

**Les automobiles embarquent de plus en plus de systèmes électroniques, or les constructeurs doivent obtenir pour tous leurs modèles une certification de Compatibilité Electromagnétique. Si les mesures expérimentales constituent la référence en matière de certification, la simulation numérique CEM peut prendre une place majeure dans le cycle de développement industriel. Pour cela, elle doit prouver sa fiabilité et ses capacités prédictives.**

# Simulation électromagnétique : l'expérience d'ESI Group

*Par Jean-Claude Kedzia, Responsable du Centre d'Excellence CEM d'ESI Group*



**Laguna II sous le simulateur d'impulsions électromagnétiques de Gramat.**

Initiées dans les années 80 sur la base de technologies aéronautiques, les solutions PAM-CEM mises au point par ESI Group proposent une alternative numérique à l'analyse purement expérimentale des problèmes de Compatibilité Electromagnétique. Domaine aéronautique ou spatial, transport automobile ou ferroviaire, industrie de la défense, de l'électronique ou des télécommunications, tous les secteurs sont concernés.

Par le biais de partenariats industriels (BMW, Robert Bosch, Alstom Transport, France Télécom, Boeing, Mitsubishi Electric, Renault, etc.), à l'occasion de collaborations internationales (les projets AutoEMC ou EMC Safe Design) ou françaises (le projet Amelet), cette plate-forme a fait l'objet d'améliorations constantes pour adresser les problèmes CEM majeurs rencontrés dans l'industrie au sein même des processus de conception.

Ces travaux sont illustrés dans un secteur tout à fait typique : l'industrie automobile.

## La CEM dans l'automobile

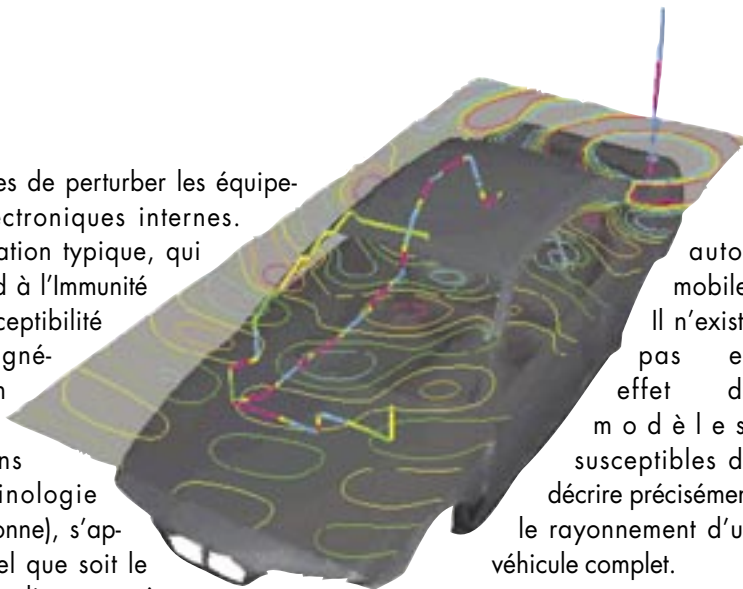
Depuis la mise en application des réglementations CEM internationales dans l'industrie automobile, tous les véhicules commerciaux doivent résister aux agressions électromagnétiques

susceptibles de perturber les équipements électroniques internes. Cette situation typique, qui correspond à l'Immunité ou la Susceptibilité Electromagnétique d'un véhicule (EMS dans la terminologie anglo-saxonne), s'applique quel que soit le modèle (berline, coupé ou

break) et pour toutes les options ! Avec les variantes ainsi obtenues (plusieurs milliers), cette diversité se solde par une certification CEM particulièrement délicate, voire critique lorsque l'on considère la disponibilité limitée des prototypes et leur nombre en constante réduction. Lors de la sélection des modèles, le choix est essentiellement basé sur le savoir-faire des experts CEM et des marges de sécurité importantes sont habituellement prises, qu'il s'agisse de rayonnement ou d'immunité, de mesures sur table appliquées aux seuls composants ou de tests sur véhicules entièrement équipés. Malgré les coûts qui en résultent, il est hors de question de supprimer ces marges de sécurité supplémentaires, car l'objectif demeure une certification CEM définitive.

Dans ce domaine, l'objectif de la simulation numérique ne réside pas seulement dans la compréhension de phénomènes électromagnétiques particulièrement complexes, mais également dans la réduction de ces marges de sécurité et des coûts associés. Quoi qu'il en soit, ces outils de simulation doivent démontrer au préalable leurs qualités de prédictibilité, de précision, de convivialité et de souplesse d'utilisation, autant de critères nécessaires à un déploiement industriel réussi.

**Ndlr.** Jusqu'à maintenant, la simulation CEM ne permet que de simuler l'immunité électromagnétique d'une



Rayonnement d'une antenne vers le câblage d'un véhicule (projet AutoEMC).

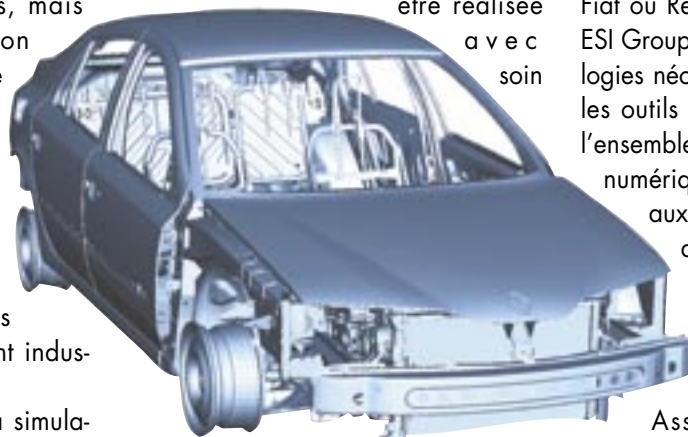
auto-mobilité.

Il n'existe pas en effet de modèles susceptibles de décrire précisément le rayonnement d'un véhicule complet.

## AutoEMC et la spécification du besoin

Quelle que soit la discipline envisagée, l'intégration de la simulation numérique dans les processus de développement des véhicules automobiles impose d'accorder une attention particulière aux traitements des données et aux aspects de souplesse d'utilisation des logiciels. Dans le domaine de la simulation des phénomènes qui relèvent de la Compatibilité Electromagnétique, cette caractéristique est particulièrement importante dans la mesure où de multiples contributeurs doivent être soigneusement pris en compte pour garantir la pertinence d'un modèle. Au-delà des phénomènes de propagation des ondes électromagnétiques et de diffraction par les structures, la modélisation des réseaux câblés doit être réalisée

avec soin

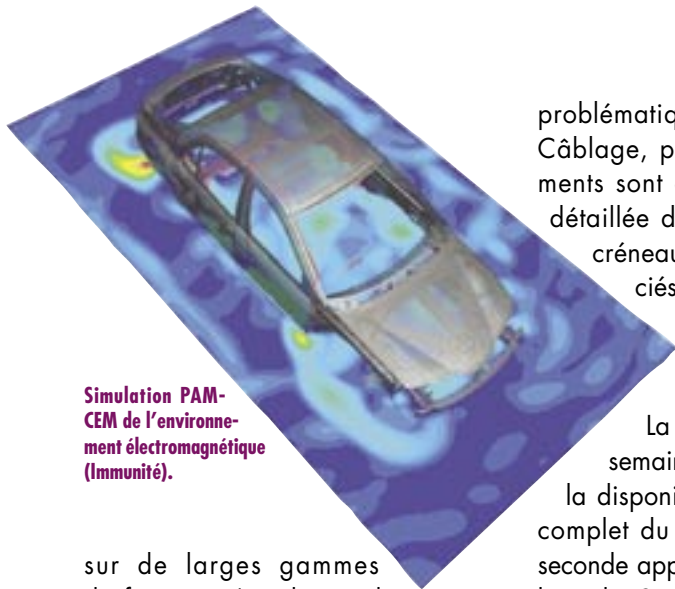


Assemblage PAM-CEM d'un véhicule Laguna II de pré-série.

dans la mesure où ils se comportent, selon le cas, comme autant de dispositifs favorisant la réception ou l'émission des perturbations. De la même façon, la caractérisation des équipements électroniques s'avère déterminante puisqu'ils constituent les victimes potentielles ou, à l'inverse, l'origine de ces interférences. Dans le secteur automobile, avec l'intégration d'équipements électroniques toujours plus nombreux dans un espace relativement confiné, cette situation est particulièrement critique. Plusieurs centaines de câbles, dont le rayon n'excède pas le millimètre, sont ainsi associées au sein de faisceaux très complexes qui cheminent dans un véhicule dont la taille s'évalue à quelques mètres. Ces considérations conduisent assez naturellement à une approche conceptuelle de la simulation. Des formalismes adaptés à la propagation des ondes doivent ainsi être associés à des outils spécialisés dans les réseaux câblés avec la garantie d'une prise en compte réaliste des calculateurs de bord.

Dans la perspective d'une intégration future au sein des processus de développement des véhicules industriels, cette approche a été initiée à l'occasion du projet AutoEMC. Soutenu par la Communauté Européenne et réunissant des acteurs importants du secteur automobile, tels que BMW, Fiat ou Renault, ce travail a permis à ESI Group de développer les méthodologies nécessaires, de mettre à niveau les outils de simulation et de valider l'ensemble pour offrir une plate-forme numérique susceptible de répondre aux besoins industriels. Au-delà de ce projet, de multiples collaborations ont permis d'en assurer l'industrialisation pour aboutir aux Solutions PAM-CEM.

Associant des formalismes temporels explicites (pour accéder à l'environnement électromagnétique



Simulation PAM-CEM de l'environnement électromagnétique (Immunité).

sur de larges gammes de fréquence) à des outils spécialisés dans la problématique « câblages » (en l'occurrence le logiciel Cripte développé par L'onera), les Solutions PAM-CEM permettent aux experts du secteur de mettre en œuvre en quelques jours toute la chaîne de calcul sur la base de données CAO standard. Le flux et l'échange de ces données d'un produit logiciel à l'autre ont été particulièrement soignés, notamment lors de la phase de couplage qui a fait l'objet de multiples validations comme à l'occasion de la démonstration de faisabilité réalisée en 2001 pour le compte de Renault.

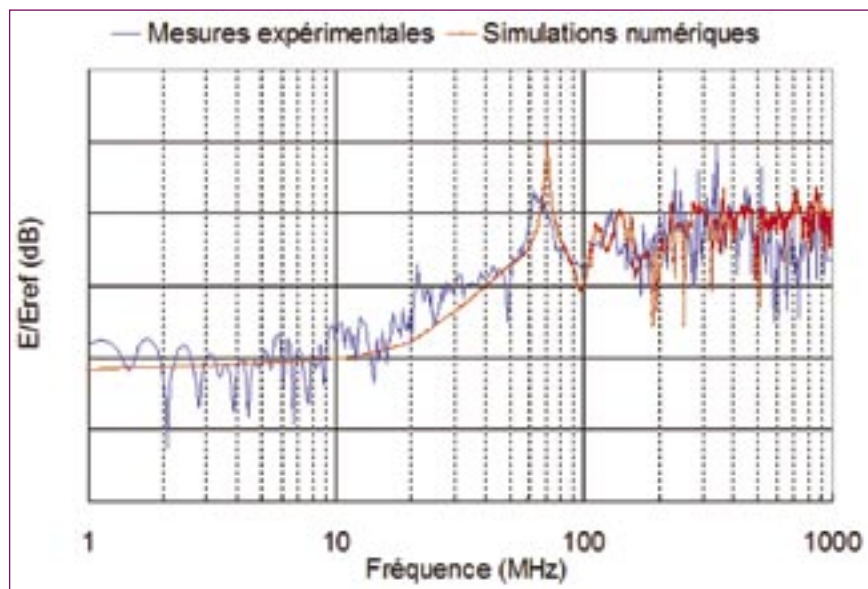
## 2001 : Démonstration de faisabilité

Le principal objectif de cette étude réalisée conjointement par les ingénieurs ESI France et les services Renault a été de démontrer la capacité des outils actuels de simulation numérique CEM à s'intégrer dans le cycle de développement des véhicules automobiles industriels. L'analyse s'est déroulée dans des conditions similaires à celles auxquelles sont confrontés les experts CEM : en aveugle, sans résultats de référence préalables, et avec des modèles entièrement équipés. Lors du cycle de développement des nouveaux véhicules, deux créneaux sont intimement associés à des

problématiques CEM : l'intégration Câblage, puis, lorsque les équipements sont définis, la spécification détaillée des faisceaux. Ces deux créneaux sont étroitement associés l'un à l'autre, mais n'apparaissent pas au même moment dans le cycle de développement.

La première phase, de cinq semaines environ, démarre dès la disponibilité d'un modèle CAO complet du véhicule, tandis que la seconde apparaît bien plus tard dans le cycle. Sa durée peut excéder deux mois, en fonction de la complexité des équipements électroniques implantés dans le véhicule. Ces délais ne s'appliquent pas à la seule simulation, mais à toute la phase de spécification CEM. Il ne s'agit pas simplement de réunir les données nécessaires, d'assurer la modélisation adéquate et de réaliser les calculs électromagnétiques avant

pondent à la totalité de cette phase. L'objectif consiste plus précisément à accéder aux résultats de simulation dans un délai d'une seule semaine. Pour l'équipe ESI France, le défi a consisté à appliquer les Solutions PAM-CEM dans un délai très limité (de l'ordre d'une à deux semaines) pour l'analyse d'un véhicule Laguna II complet soumis à une agression électromagnétique externe. La comparaison des résultats de simulation avec les mesures réalisées en parallèle sur le site de la Délégation Générale pour l'Armement situé à Gramat dans le Lot, a permis aux ingénieurs Renault d'évaluer la prédictivité de ces outils de simulation, de vérifier l'efficacité de la procédure proposée et d'en apprécier la précision. Conformément aux réglementations CEM applicables, cette analyse d'Immunité Electromagnétique a été effectuée sur une large gamme de fréquences qui



Mesures expérimentales et simulations PAM-CEM (champs rayonnés).

leur exploitation. Il s'agit également d'en faire l'expertise, d'engager le cas échéant quelques études paramétriques complémentaires, d'identifier les configurations critiques et finalement d'arrêter la décision finale. Pour la simulation, les délais à respecter ne s'évaluent pas aux cinq semaines évoquées précédemment, qui corres-

demarre au mégahertz pour atteindre le gigahertz. Tous les paramètres caractéristiques du processus ont fait l'objet d'une analyse très soignée pour identifier les points critiques susceptibles de conditionner le déploiement industriel ultérieur. Une attention particulière a été consacrée à deux points trop souvent négligés

dans les processus de simulation : l'exploitation des résultats et le transfert des données.

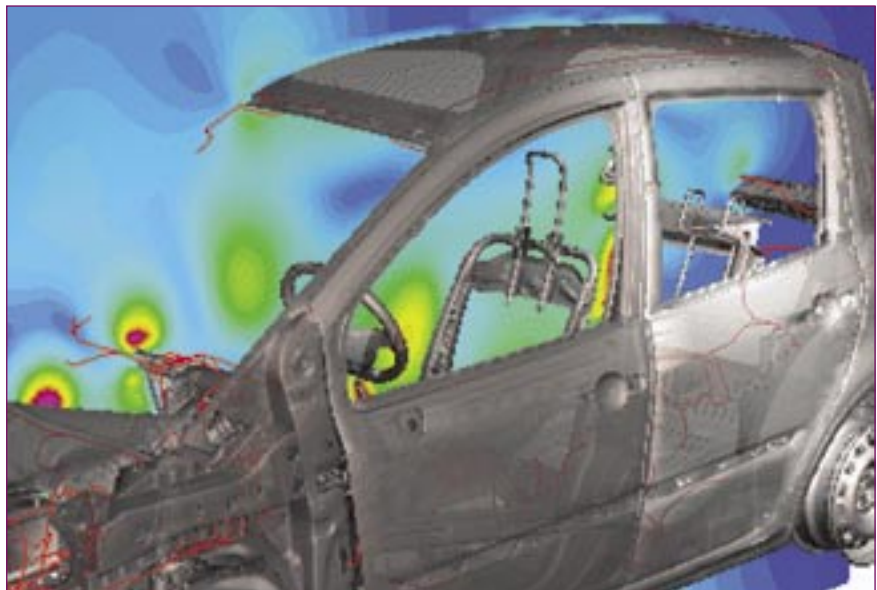
### • Analyse du processus industriel

En préalable à l'étude de faisabilité proprement dite, une analyse du processus industriel a été réalisée, axée principalement sur la nature et la disponibilité des données CAO pour les calculs électromagnétiques envisagés. Pour le véhicule considéré, il est ainsi apparu que deux systèmes CAO différents ont été utilisés. La manipulation directe des données natives se serait soldée par des délais incompatibles avec les objectifs fixés, en raison des multiples opérations qui en auraient résulté. La technique aux Différences Finies dans le Domaine Temporel (FDTD dans la terminologie anglo-saxonne) telle qu'appliquée au sein du produit logiciel PAM-CEM/FD sur la base d'un maillage cartésien structuré (cellules cubiques) s'est ainsi révélée particulièrement adaptée à la réalisation de ces simulations où le facteur « temps » est critique.

Si le produit PAM-CEM/FE dérivé d'un formalisme explicite aux Eléments Finis 3D s'applique également à ce type d'analyse, il impose que la géométrie soit définie de façon homogène avec des surfaces parfaitement connectées. Ce processus fait actuellement l'objet d'une évaluation complète, mais, pour cette étude de faisabilité, l'option PAM-CEM/FD s'est naturellement imposée dans la mesure où les données CAO d'origine ont été exploitées par le biais d'un format commun, en l'occurrence des triangulations STL (STéréo Lithographie) directement importées dans la solution.

### • Maquette CEM

Sur la base de ces considérations, les modèles PAM-CEM ont été assemblés pour les deux véhicules, caisse en blanc et pré-série (Figures 3). A titre indicatif, près de 60 fichiers ont



Déploiement industriel des Solutions PAM-CEM (MODUS).

ainsi été assemblés pour le véhicule de pré-série, ce qui représente plus de 2 millions de surfaces triangulaires, soit plus de 900 Mégaoctets de données. Si ce modèle s'avère bien trop détaillé, l'objectif de cette étude résidait dans la manipulation de données CAO industrielles en l'état, sans traitements particuliers imposés par les calculs électromagnétiques.

Sur la base d'une importation de données CAO similaire à la précédente, le cheminement des câblages au sein du véhicule a été spécifié pour y calculer le champ électrique associé. Ce cheminement au sein du véhicule est également exploité pour caractériser les paramètres de lignes du réseau. Une interface dédiée permet l'extraction directe, sans intervention particulière de l'opérateur, des paramètres de lignes qui caractérisent la propagation sur le réseau. Cependant, un contrôle du cheminement câblage reste indispensable pour éviter soigneusement toute interception avec la structure maillée qui peut différer très sensiblement de la géométrie d'origine.

La description complète du réseau câblé impose également l'exploitation de données spécialisées qui décrivent l'architecture électrique du réseau et notamment les connections entre éléments, la nature des câbles, leur

conductivité, ou leur résistance. Les seules données complémentaires que l'opérateur doit spécifier, correspondent à la localisation des câbles au sein des différents faisceaux. Pour des raisons essentiellement dues aux processus de fabrication de ces réseaux câblés, cette caractéristique reste délicate à spécifier de façon définitive car le torsadage éventuel de certaines lignes doit être associé à un positionnement aléatoire difficile à contrôler. Si des capacités de modélisation avancée sont actuellement proposées (voir Déploiement Industriel), des modèles simplifiés ont été retenus pour cette étude de faisabilité. En outre, tous les équipements terminaux ont été spécifiés sous la forme de charges 50 ohms classiques, en accord avec les conditions expérimentales.

### • Comparaison avec les mesures expérimentales

Afin d'apprécier la prédictibilité de la simulation, des mesures expérimentales ont été engagées par Renault en parallèle à l'étude de faisabilité. Elles ont été réalisées avec le simulateur d'impulsions électromagnétiques situé sur le site DGA (Délégation Générale pour l'Armement) de Gramat, dans le Lot. Si ce dispositif est effectivement

prévu pour générer une impulsion de type onde plane dans le spectre visé, la puissance rayonnée se révèle très importante dans la zone de test, et donc susceptible d'endommager les équipements électroniques embarqués. Pour réduire le signal exciteur, il s'est ainsi avéré nécessaire de positionner le véhicule dans des conditions qui ne correspondent pas à la configuration idéale. L'impédance d'onde présentait de multiples imperfections et le signal exciteur présentait également quelques faiblesses au-delà de 200 MHz.

Les résultats de mesure présentent de multiples oscillations parasites basse fréquence et quelques discontinuités peuvent être observées (21 ou 50 MHz par exemple). L'origine de ces anomalies réside dans le fait que le simulateur fonctionne en espace libre et s'avère ainsi sensible aux perturbations extérieures. Ces mesures expérimentales présentent en outre un faible rapport signal sur bruit au-delà de 200 MHz. En dépit des sources d'incertitude expérimentale et malgré les limitations dues à la procédure de

couplage, l'accord entre calculs et mesures s'est révélé tout à fait satisfaisant pour l'ensemble du spectre d'analyse, qu'il s'agisse des champs rayonnés dans l'habitacle, des courants de Mode Commun ou des tensions en extrémités de câblage.

## Les critères de succès pour un déploiement industriel réussi

A l'issue de cette étude et après démonstration définitive de la faisabilité de ce déploiement, un partenariat a été initié entre ESI Group et la société Renault pour améliorer les solutions PAM-CEM. Toutes les étapes du processus ont ainsi fait l'objet d'un examen approfondi pour en consolider l'efficacité. Ceci s'applique à la phase d'assemblage préalable (qui fait actuellement l'objet des développements Composer), à l'optimisation des étapes de maillage, de calculs électromagnétiques ou de transfert des données lors du couplage des deux

modules de calculs, environnement électromagnétique et courants induits sur câblages. Une attention particulière a également été consacrée aux données d'entrée relatives aux structures câblées, aspect critique lors de l'intégration de la solution dans le processus industriel. D'autres thèmes importants font actuellement l'objet de travaux de développements, comme par exemple l'application des techniques aux Eléments Finis 3D, l'effet de certains contributeurs importants tels que fentes ou ouvertures, ou d'autres champs d'applications potentielles comme les antennes.

## Aéronautique et Défense

Au-delà des applications automobiles abondamment décrites dans ce qui précède, des tendances similaires peuvent être observées dans d'autres secteurs de l'industrie, tels que l'aéronautique ou la défense par exemple. De multiples techniques de calcul sont désormais disponibles et définitivement validées : Lignes de Transmission, méthodes aux Différences ou aux Eléments Finis, Méthode des Moments, méthodes asymptotiques, Volumes Finis ou Eléments Finis 3D, etc. A ce stade, le besoin réside essentiellement dans des applications à grande échelle mettant en œuvre des modèles particulièrement réalistes pour de très larges gammes de fréquences.

Le savoir-faire accumulé dans le secteur du transport se révèle particulièrement utile dès lors que des modèles de très grande taille doivent être manipulés pour être ensuite analysés avec une grande précision. C'est précisément l'objet de l'environnement de pré-traitement, dont ESI Group a la charge au sein du consortium Thales, dans le cadre du projet de vulnérabilité Quercy réalisé pour le compte de la Délégation Générale pour l'Armement. ■

### Le projet Amelet

Avec la volonté claire de capitaliser le savoir-faire des partenaires, le projet Amelet propose un atelier de modélisation et de simulation numérique dédié à l'analyse des problèmes de CEM auxquels sont confrontés les industriels du secteur des transports, automobile et ferroviaire. Articulée sur une base de données unifiée (référentiel), cette plate-forme permet d'envisager de façon efficace et flexible la grande majorité des configurations typiques : Immunité ou Rayonnement Electromagnétique de véhicules entièrement équipés, émissions parasites d'équipements électroniques embarqués, interférences, intégration de dispositifs de radiocommunication. Quel que soit le scénario envisagé, une solution industrielle est proposée pour simuler les phénomènes électromagnétiques mis en jeu, au moyen d'outils logiciels intégrés au sein d'un environnement modulaire.

Sous la coordination de l'Onera, ce projet soutenu par le Ministère de la Recherche et de l'Espace réunit plusieurs partenaires majeurs du secteur, des éditeurs ou fournisseurs logiciels, des experts CEM et des centres de recherche. Informations complémentaires disponibles sur le site : [www.ecrin.asso.fr/pages/actions/cem.html](http://www.ecrin.asso.fr/pages/actions/cem.html).