques ou semi-analytiques. L'identification et la modélisation des sources de perturbations EM localisées est nécessaire pour synthétiser le comportement des émissions conduites d'une structure et restent une approche qui à ce jour donnent les résultats les plus satisfaisants. Qu'elles soient internes aux convertisseurs de puissance ou sensées représenter la totalité des grandeurs perturbatrices d'une structures et/ou d'un ensemble de structures, ces sources se doivent d'être correctement renseignées sur une plage de fréquence étendue (>100MHz). Si l'influence du mécanisme de commutation sur les perturbations EM est clairement connue, les formes d'ondes restent complexe à prédéterminer avec le plus de réalisme possible. Suivant la nature des interrupteurs (i.e. leur technologie), les commutations diffèrent et leur impact sur le niveau de perturbation est nettement visible. Les imperfections de la connectique proche des composants de puissance jouent un rôle important sur les formes d'onde en commutation, toutefois une technique élaborée pour dissocier les effets des cette connectique des effets liés aux interrupteurs (incluant leurs boîtiers) est envisagée. En effet, les travaux antérieurs sur la modélisation des interrupteurs en commutations pour la CEM ne donnaient des résultats que sur une plage de fréquence modeste (<10 MHz) [Rev04] [Cost05], l'approche visée permet d'étendre le spectre des générateurs internes au-delà de 100MHz.

#### **Tâche 2.4. Amélioration des performances de calcul.**

Les simulations temporelles sur lesquelles des analyses fines peuvent s'appuyer nécessitent une amélioration significative des temps de calcul. En effet, ces simulations bien que précises et relativement simples à mettre en œuvre grâce à des interfaces logicielles conviviales souffrent encore de nombreux problèmes temps de calcul et d'instabilité numériques et ne sont généralement utilisées qu'à l'étude fonctionnelle des structures de puissance. Pour des simulations dédiées aux études de CEM, il semble nécessaire d'abandonner les techniques usuelles consistant à connaître les signaux recherchés en régime permanent sur la plus petite fréquence du système à l'aide d'un pas de calcul choisi pour obtenir la plage de fréquence la plus large. L'approche proposée consiste à ne calculer les signaux désirés que sur un intervalle de temps très court et de reconstruire mathématiquement par post traitement la totalité du signal à l'aide de la stratégie de commande [Labr10]. Cette technique offrant des résultats très intéressants pour des structures connues (onduleurs triphasés, hacheurs) devra être généralisée pour obtenir des performances similaires pour un ensemble de structures sur un même réseau d'alimentation.

#### **Tâche 2.5. Source équivalente pour étude réseau**

A partir des résultats des Tâches 2.2, 2.3. l'objectif est de proposer une réduction du modèle, sous forme de sources et d'impédances équivalentes. La théorie classique des circuits pourra bien sûr être utilisée, mais on s'attachera également à l'étude de la séparation des perturbations en Mode Différentiel et Mode Commun, pour analyser les simplifications possibles au niveau des modèles de sources équivalentes. Une approche critique devra être toutefois conservée, dans la mesure où il ne s'agit pas de dimensionner des filtres, domaine où cette décomposition est particulièrement adaptée, mais bien de reconstituer l'ensemble des perturbations sur un réseau.

#### **Tâche 2.6: Modélisation Boîte Noire**

Les thèses de [Baisden09] et [Foisac09] ont posé les jalons de cette modélisation comportementale et des processus d'identification associés. Sur l'exemple du convertisseur utilisé précédemment (onduleur triphasé), il s'agira de mener l'approche jusqu'au bout et d'identifier ses limites de validité éventuelle. L'approche sera menée au moyen de simulations temporelles et de mesures. La validation se fera dans le cadre d'un convertisseur connecté à un réseau normatif, via des impédances de lignes variables.

#### **Tâche 2.7: Analyse comparative des modèles**

La comparaison des modélisations extensive et comportementale permettra peut être de mieux comprendre les mécanismes de génération des perturbations

#### **Tâche 2.8: Validation sur un réseau test**

Cette sous tâche, réalisée au Satie, visera à tester "grandeur nature" la pertinence des modèles de source proposés. Plusieurs convertisseurs seront interconnectés via des câblages dont les caractéristiques seront variables, et la mesure des perturbations en tout point du réseau permettra de valider l'une ou l'autre des modélisations proposées.

#### **Verrous:**

1-La première approche partant de la modélisation extensive est particulièrement bien maîtrisée par les deux partenaires, et ne devrait pas causer de surprise majeure. Toutefois, elle n'est pas systématiquement applicable dans le contexte industriel, puisqu'elle nécessite la connaissance intime du convertisseur et de sa réalisation. Une version dégradée (sans la

connaissance fine des technologies de réalisation) est possible, moyennant une réduction du spectre d'étude à des fréquences où ces aspects sont moins prépondérants.

2-L'approche "Boite Noire" semble bien plus prometteuse, mais sa validité sur une large gamme de variation d'impédances de réseau reste à démontrer. En effet, il ne faudrait pas que soit remis en cause la notion d'indépendance de la source de perturbation vis-à-vis du du réseau sur le quel elle est connectée. Il est possible que cette approche ne puisse fonctionner que pour certaines gammes de convertisseurs dont le niveau de filtrage en entrée sera suffisamment efficace. Il faudra à ce moment définir les caractéristiques minimales de ces filtres avant de pouvoir utiliser cette méthode.

3-La modélisation fine des sources internes aux structures passe par l'élaboration de fonctions imbriquées permettant à partir d'un ordre de commande de représenter les évolutions des tensions et courants commutés de la cellule de commutation. Cette analyse doit permettre de représenter l'association de 2 composants en commutation à l'aide de deux fonctions de transfert, l'une associée à l'évolution du courant et l'autre à l'évolution de la tension. Cette représentation très particulière doit permettre de lever les problèmes de modélisation des non-linéarités des interrupteurs de puissance. Des travaux récents montrant toute la pertinence de cette approche, il est toutefois nécessaire de renseigner de façon plus précise ces fonctions en recherchant les paramètres les plus pertinents donnés par l'environnement proche des composants. Une représentation des commutations sur une plage de fréquence nettement supérieure (100MHz à 200MHz) à celle couramment présentée est envisagée (10MHz).

4-l'élaboration de bancs instrumentés permettant l'identification et l'extraction des fonctions de transfert précédentes. La technique envisagée nécessite un ensemble de mesures précises des grandeurs de commandes et de commutation d'une cellule de commutation. La structure de tests doit être entièrement caractérisée et suffisamment peu influente pour permettre de n'extraire que le comportement intrinsèque des composants utilisés.

5-La technique visant à diminuer les temps de calcul offre des résultats surprenants pour des courants impulsionnels à l'instar des courants de mode commun, elle reste délicate à mettre en œuvre pour des courants de mode différentiel et se doit d'être adaptée.

#### **Livrables (sous forme de rapports) :**

- 1 - Rapport bibliographique
- 2 - Modélisation extensive de convertisseur sur réseau normalisé
- 3 - Modèle équivalent de source à partir de la connaissance extensive du convertisseur ou par fonctions de transfert, mise en place des protocoles d'extraction des paramètres critiques de ces fonctions en s'appuyant sur un banc de test dédié.
- 4 - Modèle Comportemental: Méthodologie d'identification et limites de validité
- 5 - Amélioration des performances de calcul par reconstruction spectrale et technique de convolution. Cet objectif permettra de conclure quant à la possibilité d'utiliser des techniques d'optimisation s'appuyant sur des simulations temporelles.
- 6 - Rapport de test

#### **3.3.3 7 - MÉMOIRE DE THÈSE DE DOCTORAT TÂCHE 3 : BIBLIOTHÈQUES DE COMPOSANTS - IRSEEM / AMPERE / SATIE**

Cette tâche est essentiellement destinée à fournir des modèles pour l'analyse et la conception des « composants » au sens large d'un système d'énergie électrique, elle concerne les composants passifs et les charges. Cette tâche est complémentaire de la précédente où seules sont considérées les sources et de la suivante qui s'attèle à modéliser

les interconnexions entre les composants. En fait, lorsqu'il s'avère impossible de modéliser par une approche numérique globale des éléments dont la géométrie est trop complexe (inductances, capacités ...), il est indispensable de disposer de modèles équivalents qui puissent rendre compte de l'interaction de ces éléments avec les dispositifs avoisinants : autres éléments (inductance ...), actionneurs, pistes ... Ces modèles peuvent être renseignés de différentes façons (mesures spécifiques, calculs analytiques, simulation numérique locale ...).

### Tâche 3.1. Modélisation des actionneurs pour la CEM (analyse et conception) (Satie)

Les actionneurs électriques constituent généralement l'élément final d'une chaîne d'énergie, ils sont à l'interface entre le convertisseur de puissance et le système mécanique. De ce fait, ils constituent une voie privilégiée pour la transmission des perturbations électromagnétiques à l'environnement. La complexité de ces composants, leur caractère tridimensionnel et multi-matériaux en font des objets très difficiles à modéliser. Quelques travaux ont déjà été menés sur la question [Verm03] mais le constat est que le sujet est loin d'avoir été bien compris et seuls quelques modèles comportementaux ont pu être proposés qui permettent d'estimer les courants de mode commun.

Par ailleurs, les convertisseurs de puissance utilisés dans les applications « transport » voient la température à laquelle ils devront fonctionner s'élever, de l'ordre de 120°C pour l'automobile et de 200°C pour l'aéronautique. Cette évolution passe donc par l'utilisation d'une nouvelle génération de semi-conducteurs au SiC (carbure de silicium). Les contraintes électriques qui en découlent sont sévères pour l'actionneur : les  $dV/dt$  et  $dI/dt$  sont bien plus importants que pour la technologie Silicium, accroissant de fait les contraintes électrostatiques dans les enroulements, les courants de mode commun dans le châssis et les roulements, et probablement le rayonnement EM. Cette sensibilité est encore accrue par le fait que le fonctionnement à haute température de l'actionneur active la réactivité chimique des matériaux isolants, impactant la CEM et la fiabilité.

Il nous semble donc très important de travailler sur des modèles d'analyse et de conception sous contrainte CEM des actionneurs électriques qui seront alimentés par des convertisseurs statiques au SiC.

#### Verrous :

1-la compréhension des mécanismes de propagation des courants HF de mode commun et de mode différentiel dans un actionneur électrique en fonction de son architecture, des matériaux isolants utilisés, de la répartition des bobinages. Les phénomènes de transfert de mode (différentiel → commun) sont notamment très mal compris et maîtrisés, il est nécessaire de comprendre ces effets si on veut minimiser l'impact CEM d'un actionneur. Dans cet objectif, des bancs spécifiquement instrumentés devront être constitués pour aider à l'élaboration des modèles,

2-la compréhension des mécanismes de circulation des courants de mode commun dans les masses métalliques d'un actionneur, en particulier on analysera les modes de couplages stator-rotor, la circulation des courants de mode commun dans les arbres moteur, dans les paliers et roulements. On cherchera à comprendre les mécanismes de dégradation des paliers liés à des courants de mode commun impulsions à haute énergie; là aussi des bancs de test spécifiques devront être développés,

3-la connaissance des effets conduits précédemment évoqués devrait permettre l'élaboration de modèles électrique pour la prédétermination des grandeurs de perturbation, mais aussi des modèles de conception paramétrés par la géométrie et les propriétés des matériaux,

4-la compréhension du rayonnement des actionneurs : le refroidissement des actionneurs implique souvent que leur enveloppe soit ouverte, ce qui favorise le couplage des

rayonnements électromagnétiques HF directement ou indirectement par le mécanisme de rayonnement des fentes si l'enveloppe est parcourue par des courants de mode commun HF.

Ainsi, il apparaît que la conception d'un actionneur pourrait être optimisée non seulement en prenant en considération sa fonctionnalité, son rendement, sa fiabilité mais aussi son comportement CEM. L'usage d'outils d'optimisation multi-critères pour la conception d'un actionneur nécessite donc de compléter les modèles de conception déjà connus par la prise en compte des aspects de CEM.

**Livrables :**

Cette tâche sera donc abordée dans le cadre d'une thèse et séquencée selon les verrous qui ont été évoqués :

1-Elaboration de modèles électriques pour prédéterminer la circulation des courants HF de mode commun et de mode différentiel ainsi que les transferts de mode dans un actionneur; on s'appuiera sur des bancs spécifiques de caractérisation qui permettront aussi d'évaluer le rayonnement EM dû à la circulation des courants de mode commun

2-Elaboration de modèles pour la conception optimisée d'actionneurs électrique sous contraintes CEM, proposition de structures d'actionneur minimisant les effets, choix de bobinages ou de matériaux optimaux.

3-Intégration des modèles de conception CEM aux modèles de conception fonctionnels, optimisation globale de l'actionneur.

Chaque tâche sera validée par un rapport d'étape s'appuyant sur des démonstrateurs, des bancs d'essais ou de caractérisation. La synthèse des travaux sera présentée dans le manuscrit de thèse.

**Tâche 3.2. Modélisation en mode rayonné de composants complexes (Ampère – Irseem)**

Afin d'adresser les problématiques de couplage en champ proche, nous travaillerons sur le développement de modèles champ proche 3D basés sur des sources équivalentes. Ces modèles sont nécessaires lorsque les simulations 3D de composants ou de macro-composants deviennent trop lourdes en temps de calcul ou impossible. L'objectif est de pouvoir calculer le champ électromagnétique créé par des composants et des structures de l'électronique de puissance. Deux approches complémentaires sont proposées.

En premier lieu (méthode de mesures ponctuelles), nous pourrions nous appuyer notamment sur les modèles 2D développés à l'IRSEEM et combinant des dipôles électriques et des dipôles magnétiques [Fern09] [Benh08]. Ces modèles permettent de calculer le champ électrique et magnétique en champ proche de cartes et composants. L'extraction des modèles est basée sur une méthode inverse à partir de données expérimentales obtenues en champ proche. Dans ce projet, nous souhaitons étendre ces modèles en 3D.

En deuxième lieu (méthode de mesures intégrales), des recherches seront menées dans le prolongement de travaux déjà réalisés à Ampère et au G2Elab sur la construction de sources équivalentes de structures complexes à partir d'harmoniques sphériques [Zang09]. Cette approche est complémentaire de la précédente pour plusieurs raisons. Elle est d'une part peu sensible au positionnement de l'objet à l'intérieur de la sphère de validité de la source, elle reste cantonnée pour des interactions en champ proche car la technique de mesure repose sur des techniques intégrales qui ne sont réalisables qu'en champ

magnétique (approximation quasi statique) enfin cette technique fournit des sources équivalentes sous une forme très adaptée au couplage avec la méthode développée dans la tâche 4 pour les interconnexions électriques. Actuellement, seule l'approche magnétique est a été abordée, il est envisagé de développer l'approche « électrique ».

Enfin, cette méthode permet aussi le calcul d'éléments de couplage localisés (mutuelle en fonction de leur placement respectifs), entre deux composants caractérisés avec cette technique. Ces recherches s'appuieront sur un banc de mesure en cours de développement à Ampère.

**Verrous :** (méthode de mesures locales):

1-La réduction et l'optimisation des modèles d'émission afin de permettre des études sur des structures complexes.

2-L'adaptation des bancs de mesures en champ proche existants à l'IRSEEM sera également nécessaire afin de pouvoir faire des mesures autour de dispositifs de l'électronique de puissance. La méthodologie mise en place sera éprouvée sur le démonstrateur du projet.

**Verrous :** (méthode de mesures intégrales):

1-Finaliser le banc et porter sa validité dans la bande de fréquence d'intérêt du projet (jusqu'à plusieurs centaines de MHz).

2-Développement du formalisme en champ électrique et élaboration d'un banc de caractérisation en champ E (mesures intégrales).

**Livrables :**

1-Technique de mesure en champ proche 3D par mesures ponctuelles et par mesures intégrales, algorithmes adaptés à la technique de mesures pour la résolution des problèmes inverses.

2-Extraction de sources équivalentes rayonnées (deux méthodes) et d'éléments de couplage dépendant du placement des objets (méthode de mesures intégrales).

### 3.3.4 TÂCHE 4 : MODÉLISATION DES CHEMINS DE PROPAGATION DES PERTURBATIONS - G2ELAB / AMPERE / IRSEEM

Dans cette action, il s'agit d'une part de modéliser les couplages parasites entre les éléments de liaisons électriques (pistes, bus barre, câbles ...) et d'évaluer leurs interactions avec les autres dispositifs à proximité. En premier lieu, il conviendra de progresser sur les méthodes de modélisation numérique de ces liaisons. Le projet s'intéressera à la méthode PEEC couplée avec les développements multipolaires rapides. Cependant, lorsqu'il s'avère impossible de modéliser la totalité des éléments complexes avec une méthode numérique classique, il est nécessaire de revenir à un modèle équivalent, obtenu par mesure comme ce qui est proposé en tâche 3. Il convient alors de coupler ces modèles avec les méthodes numériques pour accéder à une modélisation système globale. Deux voies de recherche sont envisagées. Une première consiste à introduire localement, au sein d'une modélisation des interconnexions électriques, des sources de type harmoniques sphériques représentant le rayonnement et la susceptibilité du composant. Dans une deuxième approche, le couplage sera considéré comme faible (pas d'interaction des connexions vers le composant). Le choix de la méthode va dépendre de critères qui seront à identifier et quantifier lors d'essais sur des maquettes de validation.

#### Tâche 4.1. Modélisation des interconnexions électriques (G2Elab)

L'objectif de cette sous tâche est d'explorer le potentiel des méthodes multipolaires rapides (FMM) dans des approches magnéto-dynamiques à base de méthodes intégrales couplées ou non.

La résolution de problèmes physiques à l'aide de méthodes intégrales conduit systématiquement à des tailles de systèmes linéaires importantes. En effet, ces méthodes entraînent la construction de matrice d'interactions pleines. De plus, dans la problématique magnéto-harmonique, ces matrices sont pleines et complexes. La résolution nécessite donc des tailles mémoires importantes et même prohibitives lorsque l'on souhaite modéliser un dispositif complexe. Afin de contourner cette difficulté l'idée est d'employer des FMM, permettant ainsi la compression des données lorsque les interactions sont lointaines tout en contrôlant l'erreur commise par la compression de l'information. L'idée est donc d'utiliser cette potentialité dans la méthode PEEC (Partial Equivalent Elements Circuit) [Hoer65], méthode particulièrement intéressante pour avoir une représentation sous forme de circuit électrique équivalent et donc permettre les couplages « système ». Ce travail est constitué de 2 parties distinctes :

- Introduction des FMM au sein de la méthode PEEC
- Etudier différentes techniques de préconditionnement. En effet, l'emploi de FMM rend l'utilisation de méthodes directes de résolution impossible. Par conséquent il est nécessaire d'employer une méthode itérative (GMRes ou double gradient conjugué typiquement). Les vitesses de convergences de ces méthodes sont particulièrement sensibles aux conditionnements du système à résoudre.

La méthode PEEC possède une limitation contraignante lorsque l'on veut l'employer pour étudier la CEM de dispositifs car elle ne permet pas de prendre en considération les matériaux magnétiques. Des travaux récents ont montré l'intérêt qu'il pouvait y avoir de coupler certaines approches à base de méthodes intégrales [LeDuc09] pour la prise en compte de ces matériaux. Ces couplages sont a priori compatibles avec des méthodes de type FMM. Toutefois il est nécessaire de tester cette technique afin de savoir ce que l'on peut en attendre. Comme précédemment, ce travail nécessitera les 2 mêmes interventions :

- Introduction des FMM au sein de l'interaction
- Développement d'un préconditionneur.

#### Verrous :

1. L'introduction des FMM dans des codes de calcul de type PEEC n'est pas naturelle. En effet, les techniques FMM ont été historiquement développées pour évaluer des potentiels à partir de charges. Dans le cas de PEEC il s'agira de déterminer des potentiels vecteurs normalisés à partir de densités de courant.

2. La mise en place de préconditionneur dans ce type de résolution peut-être délicate. En effet, de façon classique, les préconditionneurs travaillent sur les termes se trouvant sur et à proximité de la diagonale. Or, selon la technique de mise en équation employée, les termes se trouvant sur la diagonale peuvent être évalués à l'aide des FMM (et sont donc inconnus) rendant leur utilisation impossible dans des préconditionneurs classiques. La mise en place d'un préconditionneur est d'autant plus importante que les grandeurs se trouvant dans la matrice n'ont pas nécessairement les mêmes ordres de grandeurs.

3. L'introduction des FMM dans la réalisation d'un couplage entre la méthode PEEC et une méthode intégrale permettant la prise en compte de matériaux magnétiques conducteurs nécessite l'introduction d'opérateurs différentiels (entre autre l'opérateur rotationnel).

Une demande de 12 mois de post-doctorat est associée à cette sous-tâche. Le post-doctorant sera basé au G2ELab.

**Livrable :**

Rapport présentant la mise en œuvre des FMM dans ces différentes approches et ce que l'on peut en attendre.

**Tâche 4.2. Couplage fort interconnexion – composants (Ampère – G2ELab)**

Dans cette action, les résultats de la tâche 3 en terme de sources équivalentes de composants complexes représentées sous forme d'une décomposition en harmoniques sphériques sont exploités afin de modéliser un couplage fort existant entre ce composant et les interconnexions électriques proches. Il est à noter que ce type d'interaction a déjà été identifié expérimentalement dans des convertisseurs de puissance (avec des effets significatifs !) mais n'a jamais été approché par la modélisation.

Les formalismes FMM et harmoniques sphériques sont par essence très proches puisque l'approximation des champs réalisée dans les FMM est basée sur des décompositions harmoniques. Il semble donc possible et assez naturel d'introduire les modèles multipolaires (ou harmoniques) issus de la tâche 3 dans le code PEEC qui sera développé.

Cependant, la représentation d'une source complexe sous forme d'harmoniques sphériques n'est valable qu'à l'extérieur d'une sphère de validité qui englobe le composant, certaines erreurs pourraient donc être introduites, qu'il conviendra d'étudier soigneusement. Il faudra également être capable de ramener au centre de la sphère de validité (ou du volume) une source équivalente qui sera introduite localement (au centre du domaine de validité de la source) dans le modèle FMM. Par ailleurs, l'étude de la précision en fonction de paramètres géométriques, fréquentiels, de discrétisation est une étape cruciale qui devrait d'une part permettre d'évaluer l'impact de certaines grandeurs et d'en tirer des règles d'utilisation optimales.

**Verrous :**

- 1 - Formalisme de couplage entre la méthode FMM et la représentation en harmoniques sphériques d'un élément complexe en une source ponctuelle située au centre du domaine de validité afin de tenir compte des couplages entre des objets 3D et les interconnexions électriques
- 2 – Erreurs induites en cas de violation des sphères de validités.

**Livrables :**

Modèles de couplages forts entre pistes et composants complexes.

**Tâche 4.3. Couplage faible interconnexion – composants (Irseem)**

Dans certains cas il est suffisant d'évaluer le couplage faible en champ proche entre des éléments rayonnants et les interconnexions. Cette action portera donc sur l'utilisation des modèles champ proche associés à des méthodes analytiques afin d'étudier le couplage entre des éléments d'une carte de puissance et d'une carte de commande par exemple. Nous nous baserons sur les travaux initiés à l'IRSEEM sur ces techniques [Lese09] et utilisant le modèle d'Agrawal couplé à une méthode de résolution dans le domaine

fréquentiel. Les travaux porteront notamment sur l'amélioration du modèle analytique afin de pouvoir prendre en compte les caractéristiques électriques des PCB (permittivité, ...) et les impédances des composants. En outre, il faudra aussi définir clairement le domaine d'utilisation de cette méthode par rapport à l'action 4.2. Pour ce faire, des essais numériques et expérimentaux permettront de spécifier les cas où le couplage fort est requis. Dans le cas contraire, c'est la méthode développée dans cette action qui sera utilisée de par sa facilité de mise en œuvre.

**Verrous :**

Prise en compte des propriétés des matériaux, des spécificités de certains composants et établissement du domaine de validité de cette technique.

**Livrable :**

Modèles rapides de couplages faibles entre pistes et composants complexes.

**3.3.5 TÂCHE 5 : MODÉLISATION SYSTÈME ET OPTIMISATION LOCALE ET GLOBALE - AMPERE / G2ELAB / IRSEEM**

Les actions développées dans cette tâche concernent l'utilisation des modèles existant et à développer dans les tâches 2, 3 et 4 à des fins d'amélioration de la CEM de systèmes complexes. On vise clairement ici l'optimisation du comportement de la CEM des systèmes complexes lors de la phase de maquettage numérique. Actuellement, il existe quelques modèles pertinents pour la modélisation de certaines parties de systèmes complexes. Ces modèles sont utilisés à des fins de compréhension des mécanismes à l'œuvre mais ils sont pour la plupart utilisés et validés lors de la phase de vie du système réel. Il n'existe pour l'heure que très peu de dimensionnement CEM numérique dans l'industrie.

Dans ce projet nous proposons plusieurs ruptures :

- premièrement, le développement de modèles pertinents utilisables lors de la phase de maquettage numériques (tâches 2, 3 et 4)
- deuxièmement un environnement de capitalisation des modèles (tâches 6)
- troisièmement des méthodes utilisant les modèles des tâches 2, 3 et 4 qui permettront l'optimisation de systèmes complexes. C'est le principal objectif de cette tâche.

**Tâche 5.1. Techniques génériques d'optimisation système (Ampère – G2Elab)**

Il s'agit dans un premier temps d'utiliser les outils classiques d'optimisations (déterministes et stochastiques) qui seront couplés aux modèles existants [Jett09]. Actuellement, il n'existe pas de travaux relatant d'optimisation de systèmes complexes en CEM. Cette première action permettra d'explorer les possibilités offertes par approche et d'évaluer le potentiel des différentes techniques d'optimisation.

Le couplage des outils de modélisation CEM existant ou à venir sera effectué avec des méthodes permettant d'évaluer :

- l'impact de certaines variations paramétriques
- l'impact sur la CEM des systèmes des incertitudes sur les paramètres des modèles

Nous pensons ici aux méthodes de krigeage, de Monte Carlo ou encore à des techniques innovante faisant appel à des algorithmes stochastiques [Voye08].

A notre connaissance, aucun travail n'a été réalisé dans cette voie qui apparaît comme extrêmement pertinente du fait que les propriétés électromagnétiques des matériaux ainsi

que la valeur des composants peuvent évoluer avec la température, les géométries peuvent varier entre deux systèmes identiques (passage de câbles dans un véhicule...) ... Les retombées de ce type d'approche peuvent évidemment impacter bien au-delà du seul domaine du dimensionnement CEM.

**Verrous :**

- 1-couplage de méthodes d'optimisation adaptées (nombre d'itérations, objectifs ...) avec des modèles CEM système.
- 2-étude des variations paramétriques et de la distribution statistiques des paramètres des modèles sur le comportement CEM des systèmes.
- 3-possibilité d'envisager la répartition des contraintes CEM sur l'ensemble des constituants d'un système complexe.

**Livrable :**

Modélisations globales et outils d'optimisation adaptés.

**Tâche 5.2. Optimisations locales (Irseem – Ampère – G2Elab - Satie)**

Dans cette action, les différents acteurs du consortium s'attèleront à utiliser les modèles existants et développés lors de ce projet à des fins d'optimisation locales. Les contraintes prises en compte pourront être issues de d'optimisations globales d'un système fournissant par exemple :

- la valeur maximale de l'impédance de transfert d'un câble pour respecter un champ maximal rayonné,
- la valeur minimale de l'impédance de MC d'un actionneur pour limiter le courant de MC à une certaine valeur,
- l'atténuation minimale d'un filtre sur une gamme de fréquence
- le couplage maximal admissible entre deux composants
- ...

**Verrous :**

- 1-Couplage de méthodes d'optimisation avec des modèles CEM locaux (problèmes de temps de calcul ...)
- 2-Intégration des contraintes d'optimisation globales dans les optimisations locales

**Livrables :**

- 1-Techniques d'optimisations locales
- 2-Critères de choix de méthodes et d'outils

**3.3.6 TÂCHE 6 : CAPITALISATION LOGICIELLE ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE - CEDRAT / VALEO / RENAULT / AMPERE / G2ELAB / IRSEEM / SATIE**

**Tâche 6.1. Capitalisation logiciel (Cedrat)**

Dans le passé, de nombreux travaux de thèse sur des thématiques semblables de la CEM ont été menés entre différents industriels et différents laboratoires. Depuis quelques temps, les acteurs impactés ont cherché à fédérer les énergies et à mutualiser les moyens matériels et humains ainsi que les savoir-faire afin de répondre à la demande de plus en plus complexe des industriels dans le domaine de la CEM notamment dans le cadre du projet O2M.

Cette volonté des acteurs industriels et des universitaires du domaine a rencontré la volonté de CEDRAT de s'investir fortement dans la modélisation système électronique, électronique de puissance et CEM, suite au projet d'industrialisation du logiciel InCa3D, dédié à la modélisation électromagnétique basses ou hautes fréquences des impédances (inductances, mutuelles, résistances à haute fréquence) des bus bars et routage 3D des convertisseurs statiques...

Dans le cadre de ce projet CEDRAT propose d'industrialiser les méthodes et les composants permettant de faire de la CEM conduite et rayonnée dans ces outils (InCa3D et Portunus). Ces outils pourront ensuite être utilisés grâce à la plateforme de DASSAULT SYSTEME développé dans le cadre du projet O2M.

**Livrables :**

Industrialisation de méthodes et composants dans les outils CEDRAT (InCa3D et Portunus). Aide à l'utilisation de la plateforme O2M pour faire de la CEM globale et de l'optimisation des systèmes.

**Tâche 6.2. Validation matérielle (Irseem – Ampère – G2Elab – Satie – Renault – Valeo)**

Les modèles et méthodes développés seront validés dans un premier temps sur des systèmes simples (démonstrateurs de laboratoires). La plupart des travaux réalisés à ce jour (il en va de même dans la littérature spécialisée) s'arrêtaient à ce stade. Le présent projet propose une rupture essentielle sur ce point. Les différents modèles développés dans les actions précédemment décrites seront systématiquement confrontés à la complexité des systèmes industriels. Pour ce faire, Valeo et Renault fourniront des sous ensembles (éclairage à Led ...) ainsi que les informations nécessaires à leur modélisation (CAO, référence des composants ...).

Des mesures seront réalisées sur ces systèmes dans les différentes plates-formes disponibles au sein du consortium (Ampère, G2ELAB, IRSEEM et SATIE). Ces résultats expérimentaux serviront à évaluer la robustesse des méthodes vis-à-vis de la complexité des systèmes ainsi que la précision des modèles mis en œuvre (exploitation des modèles des tâches 2, 3 et 4).

L'exportation des résultats de la tâche 5 (optimisation) sera aussi réalisée et des améliorations des systèmes existants proposées.

**Verrous :**

- 1-Utilisation des outils sur des objets de complexité industrielle.
- 2-Validation des modèles et des approches innovants développés au cours du projet.
- 3-Possibilité d'intégrer la CEM dans le maquetage numérique des systèmes complexes.

**Livrables :**

Méthodes et outils pour la prise en compte de la CEM lors du maquetage numérique des systèmes de l'automobile.

**3.4. CALENDRIER DES TÂCHES, LIVRABLES ET JALONS**

La réalisation des différentes tâches pour mener à bien ce projet de recherche requière des moyens humains spécifiques. Le tableau 1 présente les moyens humains requis par tâches ainsi que le partenaire responsable de la tâche bien que la plupart des travaux soient encadrés par plusieurs partenaires du projet.

tâches	Labo-Encadrement		
3&5	<b>SATIE</b>	Conception machine avec CEM	1 thèse
2&5	<b>SATIE-G2Elab</b>	Travaux CEM système	1 thèse
"		Travaux Sources	
3&5	<b>IRSEEM-Ampère</b>	Modèle rayonné composants & syst	1 thèse
4&5	<b>G2Elab-Cedrat</b>	Modélisation interconnexions	1 post-doc
5	<b>Ampère</b>	Optimisations locales	1 post doc
5	<b>Ampère-G2Elab</b>	Optimisation	1 thèse
6	<b>Cedrat</b>	Capitalisation	

Tableau 1 : moyens humains demandés pour la réalisation des tâches et partenaire responsable

Le tableau 2 présente la répartition temporelle des tâches de ce projet. Les livrables ont été détaillés lors de la présentation détaillée de chaque tâche. Ces livrables devront être prêts au bout de deux ans. En effet, le séquençage des tâches a été choisi de manière à fusionner les différents travaux lors de la dernière année pendant les phases de prototypage et d'optimisation système. Pendant les deux premières années du projet, les chercheurs pourront bénéficier de l'encadrement et des matériels des différents partenaires. C'est lors de la dernière année, que les recherches seront mises en commun autour des démonstrateurs, de l'étude des systèmes industriels fournis par certains partenaires et de la phase d'optimisation.

Taches	Sous taches		t0	t0+12	t0+24	t0+36
2	2.1	Cellule Com				
	2.2	Cellule Syst				
	2.3	Optim				
3	3.1	Concept Machine CEM				
	3.2	mod. Rayon				
4	4.1	mod. Interconn				
	4.2					
5	5.2	Optimisation				
	5.2					
	5.2					
	5.2					
	5.1					
6	6.1	Capitalisation				
	6.2	Validation matérielle				
	6.2	Validation matérielle				
	6.2	Validation matérielle				

Tableau 2 : répartition temporelle des tâches

Il est à noter que les tâches proposées dans ce projet sont toutes à même d'être menées à bien. En effet, les partenaires de ce projet ont une bonne expérience dans ce domaine et les travaux à mener sont une prolongation naturelle et ambitieuse des activités de recherche menées jusqu'à ce jour. Si néanmoins, une tâche devait ne pas aboutir, cela ne remettrait pas en cause l'ensemble du projet qui a pour ambition de proposer une méthode et des outils adaptés à la prise en compte de la CEM et à son optimisation lors du prototypage virtuel des systèmes électriques d'un véhicule. Seulement les outils proposés ne seraient alors pas exhaustifs dans la représentation de tous les phénomènes à modéliser pour rendre compte de la CEM des systèmes complexes. Il faudrait alors pouvoir évaluer l'impact sur la précision des modèles.

## 4. STRATÉGIE DE VALORISATION DES RÉSULTATS ET MODE DE PROTECTION ET D'EXPLOITATION DES RÉSULTATS

Il est clair que le projet proposé ici nécessitera une valorisation poussée des résultats qui en découleront.

Les partenaires du projet ont montré qu'ils sont particulièrement sensibles à une politique de valorisation scientifique par la publication dès que les résultats des études le justifient. Une première étape de valorisation par des publications dans des revues reconnues dans le domaine sera mise en œuvre. Les communications dans des revues seront favorisées au même titre que dans les congrès reconnus.

Par ailleurs, les méthodes, bibliothèques et modèles développés au cours de ce programme seront intégrés par la société CEDRAT au sein d'un outil logiciel. De ce fait, l'objectif de capitalisation sera atteint et les partenaires du projet pourront bénéficier de la solution logicielle tout au long du projet. Les laboratoires alimenteront la plate forme de leurs méthodes et modèles tandis que les utilisateurs finaux (Valeo, Renault) orienteront l'outil au vu de leurs besoins spécifiques. Cette voie de valorisation/capitalisation fait actuellement cruellement défaut à la communauté et bloque les évolutions majeures en terme de « logiciel métier » qui sont attendues par les industriels du domaine.

## 5. ORGANISATION DU PARTENARIAT

### 5.1. DESCRIPTION, ADÉQUATION ET COMPLÉMENTARITÉ DES PARTENAIRES

Les partenaires de ce projet sont complémentaires de plusieurs points de vue.

Au niveau industriel, le consortium regroupe un assembleur (Renault) et un équipementier (Valeo) ce qui présente l'avantage de regrouper l'ensemble des besoins en modélisation CEM : niveau système, sous système, échanges de données (dans les deux sens) entre équipementier et assembleur, besoins à différentes phases d'un projet ... Cela permettra donc d'avoir un point de vue objectif et exhaustif des besoins.

Concernant les laboratoires, les équipes participant au projet sont aussi complémentaires avec des domaines communs de compétences. Ceci permet de partager l'encadrement de la plupart des travaux à mener dans ce projet. C'est un réel avantage pour les doctorants qui seront formés durant ces 3 ans (ils effectueront des mobilités entre les différents laboratoires et présenteront leurs travaux devant l'ensemble des partenaires. Enfin, la complémentarité est aussi présente au niveau des matériels disponibles dans les laboratoires. A titre d'exemple on peut citer l'IRSEEM qui dispose d'un banc de caractérisation en champ proche, Ampère (cage de Faraday anéchoïque et chaîne de mesure associée) ...

Les paragraphes suivants proposent une présentation de chaque partenaire du projet.

#### AMPERE :

L'objectif général des recherches menées à Ampère est de gérer et utiliser de façon rationnelle l'énergie dans les systèmes en relation avec leur environnement. Si l'énergie, ou plus exactement le vecteur qui permet le transport de l'énergie, peut être électrique, pneumatique ou hydraulique, le dénominateur commun à nos recherches réside dans les méthodes de traitement de l'énergie et de traitement de l'information, qui sont à la base identiques. Les systèmes que nous étudions ou que nous utilisons sont généralement multiphysiques. Enfin, la relation de ces systèmes entre eux ou avec leur environnement est fondamentale, et il est indispensable de savoir gérer leurs interactions.

La démarche que nous développons consiste à comprendre les phénomènes physiques et à les modéliser afin de concevoir des systèmes par nature complexes : c'est donc une démarche générale d'ingénierie. Il s'agit pour nous de faire avancer la connaissance, en développant des recherches à caractère fondamental, ou de résoudre des problèmes plus appliqués à fort enjeu sociétal ou technologique.

Notre projet de recherche se décline en sept priorités scientifiques:

- ✓ Méthodes et outils génériques de modélisation
- ✓ Intégration de puissance en SiC
- ✓ Electromagnétisme et vivant
- ✓ Systèmes mécatroniques et embarqués
- ✓ Matériaux dans les systèmes électriques
- ✓ Gestion d'énergie
- ✓ Systèmes à fluide sous pression et robotique médicale

**Le présent programme s'appuie naturellement dans les priorités 1, 2 et 4.**

#### **IRSEEM :**

L'Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués (IRSEEM) (EA 4353) adossé à l'ESIGELEC (Ecole Supérieure d'ingénieurs en Génie électrique) a défini ses trois thématiques d'activités en liaison étroite avec ses partenaires industriels et universitaires. Les groupes de recherche ont été structurés de façon à ce que le véhicule (ou tout autre objet mobile) et son environnement puissent être étudié dans sa globalité:

- ✓ Electronique & Systèmes (électromagnétisme, CEM et hyperfréquences),
- ✓ Automatique & Systèmes (contrôle et diagnostic moteur, surveillance des systèmes complexes),
- ✓ Instrumentation, Informatique & Systèmes (instrumentation et signal).

Le groupe transfert de technologie et développement économique local assure le transfert rapide des innovations de l'IRSEEM vers les entreprises et notamment les PME.

L'activité de recherche de l'équipe Electronique et Systèmes de l'IRSEEM, impliquée dans ce projet, est axée sur la compatibilité électromagnétique. Cette activité est divisée en trois axes principaux.

- ✓ Le premier axe est dédié à la CEM et la fiabilité des composants avec pour objectif principal de développer des modèles CEM susceptibles d'être intégrés dans les plates-formes de simulation.
- ✓ Le deuxième axe est plus orienté sur la modélisation, sous formes de sources électromagnétiques, d'équipements embarqués sur véhicules. Un autre aspect non négligeable est aussi étudié et concerne plus particulièrement l'impact CEM lié à la présence de câbles dans le véhicule.

Enfin il est à noter qu'il est impossible de caractériser l'ensemble de ces aspects CEM en utilisant uniquement des outils de CAO, c'est pourquoi les deux premiers axes de recherche s'appuient sur des plateaux de mesures et de diagnostics CEM développés et présents à l'IRSEEM.

#### **G2ELab :**

Le G2ELab est un laboratoire dont les organismes de tutelle sont Grenoble-INP, l'Université Joseph Fourier et le CNRS. Ses recherches couvrent la majorité des thèmes actuels du Génie Électrique : matériaux (magnétiques, supraconducteurs, ...) et leurs applications, la modélisation, la conception et l'optimisation des composants et des systèmes électriques

(interrupteurs statiques, convertisseurs, machines, entraînements électriques, etc.), la CEM, les réseaux électriques, les microsystèmes.

Le laboratoire développe des compétences multiples liées à la CEM des circuits de puissance depuis plus de 20 ans. Il a initié les approches simplifiées à base de sources équivalentes pour la modélisation des convertisseurs d'électronique de puissance, pour les émissions conduites et maintenant pour le rayonnement ne champ proche. Une forte compétence est également apportée au niveau de la modélisation et de la caractérisation des composants passifs dans le domaine fréquentiel. Enfin, il cultive depuis son origine une très forte compétence en terme de modélisation électromagnétique. Le G2ELab développe en particulier depuis une quinzaine d'années une approche originale pour la modélisation de l'environnement électromagnétique des systèmes de puissance (câblages, blindages, ...). Ces modèles sont capitalisés dans un logiciel nommé InCa3D, basé sur la méthode PEEC. Il est co-développé et commercialisé en partenariat avec la société Cedrat. Côté caractérisation, G2ELab possède des compétences et des moyens en mesure CEM conduite, ainsi qu'en champ magnétique faible, de quelques Hz à quelques dizaines de MHz.

#### **SATIE :**

SATIE est un laboratoire de recherche de renommée internationale dans le domaine des sciences et technologies des systèmes. On y mène des travaux dans des disciplines fondamentales (le génie électrique, la physique, la physique des systèmes et des microsystèmes) au service de la modélisation, de la conception et de l'optimisation d'un système d'énergie et/ou d'information. Une importance majeure est accordée à l'expérimentation associée à de tels développements théoriques.

Aujourd'hui, le laboratoire SATIE a 4 tutelles : l'ENSC, le CNRS, le CNAM-Paris et l'Université Cergy Pontoise. Il est ainsi réparti sur 4 sites : Cachan (1000m<sup>2</sup>), Ker Lann (site de Bretagne de l'ENSC) (400m<sup>2</sup>), CNAM (170m<sup>2</sup>), Cergy Pontoise (90m<sup>2</sup>). L'effectif est d'environ 120 personnes dont environ 40 permanents.

Depuis 2006, l'activité scientifique du SATIE est organisée autour de quatre équipes de recherche :

- BIOMIS : Microsystèmes pour la biologie
- IPEM : Intégration en Electronique de Puissance et Matériaux
- SETE : Systèmes d'Energie pour les Transports et l'Environnement
- TIM : Traitement de l'Information et Multi-capteurs

Ces 4 équipes travaillent sur des champs disciplinaires bien identifiés au sein des sections 7 et 8 du CNRS, 61 et 63 du CNU et DS8 et 9 de l'AERES.

#### **IPEM**

Les travaux de l'équipe IPEM concernent l'électronique de puissance. On y traite, convertit et gère l'énergie électrique. Les dispositifs sont conçus et optimisés par une approche globale qui intègre toutes les sous-fonctions (thermique, endurance, CEM) dans laquelle on associe le " juste nécessaire " de matériaux performants et adaptés pour réaliser la fonction de conversion, gérer la thermique, minimiser les émissions électromagnétiques et contrôler la fiabilité et la durée de vie.

### SETE

L'équipe SETE focalise ses activités de recherche sur les trois aspects du traitement de l'énergie électrique : la conversion (surtout électromécanique), la gestion optimale (dans les systèmes à énergie fluctuante et intermittente) et le contrôle (lois de commande et architectures matérielles associées). Il s'agit d'imaginer, d'élaborer et d'évaluer théoriquement et expérimentalement de nouveaux concepts permettant d'augmenter l'efficacité énergétique des modes de traitement de l'énergie existants, d'améliorer leur qualité de conversion et enfin, de minimiser leurs impacts environnementaux. L'équipe SETE se distingue à la fois par sa capacité à proposer des solutions innovantes et des approches méthodologiques globales associées à des modélisations adaptées à l'optimisation des systèmes électriques.

### TIM

L'équipe TIM a pour objectifs l'observation, l'identification, le diagnostic et le contrôle de systèmes physiques. Ces travaux scientifiques répondent aussi à des enjeux sociétaux majeurs tels que la fiabilité et la sécurité de systèmes industriels, le diagnostic et la caractérisation de matériaux et de structures, les performances et la fiabilité de systèmes de communication, l'optimisation du contrôle et de la commande de systèmes physiques. Pour atteindre ces objectifs, l'équipe a développé une approche pluridisciplinaire, dans laquelle elle conçoit, développe et met en œuvre des systèmes d'instrumentation et des algorithmes de traitement dédiés.

### BIOMIS

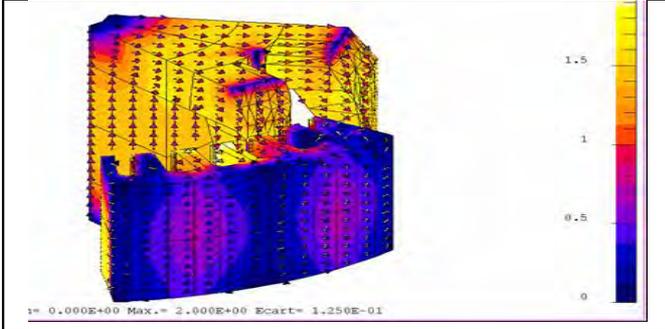
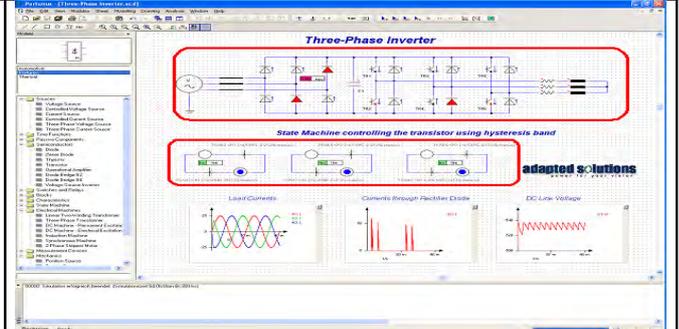
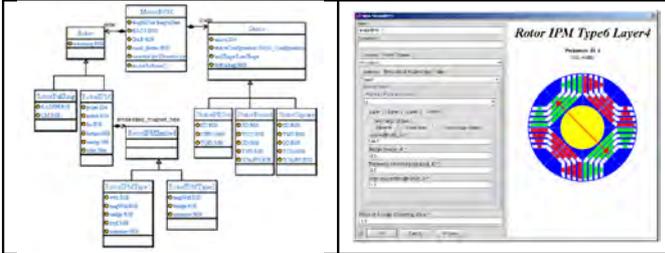
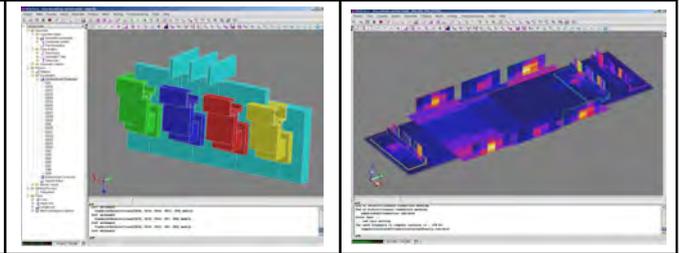
L'équipe BIOMIS est centrée sur l'étude et la conception de systèmes microstructurés pour des applications biologiques et médicale. Ce projet par nature pluridisciplinaire nécessite de regrouper, autour d'un noyau de chercheurs issus de notre communauté (63 du CNU et 8 du CNRS) des compétences dans d'autres discipline (biophysique, biologie, chimie...). A ce titre, sa place au sein de l'Institut d'Alembert (IFR121) y est fondamentale, facilitant l'interaction avec ces communautés.

### CEDRAT :

**CEDRAT SA** est éditeur de logiciels, leader au niveau mondial pour les outils de modélisation pour le génie électrique et la mécatronique. CEDRAT offre via les logiciels

- **FLUX**, logiciel éléments finis 2D et 3D de modélisation des phénomènes électromagnétiques basses fréquences permettant la modélisation fine d'actionneurs électromagnétiques,
- **InCa3D**, basé sur la méthode PEEC (Partial Element of Equivalent Circuit), permettant la modélisation électromagnétique des bus bars et de la connectique 3D
- **Portunus**, logiciel de simulation des systèmes électriques, électronique de puissance et mécatroniques, combinant systèmes physiques, graphes d'état et diagrammes par blocs
- **PSCAD**, simulateur de systèmes de puissance rapide, précis et facile d'utilisation pour le dimensionnement et l'analyse de tous types de systèmes de puissance.
- **MOTORCAD**, logiciel leader pour la modélisation thermique des machines tournantes électriques,
- **Speed**, basé sur des méthodes semi-analytiques (réseau de reluctance), est un outil de pré-dimensionnement des machines tournantes,

une suite de solutions logicielles unique au monde pour la conception et modélisation des actionneurs électromagnétiques, des systèmes mécatroniques et électroniques de puissances incluant les connectiques 3D.

	
<p>Modélisation EF par Flux3D d'un alternateur à griffe et comparaison calculs mesures (Images VALEO)</p>	<p>Modélisation d'un système électrique à l'aide du logiciel Portunus</p>
	
<p>Méta modèle (modélisation UML) des moteurs de type Brushless et boîte de dialogue d'instanciation associée dans le « BPM overlay »</p>	<p>Modélisation PEEC par InCa3D de la connectique d'un redresseur et d'un bus bar</p>

Flux, InCa3D sont en copropriété CEDRAT G2Elab. Portunus est une propriété de Adapted Solutions, société allemande dont CEDRAT SA est propriétaire pour 1/3 des parts. Motorcad est développé par MotorDesign (société Anglaise), Speed par l'université de Glasgow au sein du SpeedLab, PSCAD par le HVDC au Canada.

CEDRAT SA est une PME indépendante dont le capital est détenu à 100% par des personnes. CEDRAT détient 33% d'Adapted Solutions. CEDRAT SA regroupe environ 50 collaborateurs permanents. L'équipe technique, qui assure le développement et la maintenance des logiciels, est composée de 26 personnes, dont 10 docteurs (dont trois prix de thèse INPG), 3 doctorants et 9 ingénieurs. L'équipe technique couvre les compétences suivantes : génie électrique, modélisation système, électronique de puissance et CEM, électromagnétisme, méthodes numériques, méthodes des éléments finis, méthode PEEC, architecture informatique, Interface Homme Machine, CAO, maillage, méta modélisation, modèles UML ... Adapted Solutions comprend 5 personnes.

**Renault :**

Renault est aujourd'hui un acteur majeur de l'industrie automobile mondiale, et l'alliance Renault-Nissan occupe le 4<sup>ème</sup> rang au classement des constructeurs mondiaux en volumes de ventes. Avec la commercialisation annoncée de 4 modèles de véhicules électriques dans les prochaines années, et la préparation d'une seconde génération de véhicules tout électriques, la problématique de la CEM des systèmes électroniques de puissance est au

cœur des préoccupations de l'activité du PUCE (Pôle Unique de Compétences en Electronique) "CEM et antennes embarquées" de Renault. Ce service regroupe près de 25 personnes, consacrées à trois missions principales : le suivi du développement des systèmes électroniques embarqués pour les nouveaux projets de véhicules, la réalisation des essais physiques d'investigation et de validation sur véhicule, et le développement de la modélisation numérique. Cette dernière fait partie du noyau de compétences du service depuis le début des années 2000, en tant qu'aide à la compréhension des phénomènes physiques mais aussi en tant que support complémentaire aux essais physiques de validation des véhicules. L'expérience acquise par l'équipe est significative en matière de modélisation numérique 3D de problèmes de rayonnement d'antennes et de couplage champ à câble. En particulier, les solutions commerciales FEKO d'EMSS (algorithmes MoM, MLFMM, asymptotiques) et EMC Studio d'EMCoS (couplage MoM/Spice pour les problématiques CEM champ-câble) sont utilisées pour des besoins opérationnels comme pour des sujets d'étude et de connaissance. Un certain nombre de développements internes sous Matlab, en particulier un solveur BLT couplé à des formats de données industrielles, viennent compléter ce panel. Clairement, la thématique concernant la modélisation des convertisseurs de puissance en tant que sources conduites et rayonnées et des modes de couplage de ces perturbateurs n'a pas atteint le même niveau de maturité et le projet VTT doit contribuer à la construction de cette compétence. Sur les effectifs, 3 personnes détiendront les compétences requises pour participer à l'animation de l'avancement du projet et pour s'impliquer sur certains lots.

Parallèlement, d'autres équipes chez Renault travaillent activement à la modélisation du réseau de bord des véhicules électriques, dans une optique long-terme de conception multiphysique. Renault est donc également particulièrement intéressé par l'axe de travail de VTT portant sur la co-simulation et l'optimisation de système.

Valeo :

## 5.2. QUALIFICATION DU COORDINATEUR DU PROJET

**(0,5 page maximum)**

*Fournir les éléments permettant de juger la capacité du coordinateur à coordonner le projet.*

Rédiger par Valéo

## 6. JUSTIFICATION SCIENTIFIQUE DES MOYENS DEMANDÉS

### 6.1. PARTENAIRE 1 : IRSEEM

- *Équipement*

Les besoins en équipement de l'IRSEEM pour ce projet portent sur l'acquisition des logiciels de simulation électrique et électromagnétique. Nous travaillerons sur l'intégration des modèles développés dans ces outils et sur leur exploitation pour faire de l'optimisation CEM. Budget: 22,5 k€

- *Personnel*

Recrutement d'un doctorant sur 3 ans dans le cadre du projet pour travailler sur la modélisation en rayonné et sur les problématiques de couplage en champ proche. Le travail

du doctorant faisant partie intégrante du projet, nous demandons un financement complet sur le projet E-CEM. Il n'y a pas d'autres financements ou de bourse prévue sur cette action.

Profil du candidat : connaissances souhaitées en électromagnétisme et en électronique. Une expérience de programmation sous matlab et des compétences en électronique de puissance seraient un plus.

Personnel permanent: 18h.mois Enseignant/Chercheur sur 3ans pour assurer le suivi du projet, l'encadrement du doctorant et le développement des thématiques de recherche. 2h.mois technicien sur 3ans qui travailleront sur la modification du banc de mesures et sur le développement de maquettes de tests spécifiques au projet.

- *Missions*

Des frais de missions sont prévus pour les réunions de suivi de projet, pour les séjours du doctorant dans le laboratoire partenaire et pour la participation à des conférences nationales et internationales.

Budget : 12 k€

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Acquisition de petits matériels (câbles, composants, matériaux, ...) pour le développement des maquettes et la modification des bancs de mesures (banc de mesures en champ proche notamment). Acquisition d'ouvrage et de publications.

Budget : 5 k€

## 6.2. PARTENAIRE 2 : AMPÈRE

- *Équipement*

Aucune demande d'équipement n'est faite, les équipements disponibles au laboratoire permettent de mener à bien les tâches où Ampère est impliqué.

- *Personnel*

Deux types de financement en personnel sont demandés :

-le financement d'une thèse complète consacrée à la tâche 5.1. Il n'y a pas actuellement d'autres financements ou de bourse prévus sur cette action. Coût annuel : 34k€/an

-le financement d'un post-doctorant consacré à la tâche 5.2. Il n'y a pas actuellement d'autres financements prévus sur cette action. Coût annuel : 45k€/an

- *Prestation de service externe*

Il est demandé un financement pour avoir accès à la plate forme logicielle globale développée par Dassault durant le projet O2M. Coût annuel : 50k€/an.

- *Missions*

Les frais de mission sont de deux ordres :

- Déplacements de 2 personnes entre les laboratoires partenaires pour les bilans d'avancement 3 fois par an,
- Déplacement et inscription de 1 personne en conférences nationale et internationale (2/an) ou financement d'articles de revue

Coût annuel : 4k€/an

- *Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne*

Pas de dépenses sur facturation interne.

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Ce poste concerne l'achat de petits équipements, de composants pour les prototypes, de renouvellement de licence de logiciels, de maintenance des équipements de métrologie :

- Achat de matériel, fongibles, achat de composants électroniques divers : environ 1,5k€/an,
  - Maintenance des logiciels de calcul (Comsol) : 1,5k€/an,
  - Maintenance des appareils de mesure (analyseur d'impédance et récepteur CEM) : environ 3k€/an,
  - Petit matériel fongible : 0,7k€/an.
- Coût annuel : 6700€/an.

### 6.3. PARTENAIRE 3 : SATIE

- *Équipement*

Aucune demande d'équipement n'est faite, les équipements disponibles au laboratoire permettent de mener à bien les tâches où SATIE est impliqué.

- *Personnel*

Deux types de financement en personnel sont demandés :

-le financement d'un technicien de laboratoire pour accompagner la mise en place, le développement et l'assistance aux mesures sur les prototypes ; le besoin est estimé à 4 mois.homme par an. Nous sommes en effet obligés de le financer sur contrat depuis que les moyens humains équivalents en titulaire n'ont pas été renouvelés. Le technicien, M. Rédouane Harici est actuellement déjà recruté au laboratoire. Coût annuel : 10k€/an

-le financement d'une thèse complète consacrée à la tâche 3.1. Il n'y a pas actuellement d'autres financements ou de bourse prévue sur cette action. Coût annuel : 34k€/an

- *Prestation de service externe*

Le développement des parties mécaniques des prototypes d'actionneurs ou de parties d'actionneurs sera sous-traité durant les deux premières années du projet. Coût total : 30k€.

- *Missions*

Les frais de mission sont de deux ordres :

- Déplacements de 2 personnes entre les laboratoires partenaires pour les bilans d'avancement 3 fois par an,
- Déplacement et inscription de 1 personne en conférences nationale et internationale (2/an) ou financement d'articles de revue

Coût annuel : 4k€/an

- *Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne*

Pas de dépenses sur facturation interne.

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Ce poste concerne l'achat de petits équipements, de composants pour les prototypes, de renouvellement de licence de logiciels, de maintenance des équipements de métrologie :

- Achat de matériel, fongibles, achat de composants électroniques divers : environ 1,5k€/an,
  - Maintenance des logiciels de calcul, 1,5k€/an,
  - Maintenance des appareils de mesure (analyseur d'impédance et de spectre, analyseur de signal Tektronix ) : environ 1,5k€/an,
  - Location d'instruments de mesure (Présélecteur pour analyseur de spectre AGILENT) : environ 1,5k€/an,
  - Petit matériel fongible : 0,7k€/an.
- Coût annuel : 6700€/an.

#### 6.4. PARTENAIRE 4 : G2ELAB

- *Équipement*

Aucune demande d'équipement lourd n'est faite, les équipements disponibles au laboratoire permettent de mener à bien les tâches la laboratoire est impliqué.

- *Personnel*

Deux types de financement en personnel sont demandés :

- le financement d'une thèse complète consacrée à la tâche 2. Il n'y a pas actuellement d'autres financements ou de bourse prévue sur cette action. Coût annuel : 31.4 k€/an (sur 3 ans)
- le financement d'un post-doctorant consacré à la tâche 4.1. Coût annuel : 52.2 k€ /an (sur 1 an)

- *Prestation de service externe*

Aucune prestation de service externe n'est prévue pour le G2ELab.

- *Missions*

Les frais de mission sont de deux ordres :

- Déplacements de 2 personnes entre les laboratoires partenaires pour les bilans d'avancement 3 fois par an,
- Déplacement et inscription de 1 personne en conférences nationale et internationale (1/an) ou financement d'articles de revue

Coût : 7k€ sur la durée du projet

- *Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne*

Pas de dépenses sur facturation interne.

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Ce poste concerne l'achat de petits équipements, de composants pour les prototypes, et d'équipements de métrologie légers ne pouvant être considéré comme de l'équipement (moins de 4k€ par unité).

- RSIL, analyseur de spectre, cartes d'acquisition : 13 k€
- Petit matériel fongible : 2k€

## 6.5. PARTENAIRE 5 : CEDRAT

- *Équipement*

Aucune demande d'équipement n'est faite, les équipements disponibles à CEDRAT permettent de mener à bien les tâches où CEDRAT est impliqué.

- *Personnel*

CEDRAT utilisera son personnel permanent pour le projet.

- *Prestation de service externe*

Pas de dépenses sur les prestations de service externe.

- *Missions*

Les frais de mission sont de deux ordres :

- Déplacements de 2 personnes entre les laboratoires partenaires pour les bilans d'avancement 3 fois par an,

Coût total sur 3 ans : 8k€

- *Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne*

Pas de dépenses sur facturation interne.

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Pas de dépenses sur les autres dépenses de fonctionnement.

## 6.6. PARTENAIRE 6 : RENAULT

- *Équipement*

Aucune demande d'équipement n'est faite, les équipements disponibles chez Renault permettent de mener à bien les tâches où Renault est impliqué.

- *Personnel*

Renault utilisera son personnel permanent pour le projet.

- *Prestation de service externe*

Pas de dépenses sur les prestations de service externe.

- *Missions*

Déplacements de 1 personne entre les laboratoires partenaires pour les bilans d'avancement 3 fois par an.

Coût total sur 3 ans : 4k€

- *Dépenses justifiées sur une procédure de facturation interne*

Pas de dépenses sur facturation interne.

- *Autres dépenses de fonctionnement*

Pas de dépenses sur les autres dépenses de fonctionnement.

## 6.7. PARTENAIRE 7 : VALEO

## 7. ANNEXES

### 7.1. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES / REFERENCES

- [Baisden09] Thèse de Doctorat de C.Baisden, CPES, USA, Generalized Terminal Modeling of Electro-Magnetic Interference (Ph.D. Dissertation: Andrew Carson Baisden, November 2009).
- [Benh08] J. Ben Hadj Slama, O. Maurice, D. Baudry, A. Louis, B. Mazari, "Combining the moments method and the PEEC method with the KRON's transformation for studying embedded systems EMC", *International Review of Electric Engineering*, vol. 18, pp. 146-156, February 2008.
- [Cost05] F. Costa, C. Vollaie, R. Meuret, "Modelling of conducted Common Mode Perturbations in Variable Speed Drive Systems", *IEEE Trans. On. EMC*, November 2005, Vol. 47, n° 4, pp 1012-1021.
- [Costa05] F. Costa, D. Magnon, "Graphical Analysis of the Spectra of EMI Sources in Power Electronics", *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 20, no. 6, november 2005
- [Fern009] P. Fernandez Lopez, C. Arcambal, Y. Vives Gilabert, A. Ramanujan, D. Baudry, A. Louis, B. Mazari, "Development of a magnetic field model and insertion into a commercial electromagnetic simulator", *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, Vol.17, No.3, October 2009.
- [FernN09] P. Fernandez Lopez, C. Arcambal, D. Baudry, S. Verdeyme, B. Mazari, "Radiation Modeling and Electromagnetic Simulation of an Active Circuit", in *Proc. EMC Compo 09*, Toulouse, November 2009.
- [Floc09] Y. Le Floch, D. Baudry, F. Duval, M. Bensetti, C. Gautier, B. Revol, J. Ben Hadj Slama, C. Vollaie, E. Clavel, "Modélisation et simulation de composants électroniques pour les systèmes mécatroniques", in *Proc. ITT'09*, Paris, France, October 2009.
- [Foissac09] Thèse de doctorat de Mikael Foissac en cours - Mikael Foissac, Jean-Luc Schanen and Christian Vollaie, ""Black Box" EMC model for Power Electronics Converter", *IEEE ECCE'09*, sept 2009, San Jose, USA
- [Giov04] Giovanni Betta, *Senior Member*, *IEEE*, Domenico Capriglione, and Giuseppe Tomasso, "Evaluation of the Measurement Uncertainties in the Conducted Emissions From Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems", *IEEE Trans. On. Instr. And Meas.*, Vol. 53, n° 4, August 2004
- [Hoer65] C. Hoer, C. Love, "Exact Inductance Equations for Rectangular Conductors With Applications to More Complicated Geometries", *Journal of Research of the national Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation*, Vol. 69C, No 2, April-June 1965, pp. 127 – 137.
- [Jett09] C. Jettanassen, C. Vollaie, F. Costa, "Common Mode Emissions Measurements and Simulation in Variable-Speed Drive Systems", *IEEE trans. On Power Electronics Volume 24, n° 11, 2009, pp 2457 – 2464*
- [Labr10] D. Labrousse, B. Revol, F. Costa, X. Bunlon, " Estimation des emissions conduites de mode commun : vers une réduction de la durée d'analyse", in *Proc. CEM 2010*, Limoge, Avril 2010.

- [LeDuc09] Le Duc T., Chadebec O., Guichon J.-M., Meunier G., Lembeye Y., Delinchant B., "Numerical experimentations on the coupling between PEEC and volume integral method", Compumag 2009, Brésil
- [Lese09] C. Leseigneur, O. Kröning, P. Fernández López, M. Leone, D. Baudry, A. Louis, "Analytical analysis on transmission line coupling in non uniform field environment", in Proc. EMC Compo 09, Toulouse, November 2009.
- [Malk08] M. A. Malki, D. Baudry, M. Ramdani, " New tool for characterizations of electronic components radiated emissions under thermal constraints", in Proc. EMC Compo 09, Toulouse, November 2009
- [Popescu99] Thèse de Doctorat de R.Popescu, Université Joseph Fourier, Vers de nouvelles méthodes de prédiction des performances CEM dans les convertisseurs d'électronique de puissance, 1999
- [Revol03] Thèse de Doctorat de B.Revol, Université Joseph Fourier, Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse – machine asynchrone, 21 nov 2003
- [Rev04] B. Revol, J. Roudet, J.-L. Schanen, P. Loizelet, "EMI study of a three phase inverter-fed motor drives," proc. of IAS 2004. IEEE, Vol. 4, pp. 2657-2664, 3-7 Oct. 2004
- [Wang06] S.Wang, F.C.Lee and W.G.Odendaal, "Cancellation of capacitor parasitic parameters for noise reduction application", IEEE Transactions on power electronics, Vol.21, No.4, July 2006
- [Verm03] Ch. VERMAELEN, « Contribution à la modélisation et à la réduction des perturbations conduites dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable », thèse de l'ENS Cachan, 17 décembre 2003.
- [Voye08] Damien Voyer, François Musy, Laurent Nicolas et Ronan Perrussel, "impact of uncertainties in 2D hyperthermia using stochastic finite element methods", CEFC 2008, 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, CEFC 2008 , Grèce
- [Zang09] Sanâa Zangui, Christian Vollaire « approche pour la modélisation CEM en mode rayonné des éléments d'un filtre CEM », JCGE'09, 23 septembre 2009, Compiègne.

## 7.2. BIOGRAPHIES / CV, RESUME

---

**Christian VOLLAIRE**, 42 ans, Professeur des Universités à l'**Ecole Centrale de Lyon**, 63<sup>ème</sup> section.

**Recherche** : 1998-aujourd'hui : **AMPERE (ex CEGELY) UMR CNRS 5005**

Thème : interactions champs électromagnétiques – systèmes; équipe modélisation

Habilitation à Diriger des Recherches : soutenue le 25 mars 2005.

Titulaire de la PEDR Octobre 2004.

**Résumé des activités de recherche** : mes travaux concernent la compréhension, l'évaluation et la quantification de l'interaction volontaire ou non entre les champs électromagnétiques et les systèmes inertes ou vivants. En conséquence, mes recherches se déclinent suivant plusieurs axes complémentaires :

- Une activité générique de modélisation numérique des systèmes électromagnétiques (EF, EIF, domaine fréquentiel et temporel).
- Plusieurs domaines applicatifs : l'hyperthermie, le chauffage diélectrique, la CEM.
- Une activité innovante liée à la transmission d'énergie sans fil.

### **Activités d'encadrement et jurys de thèse**

- Encadrement de 8 DEA/Master recherche
- Encadrement de 9 thèses soutenues
- Encadrement de 6 thèses en cours à 50 %

### **Production scientifique**

- Revues internationales à comité de lecture : 32
  - Communications à des congrès internationaux à comité de lecture : 72 dont 5 invitées
  - Communications nationales : 4 dont 2 invitées
  - 1 Brevet (n° 2901061 en date du 16/11/07) "Convertisseur d'onde électromagnétique en tension continue" déposé par le CNRS et l'Ecole Centrale de Lyon
- F. Costa, C. Vollaire, R. Meuret, "Modelling of conducted Common Mode Perturbations in Variable Speed Drive Systems", IEEE Trans. On EMC, November 2005, Vol. 47, n° 4, pp 1012-1021.
- C. Vollaire, F. Musy, R. Perrussel, "Post Processing for the Vector Finite Element Method: Accurate Computing of Dual Field", IEEE Trans. On Magnetics, vol.42, n°4, april 2006, pp 819-822.
- X. Lucas Travassos Jr, D. A. G. Vieira, Nathan Ida, Christian Vollaire and Alain Nicolas, "Inverse Algorithms for the GPR Assessment of Concrete Structures", IEEE Trans. On Magnetics, Volume 44, n° 6, June 2008, pp 994 - 997
- C. Vollaire, F. Costa, "Caractéristiques et évolution du bruit électromagnétique dans les dispositifs d'alimentation embarqués sur aéronef", REE, dossier : le nouvel environnement EM, janvier 2009.
- C. Jettanassen, C. Vollaire, F. Costa, "Common Mode Emissions Measurements and Simulation in Variable-Speed Drive Systems", IEEE trans. On Power Electronics Volume 24, n° 11, 2009, pp 2457 - 2464.

**Nom :** COSTA  
**Prénoms :** François  
**Date de naissance :** 14 décembre 1958  
**Nationalité :** française  
**Situation familiale :** marié, 3 enfants

**Email :** [francois.costa@satie.ens-cachan.fr](mailto:francois.costa@satie.ens-cachan.fr)  
[francois.costa@creteil.iufm.fr](mailto:francois.costa@creteil.iufm.fr)

**Situation professionnelle** - Professeur des universités 1<sup>ème</sup> cl à l'IUFM de Créteil, **63<sup>ème</sup> section**, Laboratoire **SATIE**

- Directeur adjoint de l'IUFM de Créteil, chargé des enseignements technologiques et professionnels
- Responsable de l'équipe IPEM à SATIE UMR 8029, ENS Cachan, CNRS
- Président de l'Agrégation de Génie Electrique

**Formation :**

Habilitation à diriger des recherches (Université Paris-Sud Orsay) : 28 janvier 1998  
 Thèse de doctorat (Université Paris-Sud Orsay) : 01 avril 1992  
 Agrégé de Génie Electrique, promotion 1982, ancien élève de l'ENS Cachan

Titulaire de la PEDR depuis 2000, renouvelée en 2004 et 2008.

**Travaux de recherche**

Mes travaux s'inscrivent dans le thème de l'intégration en électronique de puissance dont l'objectif général est de concevoir des dispositifs à très forte densité volumique de puissance dont la thermique et la CEM sont contrôlés. Les applications sont actuellement fortes dans le domaine de l'automobile, de l'aéronautique et des objets nomades. Cela passe par la mise en œuvre d'architectures de convertisseurs statiques innovantes utilisant des matériaux variés (ferrite, céramiques ferroélectriques

ou piézoélectriques) et de développer de nouvelles technologies de fabrications collectives. Mon rôle actuel consiste à fédérer les activités de l'équipe IPEM vers ces objectifs.

### Publications

F. Costa, C. Voltaire, R. Meuret, "Modeling of Conducted Common Mode Perturbations in Variable-Speed Drive Systems", IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 47, N°. 4, november 2005, pp. 1012-1021.

F. Costa, A. Cunière, « Extension de la plage de fonctionnement à rendement élevé des alimentations à découpage », revue électronique en ligne J3EA, Edpsciences, en ligne la 16/09/2007,

O. Aouine, C. Labarre, F. Costa, « Measurement and modeling of the magnetic near field radiated by a BUCK chopper », IEEE transactions on Electromagnetic compatibility, pp. 445-449, Vol. 50 N°2, mai 2008.

C. Labarre, F. Costa, C. Gautier, "Wiener filtering applied to magnetic near-field scanning », Electromagnetics Research, PIER 96, pp.63-82, 2009.

Ch. Jettanasen, F. Costa, Ch. Voltaire, "Common-mode emissions measurement and simulation in variable drive systems », IEEE trans. On Power Electronics Volume 24, n° 11, 2009, pp 2457 - 2464.

---

**David BAUDRY**, 36 ans, Enseignant/Chercheur à l'**ESIGELEC/IRSEEM**, 63<sup>ème</sup> section.

### Principales responsabilités scientifiques et administratives :

- Responsable de la dominante Mécatronique & Génie Electrique de l'ESIGELEC
- Co-responsable du pôle Electronique & Systèmes de l'IRSEEM

### Thèmes de recherche développés :

- Techniques de mesures électromagnétiques en champ proche appliquées à la CEM.
- Caractérisation et modélisation de l'émission et de l'immunité rayonnée des cartes et composants.

### Activités d'encadrement et jurys de thèse

- Encadrement de 8 stagiaires de DEA/Master recherche/Ingénieur
- Encadrement de 2 thèses soutenues
- Encadrement partiel de 4 thèses en cours

### Principales publications :

- Revues internationales à comité de lecture : 9
- Communications à des congrès nationaux et internationaux à comité de lecture : 33

R. Brahimi, A. Kornaga, Z. Riah, M. Bensetti, D. Baudry, A. Louis, B. Mazari, "Post-processing of near-field measurement based on Neural Networks", IEEE Trans. Instr. Meas. Tec., Publication in progress.

P. Fernandez Lopez, C. Arcambal, Y. Vives Gilabert, A. Ramanujan, D. Baudry, A. Louis, B. Mazari, "Development of a magnetic field model and insertion into a commercial electromagnetic simulator", Turk J Elec Eng & Comp Sci, Vol.17, No.3, October 2009.

D. Baudry, M. Kadi, Z. Riah, C. Arcambal, Y. Vives-Gilabert, A. Louis, B. Mazari, "Plane wave spectrum theory applied to near-field measurements for EMC investigations", IET Science, Measurement & Technology, vol. 3, Issue 1, p. 72-83, January 2009.

D. Baudry, C. Arcambal, A. Louis, B. Mazari and P. Eudeline, "Applications of the Near-Field Techniques in EMC Investigations", IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 49, no. 3, pp. 485-493, August 2007.

B. Essakhi, D. Baudry, O. Maurice, A. Louis, L. Pichon and B. Mazari, "Characterization of radiated emissions from power electronic devices: synthesis of an equivalent model from near-field measurement", in Eur. Phys. J. Appl. Phys., vol. 38, pp. 275-281, June 2007.

---

**Olivier CHADEBEC**, 36 ans, chargé de recherche CNRS 1ère classe au G2ELab

**Recherche** : 2003-aujourd'hui **G2ELab UMR CNRS 5269**

Membre de l'Equipe MAGE (Modèles, Méthodes et Méthodologies Appliquées au Génie Electrique)

Membre élu du conseil scientifique de Grenoble-INP

**Résumé des activités de recherche** : Mes principaux sujets d'intérêt sont les méthodes numériques de calcul de champs électromagnétiques basse fréquences (méthodes intégrales, méthode des moments, méthode éléments finis), la théorie des problèmes inverses ainsi que la mesure des champs magnétiques faibles

**Activités d'encadrement et jurys de thèse**

- Encadrement de 10 DEA/Master recherche
- Encadrement de 7 thèses soutenues
- Encadrement de 6 thèses en cours

**Production scientifique**

- Revues internationales à comité de lecture : 33
- Communications à des congrès internationaux à comité de lecture : 80 dont 5 invitées
- 3 Brevets

T-A. PHUNG, P. LABIE, O. CHADEBEC, Y. LE FLOCH, G. MEUNIER, "On the Use of Automatic Cuts Algorithm for  $T_0 - T - \Phi$  Formulation in Nondestructive Testing by Eddy Current", Studies in Computational Intelligence, Intelligent Computer Techniques in Applied Electromagnetics, Volume 119, Springer, July 2008, pp 55-62

A. GUIBERT, O. CHADEBEC, J-L. COULOMB, "Ships Hull Corrosion Diagnosis from Close Measurements of Electric Potential in the Water", IEEE transactions on magnetics, Vol: 45, No. 3, March 2009, pp 1828-1831

A. MSAED, O. CHADEBEC, J. DELAMARE, "A simple and accurate magnetic gradient sensor configuration dedicated to electrical currents measurements", Sensors Letters, Vol. 7, No. 3, August 2009, pp 497-502

B.VINCENT, O.CHADEBEC, JL.SCHANEN, C. A. F. SARTORI AND L. KRAHENBÜHL  
"New robust coil sensors for near field characterization", Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 8, No. 1, June 2009

B. DELINCHANT, H.L. RAKOTOARISON, V.ARDON, O. CHADEBEC, O. CUGAT, "Gradient based optimization of semi-numerical models with symbolic sensitivity: Application to a simple ferromagnetic MEMS switch device", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Volume 30, Number 3-4, 2009, pp 189-200

---

**Xavier BUNLON**, 32 ans, 1 enfant

Ingénieur de recherche chez Renault, spécialiste en simulation électromagnétique CEM et antennes

Formation : ingénieur Supélec 2001 option radiocommunications

Thèse de doctorat (Université Toulouse Paul Sabatier, contrat CIFRE Renault-ONERA), soutenue le 29 septembre 2004

En poste chez Renault dans le PUCE CEM-RF de 2005 à 2010. Principales activités : mise en place des outils et méthodologies de modélisation CEM système sur véhicule automobile (calcul 3D,

couplages champ à câbles, antennes imprimées sur verre, systèmes de puissance, étude des essais unitaires sur table) études sur les essais en CRBM, sur les antennes de systèmes radar embarqués, sur les systèmes de transmissions sans-fil pour communications entre véhicules, co-encadrement de contrats CIFRE (1 thèse soutenue et 2 en cours), intervenant dans des formations universitaires (ESIEE, Master SDI à l'Université Pierre&Marie Curie).

**7.3. IMPLICATION DES PARTENAIRES DANS D'AUTRES CONTRATS**

**(un tableau par partenaire)**

*Mentionner ici les projets en cours d'évaluation portant sur le même sujet de recherche, soit au sein de programmes de l'ANR, soit auprès d'organismes, de fondations, à l'Union Européenne, etc. que ce soit comme coordinateur ou comme partenaire. Pour chacun, donner le nom de l'appel à projets, le titre du projet et le nom du coordinateur.*

Partenaire	Source de financement	Intitulé de l'appel à projets	Titre du projet	Nom du partenaire coordinateur	Montant demandé	Date début & Date fin
N°						
N°						