Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 124 (1998)
Heft: 15/16

Artikel: Magie de l'induction électromagnétique simulée
Autor: Kaestli, Françoise
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79394

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Magie de l'induction électromagnétique simulée

Par
Françoise Kaestli,
rédactrice

A l'approche de la quarantaine, la société Amysa Yverdon SA *mise sur sa maîtrise du chauffage par induction pour s'offrir des projets en couleurs, les couleurs virtuelles dont la simulation numérique pare les machines pour le traitement thermique. Depuis plusieurs années, avec des spécialistes de l'EPFL, l'entreprise explore les mystères du chauffage par induction électromagnétique et sa propagation dans des pièces métalliques aux formes de plus en plus complexes. Afin de mieux comprendre ce phénomène, d'en maîtriser la précision et la reproductibilité, chercheurs et industriels ont joint leurs efforts et développé des modèles de simulation de l'induction. Cette collaboration a débouché sur l'élaboration d'un logiciel de simulation, commercialisé par la société* Calcom.

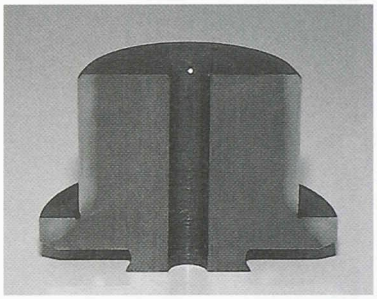


Fig. 1. – Pièce durcie par le procédé d'induction électromagnétique : ce profil d'axe a été chauffé par induction, puis trempé sur une machine AMYSA

Entre sous-traitance et machines propres

Dès sa création, *Amysa,* entreprise vouée à la sous-traitance mécanique, a exploité ses liens étroits avec certains clients pour développer une spécialité: la maîtrise du chauffage à induction. En réponse aux demandes de *BBC Baden*, cette société yverdonnoise a lancé ses propres machines destinées au traitement thermique de pièces. Si ce domaine de production a beaucoup varié en importance au cours du temps, il représente, en moyenne, la moitié du chiffre d'affaires. Cependant, depuis une dizaine d'années, *Amysa* cherche à conforter sa position sur le marché et se donne les moyens d'un développement technologique de pointe.

Dès 1989, l'activité dans le domaine de la sous-traitance a été renforcée grâce, surtout, au développement d'un partenariat étroit avec les donneurs d'ordres. La production de machines en nom propre, pour le chauffage à induction a également été intensifiée et soutenue par des actions promotionnelles, qui portent leurs fruits aujourd'hui. Actuellement, les machines de chauffage à induction deviennent un créneau stratégique de l'entreprise, avec 90 % des ventes réalisées à l'étranger (en Europe surtout) et cet axe est appelé à se renforcer dans le futur. L'organisation interne a, elle aussi, été revue du fait de la mise en conformité de la société à la norme ISO 9002 et de l'implantation d'un logiciel de gestion de production répondant tant aux exigences d'une production propre qu'à celles liée à la sous-traitance.

Forte de ses deux secteurs d'activité, *Amysa* sert une gamme étendue de clients. Dans le domaine de la co-traitance, elle fabrique surtout des pièces pour l'industrie électromécanique, l'agro-alimentaire, l'aéronautique et la machine-outil, ainsi que des engrenages spéciaux. Dans le secteur de l'induction, deux orientations se dessinent: les machines pour le traitement thermique et les machines pour le forgeage (chauffage des pièces avant leur passage sous une presse qui va leur imprimer leur forme définitive). Lorsque des composants industriels – surtout des pièces en acier telles que des engrenages, des axes et des cames –, ont besoin d'être renforcés pour résister à des frottements intenses (fig. 1), ils sont soumis à un traitement thermique, en cours de production. Ce dernier consiste, dans le cas d'un procédé de chauffage par induction, à élever la température de la pièce, jusqu'à environ 1200°C et à la refroidir brusquement (trempe). Ainsi, les modifications de structure provoquées par l'échauffement sont-elles «gelées», donnant à la pièce des propriétés de durcissement nouvelles.

Le traitement thermique des pièces s'effectue soit en surface (durcissement de surface, fig. 2) soit en profondeur (trempe à cœur). L'industrie automobile, la mécanique de précision, l'aviation, ainsi que les producteurs de pièces forgées représentent les principaux clients d'*Amysa* dans le domaine de l'induction.

La société produit aussi bien une gamme de machines universelles, capables d'accepter une grande diversité de pièces, que des équipements sur mesure destinés à des pièces uniques produites en grandes séries. Elle développe des solutions originales et s'efforce de collaborer avec ses clients dès la conception des pièces. Elle s'appuie, pour ce faire, sur une équipe de quelques nonante collaborateurs.

Gérer l'apport de chaleur

Le chauffage par induction est un procédé de traitement thermique souple et précis, par lequel de l'énergie est amenée sur des surfaces ou des volumes déterminés. La pièce métallique que l'on souhaite durcir est placée dans le champ alternatif d'une bobine. Le procédé d'induction consiste à transformer directement en chaleur l'énergie électrique générée par la bobine et circulant dans la pièce métallique à traiter. Les courants tourbillonnaires induits la pénètrent plus ou moins profondément en fonction de la fréquence du champ électromagnétique appliqué, de la forme de l'objet et de sa composition. En refroidissant

Fig. 2. – Chauffage en surface d'une tête de forage. Les temps de chauffe sont d'environ 20 secondes, avec un courant de plusieurs milliers d'ampères

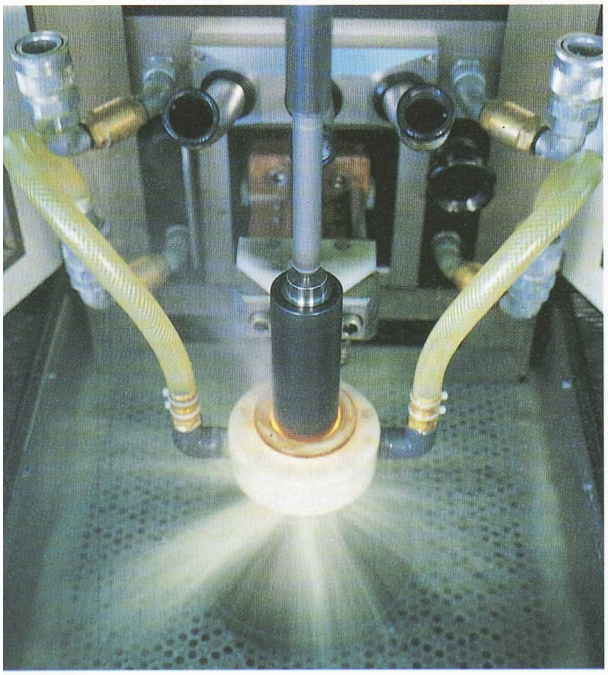


Fig. 3. – Trempe au défilé. L'inducteur (cylindre de cuivre) et le système de douche (en blanc) remontent le long de la pièce qui passe ainsi d'une température de 1200°C à la température ambiante, en 5 secondes.

rapidement la pièce, grâce à un système de douche (fig. 3), les zones chauffées durcissent. Une conception adéquate de la géométrie de la bobine génératrice va permettre de cibler spécifiquement les zones à chauffer et de diminuer les pertes énergétiques.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les puissances utilisées restent faibles, de l'ordre de plusieurs centaines de kilowatts, soit l'équivalent de la puissance du moteur d'une voiture de grosse cylindrée. En revanche, les courants utilisés atteignent plusieurs milliers d'ampères, durant quelques secondes. Le processus se décompose en deux temps: le chauffage de la pièce et son refroidissement, immédiatement après. Soit la pièce et l'inducteur restent fixes (trempe statique), soit l'un se déplace par rapport à l'autre (trempe au défilé). Les machines d'induction *Amysa* appliquent des fréquences comprises dans un spectre allant de 5 à 400 kHz. Les basses fréquences (5 à 10 kHz) sont utilisées pour la chauffe à coeur avant trempe ou forgeage. Les hautes fréquences permettent les traitements de surface.

On distingue, dans la machine à induction, trois parties principales: le générateur responsable de la production des champs électriques, la partie mécanique pour la manipulation de la pièce, ainsi que le déplacement des inducteurs et des douches de refroidissement (le positionnement de ces éléments doit se faire de manière extrêmement précise, ainsi que la partie automatisation pour le contrôle des différentes opérations (fig. 4).

Bien que basée sur des lois établies de l'électromagnétisme, la propagation de l'énergie dans la matière n'est pas complètement contrôlée. Le processus de chauffage garde un peu de la magie qui auréolait les forgerons des siècles précédents, alors que dans le même temps, les exigences de qualité des utilisateurs croissent. Reproductibilité du procédé, précision, réduction des tolérances sur les pièces, nouvelles contraintes de sécurité et de conformité électromagnétique imposées aux machines, sont les maîtres mots à l'heure actuelle.

Simuler pour maîtriser la complexité

Tant pour ses propres besoins de rationalisation, dès les phases de conception des machines, que pour répondre aux exigences des industriels, *Amysa* a senti la nécessité de renforcer sa compréhension des phénomènes électromagnétiques et de propagation dans les pièces, dont la composition évolue vers de nouveaux alliages métalliques, afin de pouvoir innover sur ses machines.

Au début des années 1990, l'entreprise s'est tournée vers l'EPFL. Au hasard d'une conférence, le président d'*Amysa*, fervent défenseur de la collaboration entreprises - écoles, rencontre Jacques Rappaz, professeur de mathématiques à l'EPFL, déjà passionné de phénomènes électromagnétiques, sur lesquels il travaille pour l'industrie de l'aluminium. Ce dernier est mis au défi de comprendre les phénomènes d'induction rencontrés par *Amysa*. Défi relevé car, de cette rencontre, naîtra une collaboration de plusieurs années conduisant à la modélisation des phénomènes d'induction et à leur visualisation sur un écran, supprimant ainsi une phase de tâton-

Fig. 4. – Machine modulaire pour le chauffage par induction. On distingue à gauche le corps de la machine et les inducteurs, à droite le générateur et la commande.

nement expérimental pour le dessin exact des bobines d'induction. Cet outil de simulation est, depuis peu de temps, intégré aux méthodes de conception d'*Amysa*. Grâce à la simplicité avec laquelle différentes configurations des machines peuvent être étudiées, avant leur fabrication, il raccourcit les délais de production et facilite la recherche de solutions techniquement irréprochables et économiquement avantageuses, ce notamment par un meilleur contrôle du paramètre de l'induction qui en détermine le coût: l'énergie consommée.

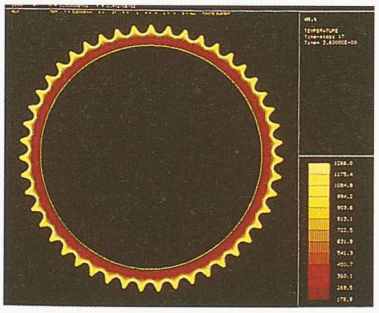


Fig. 5. – Modélisation en 2D des flux de température dans un engrenage

Collaboration Entreprise - Ecole - Etat

En France et aux Etats-Unis, des chercheurs s'intéressent à la simulation des courants électriques induits dans des pièces métalliques depuis quelques années déjà; cependant, aucune simulation numérique ne répondait aux exigences d'*Amysa* qui voulait, grâce à cette méthode, visualiser les phénomènes complexes qui se déroulent dans la pièce pour réaliser un dimensionnement précis de ses machines (plus particulièrement les inducteurs et le système de refroidissement) et prédire le comportement des pièces traitées. La multiplicité des paramètres entrant en jeu dans le chauffage à induction: géométrie, temps de chauffe, puissance, fréquence, en rend le réglage fort compliqué, d'autant plus que certains paramètres ne peuvent être variés sans nécessiter des modifications profondes sur les machines. Dans ce contexte, la simulation numérique est un outil précieux qui livre rapidement des solutions et permet l'optimisation de réglages qui, dans la réalité, ne seraient pas envisageables.

Dans une première phase, avec le soutien du NEFF (ancien Fonds national pour la recherche énergétique), une équipe de chercheurs, dirigée par Jacques Rappaz, s'est concentrée sur l'étude de pièces métalliques simples et a créé un modèle en une dimension. Celui-ci suffit largement à la modélisation de pièces axisymétriques simples, telles des pièces cylindriques à diamètre constant: barres, fils et lopins (fig. 5). Pour traiter des objets, symétriques toujours, mais dont le diamètre varie en fonction de la hauteur, le modèle a ensuite été étendu à la deuxième dimension (fig. 6). De cette phase, qui a duré de 1990 à 1993, est sorti un premier logiciel de calcul des courants électriques, testé avec succès par *Amysa*. Ce programme permet un gain de temps lors du test de nouveaux procédés.

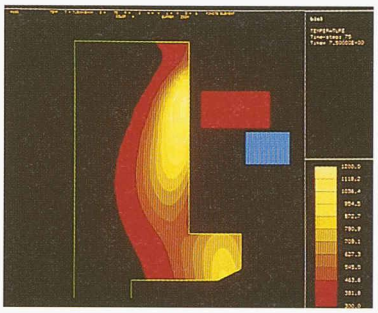


Fig. 6. – Simulation des flux de température dans un axe, au passage de l'inducteur puis de la douche (pièce montrée à la figure 1)

Tous les problèmes ne sont cependant pas résolus. Avec l'appui de la CTI (Commission pour la technologie et l'innovation), une deuxième étape est alors lancée, qui est consacrée à l'étude des problèmes plus spécifiques du comportement de l'acier lors de la trempe (refroidissement rapide après échauffement de l'alliage). Intéressées par ce nouveau projet, d'autres entreprises s'y joignent: *Bobst* et *Calcom*, tandis qu'un autre professeur de l'EPFL, Michel Rappaz, du laboratoire de métallurgie physique, en prend la tête. Cette étude, réalisée entre 1993 et 1995, débouche sur l'élaboration d'un modèle pour le calcul des microstructures de l'acier après trempe.

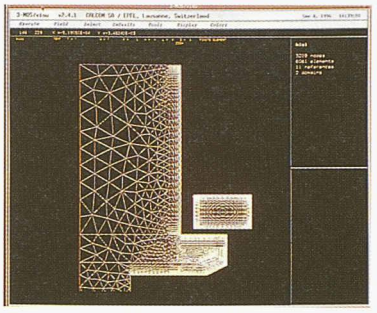


Fig. 7. – Maillage de la pièce. En surface, là où passent les courants induits, le maillage se densifie.

Manquait encore une modélisation en trois dimensions pour mieux appréhender les pièces de forme quelconque (une simple pince ne peut pas être simulée par les logiciels développés jusque là). Or le passage à une dimension supplémentaire pose une série de nouveaux problèmes: le modèle mathématique utilisé précédemment doit être revu et la simulation en 3D est nettement plus gourmande en temps de calcul. Une fois encore, l'EPFL, avec le mathématicien Jacques Rappaz, ainsi que la CTI interviennent de façon déterminante et un partenaire industriel supplémentaire, *Alusuisse-Lonza Services Ltd*, rejoint le projet. Quant à *Amysa*, sa priorité demeure la baisse de ses coûts de production et la réduction du coût d'exploitation chez les clients, avec une qualité constante des produits. Un logiciel de simulation en 3 D est cette fois créé, qui remplit toutes les fonctions escomptées.

Au cours des ces années de collaboration, *Amysa* s'est fortement impliquée dans la recherche. Ainsi,

Procédés applicables au durcissement de pièces en acier

Le chauffage par induction:

- Procédé: chauffage de pièces, sans contact, par pénétration d'un champ électromagnétique dans la pièce. La géométrie des inducteurs est adaptée à chaque cas; en modélisant la bobine génératrice de champs magnétiques, des zones très précises du matériau sont chauffées. Celles-ci sont ensuite brusquement refroidies.
- Applications: en métallurgie, pour la chauffe avant forgeage, le durcissement par trempage, le brasage, le moulage, mais aussi le scellage thermique, l'émaillage, la pose d'un revêtement ou encore le collage, en carrosserie
- Avantages: procédé souple, rapide (quelques secondes), précis, à haute productivité, occasionnant peu de pertes d'énergie
- Inconvénients: la pénétration du champ magnétique dans le matériau dépend de nombreux facteurs (forme et composition du matériau, puissance et fréquence du courant d'induction) et la complexité des paramètres en présence rend le phénomène difficile à maîtriser

Cémentation de pièces et trempe

- Procédé: passage des pièces dans un four, sous atmosphère de carbone contrôlée, puis refroidissement brusque
- Applications: traitement de pièces à surface complexe ou de lots de petites pièces (engrenages, cames, vis, lames, etc.)
- Avantage: l'épaisseur de la matière ajoutée est contrôlée très précisément
- Inconvénients: processus discontinu et long (plusieurs heures)

Chauffage au gaz et à la flamme

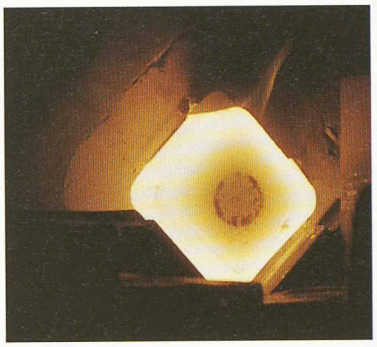
- Procédé: semblable à l'induction où la pièce est léchée par une flamme
- Applications: sur des pièces volumineuses qui nécessitent un apport, localisé et en surface, d'énergie
- Avantage: coût d'exploitation bas dans les pays disposant du gaz à bon marché (la Hollande l'utilise notamment)
- Inconvénients: procédé plus lent que l'induction

Laser pour trempe surfacique

- Procédé: balayage de la surface par un faisceau laser
- Applications: pièces à traiter sur une faible épaisseur, pièces de précision, zones d'accès difficile
- Avantage: agit sur une profondeur très faible selon un procédé très flexible, le faisceau laser pouvant être amené à l'endroit exact du traitement
- Inconvénients: mauvais rendement énergétique du laser

Laser et pulvérisation («cladding» en anglais)

- Procédé: (développé à l'EPFL) chauffage de la pièce par induction, puis ajout de matière sous forme de poudre (métal ou céramique)
- Applications: traitement de soupapes, pièces à haute valeur ajoutée
- Avantage: procédé précis, à haute productivité
- Inconvénients: surfaces de traitement limitées



dans la période de démarrage du projet, l'entreprise profite de l'infrastructure du parc scientifique d'Ecublens en y installant une antenne et engage un métallurgiste en la personne de Daniele Mari. Cette proximité avec les chercheurs favorise la prise en compte des problèmes concrets de la production et le transfert immédiat dans l'entreprise des résultats obtenus.

Grâce aux outils développés, *Amysa* s'est dotée de nouveaux atouts, tant commerciaux que techniques. En mesure de prédire les températures optimales de traitement d'une pièce, voire même les propriétés mécaniques de la pièce traitée par induction, les collaborateurs de l'entreprise offrent un service de conseil performant à la clientèle. *Amysa* augmente ainsi sa valeur ajoutée et la qualité de ses machines. «L'aide de la CTI a été déterminante dans ces projets» rappelle Daniele Mari, en effet, «pour une

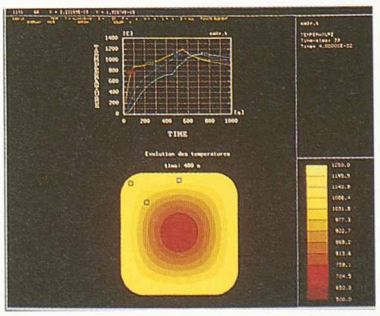


Fig. 8. – Pièce à forger de grande dimension: en haut, la pièce telle qu'elle est réellement chauffée, en bas, la simulation

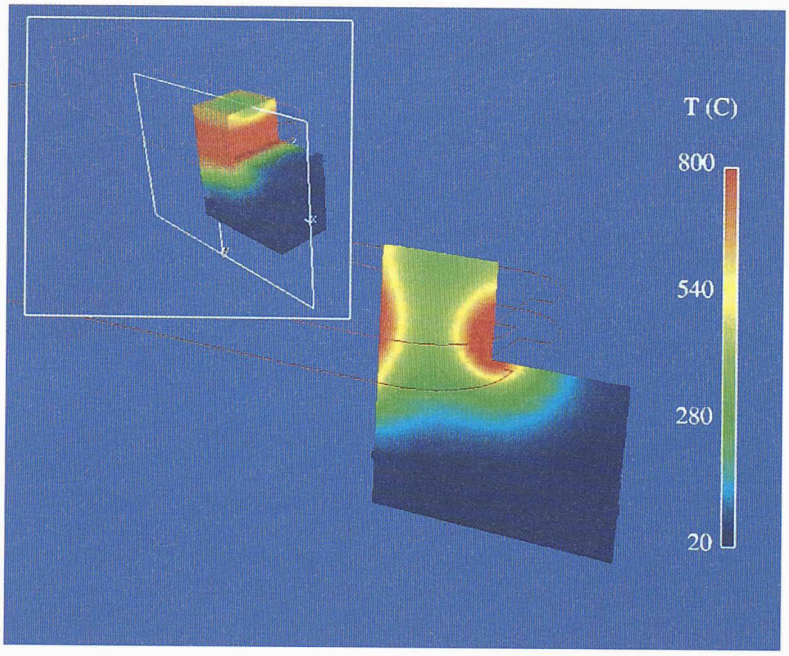


Fig. 9. – Simulation en 3 D : la pièce massive et une coupe montrant les températures à l'intérieur de la pièce

entreprise de moins de cent personnes, comme la nôtre, un tel effort de recherche et le support de tous les coûts de développement n'auraient pas été possibles». L'EPFL aussi retire des avantages du projet: d'une part un résultat concret et satisfaisant pour les partenaires industriels a été obtenu sous forme de logiciels, d'autre part, les études sur l'induction ont conduit à un certain nombre de résultats théoriques et se poursuivent dans le cadre de thèses de doctorat.

Un troisième partenaire, la société *Calcom* créée sur le site du parc scientifique d'Ecublens, a également bénéficié des retombées du projet puisqu'elle commercialise les logiciels et en assure maintenance et développement.

Base du modèle pour la simulation numérique

Un jeu complexe d'équations mathématiques a été développé. Les équations de Maxwell ont tout d'abord permis de calculer la pénétration de l'énergie en surface et à l'intérieur de la pièce, en tenant compte des conditions aux limites comme la radiation et la convection autour de la pièce. Puis il a fallu modéliser les phénomènes de conduction thermique dans la matière. Lors du passage de la douche de refroidissement, il faut ensuite évaluer l'extraction d'énergie par le milieu externe. Enfin, la géométrie de la pièce à traiter a été modélisée par le biais d'un réseau de mailles (méthode des éléments finis), maillage qui se densifie à la surface, là où passent les courants induits (fig. 7). A chaque étape de la modélisation, un contrôle rigoureux des résultats, par mesure expérimentale, a été réalisé. Grâce à des capteurs positionnés en de nombreux points de la pièce, l'évolution de la température, dans le temps et dans l'espace, a été comparée aux résultats théoriques. La concordance est excellente, sur des pièces à géométrie assez simple (fig. 8). Il est cependant prématuré d'affirmer que la simulation des phénomènes d'induction est totalement maîtrisée.

Afin de mieux capitaliser l'expérience accumulée durant de nombreuses années dans ce domaine par *Amysa*, une base de données a été constituée avec les essais simulés à ce jour. Cette source de références est destinée à renforcer le soutien au client par la proposition de solutions plus efficaces. Pour Daniele Mari, les développements effectués avec l'EPFL sont couronnés de succès et dans l'entreprise, les collaborateurs ont rapidement appris à se servir des nouveaux outils qu'on leur mettait à disposition. En s'appropriant les logiciels, notamment la dernière simulation en 3D (fig. 9), les collaborateurs dépassent les performances espérées: gains en temps de conception, offres plus complètes et solutions plus précises.

Référence

Rapport d'activité 1992-1995, CTI

Remerciements

Que M. Daniele Mari trouve ici l'expression de notre gratitude particulière pour son suivi attentif et ses conseils techniques.