

ABB

3 | 13

La revue
technologique
du Groupe ABB

review

Revue
ABB

Les mathématiques, as de la simulation 11

Disjoncteur ultrarapide ABB 27

La robotique au top 61

Résilience sismique 77



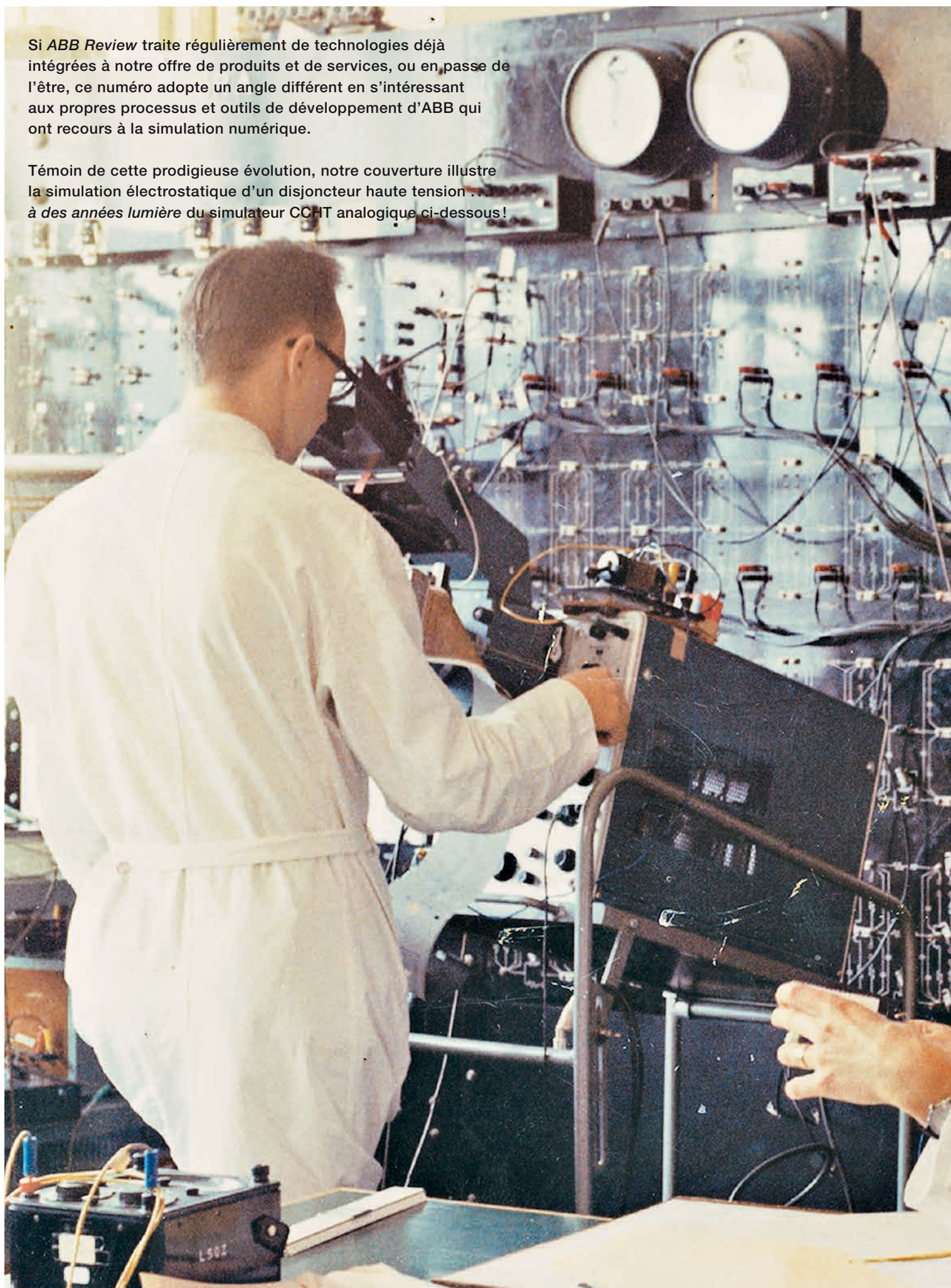
Simulation

Power and productivity
for a better world™



Si *ABB Review* traite régulièrement de technologies déjà intégrées à notre offre de produits et de services, ou en passe de l'être, ce numéro adopte un angle différent en s'intéressant aux propres processus et outils de développement d'ABB qui ont recours à la simulation numérique.

Témoin de cette prodigieuse évolution, notre couverture illustre la simulation électrostatique d'un disjoncteur haute tension... à des années lumière du simulateur CCHT analogique ci-dessous!



Simulation multiphysique

- 6 Réalité prédite**
Simuler pour un monde meilleur
- 11 Chaos bien ordonné**
Les mathématiques appliquées rationalisent produits et procédés industriels
- 16 Couplages multiples**
Simulation Toolbox optimise les propriétés diélectriques et thermiques du matériel électrique
- 22 Arrêt sur image**
La simulation numérique au programme de l'industrie

Énergie

- 27 Élan d'ouverture**
ABB simule un disjoncteur CCHT ultrarapide
- 34 Plus vite que l'éclair**
La simulation d'arcs électriques dans les disjoncteurs
- 39 Copie conforme**
Simulation électromagnétique des transformateurs
- 44 Projet phare**
Un partenariat pilote pour consolider les réseaux électriques du futur

Mouvement, pression et régulation

- 47 De la mesure en toutes choses**
La simulation système et multiphysique améliore la précision et la robustesse des capteurs de process
- 54 Avancée détonante**
Simuler la montée en pression dans les installations électriques
- 61 Du virtuel au réel**
Robotique et automatisation industrielles à l'ère du prototypage et de la mise en service virtuels
- 65 Génie intégré**
De nouveaux algorithmes de simulation pour une intégration accrue des convertisseurs électroniques de fréquence
- 72 Forme progressive**
Des polymères bien moulés grâce à la simulation numérique avancée
- 77 Performances de pointe**
La simulation numérique améliore les performances sismiques et vibroacoustiques des équipements électriques

Simuler pour mieux produire



Claes Ryttoft

Chers lecteurs,

La simulation numérique est de plus en plus indissociable du développement de produits. Chaque nouvelle génération surclassant la précédente en matière de complexité et d'optimisation, les ingénieurs ont tout à gagner d'une compréhension approfondie des phénomènes physiques qui limitent la performance. Or les essais ne suffisent pas, au regard des contraintes de délai et des réalités économiques du marché. En permettant la comparaison avec des variantes de conception ou l'exploration de nombreuses hypothèses, la simulation renforce la confiance dans la configuration choisie et garantit au client une solution optimale.

Pour autant, la plus fine des simulations a peu d'intérêt si sa marge de précision n'est pas bien comprise par le destinataire de l'information (qui n'a pas été déçu par des prévisions météo par trop optimistes ?). Tout en empruntant à un large éventail de domaines scientifiques, la simulation est devenue une discipline à part entière, avec son cortège d'interrogations : le modèle sous-jacent décrit-il convenablement le phénomène simulé ? Quelle finesse de maillage et de résolution temporelle assure des résultats suffisamment précis ? Jusqu'où pousser les simplifications ? Notons au passage que la fiabilité des simulations est aujourd'hui telle que des instances de normalisation, comme la CEI, en ont fait une alternative de test pour certains critères.

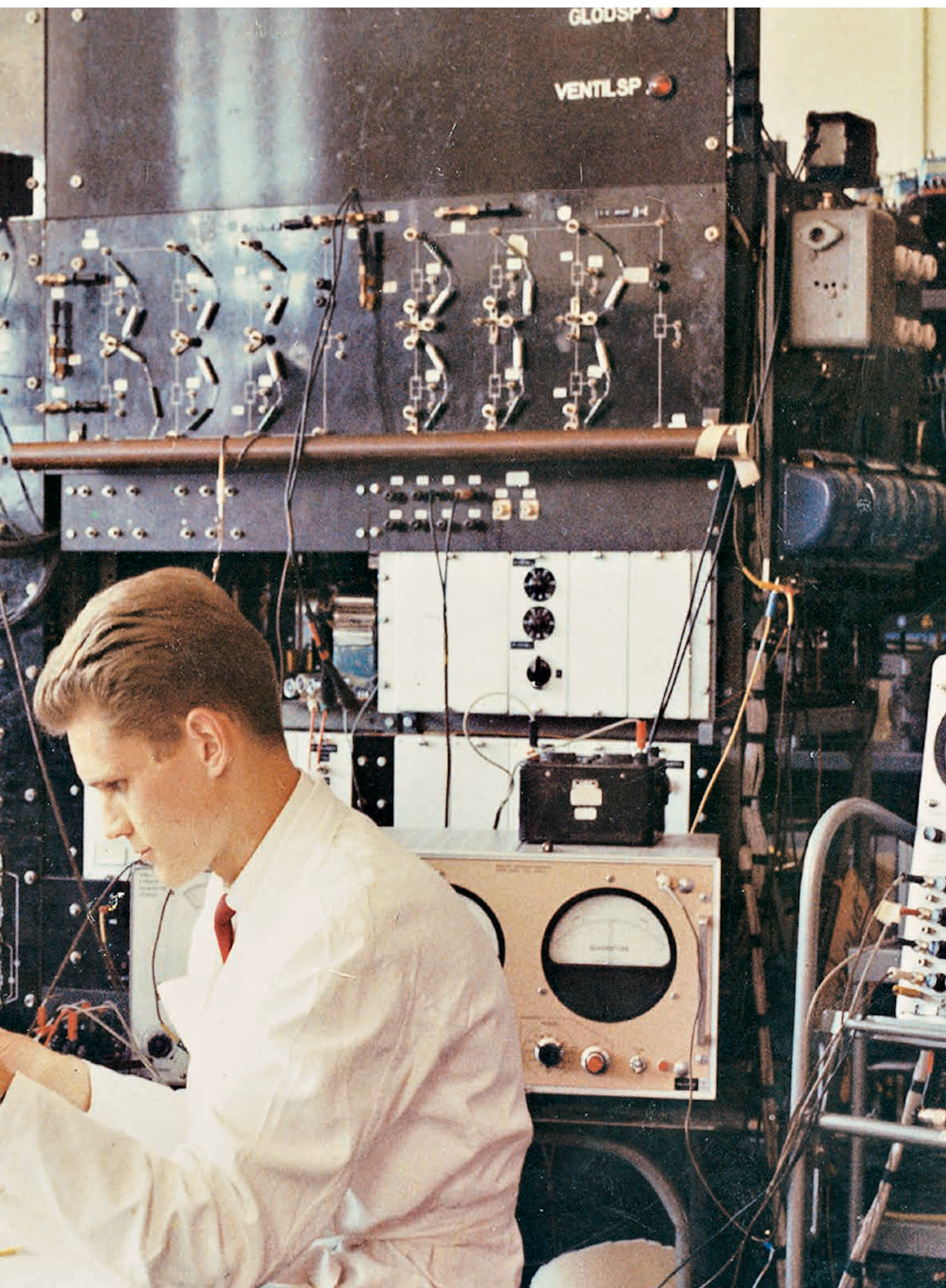
Un enjeu important de la discipline est l'interaction des différents phénomènes physiques, à savoir la simulation « multiphysique », comme l'électromagnétisme, la thermodynamique, la dynamique des fluides et la mécanique dans un disjoncteur, par exemple.

Ce numéro d'*ABB Review* embrasse une grande variété d'applications de simulation, des gros transformateurs aux composants électroniques embarqués, sur différentes échelles de temps : manœuvres ultrarapides du sectionneur, endurance des convertisseurs de puissance sur plusieurs décennies, subtile progression du moulage des résines époxydes et thermoplastiques, etc.

Et qui dit simulation, dit virtualisation et, de proche en proche, dématérialisation d'*ABB Review*. Le précédent numéro proposait à nos lecteurs d'être avertis par courriel des dernières parutions ; dans la foulée, nous vous annonçons en page 83 une version sur tablette.

Bonne lecture,

Claes Ryttoft
Directeur des technologies
Directeur général adjoint
du Groupe ABB

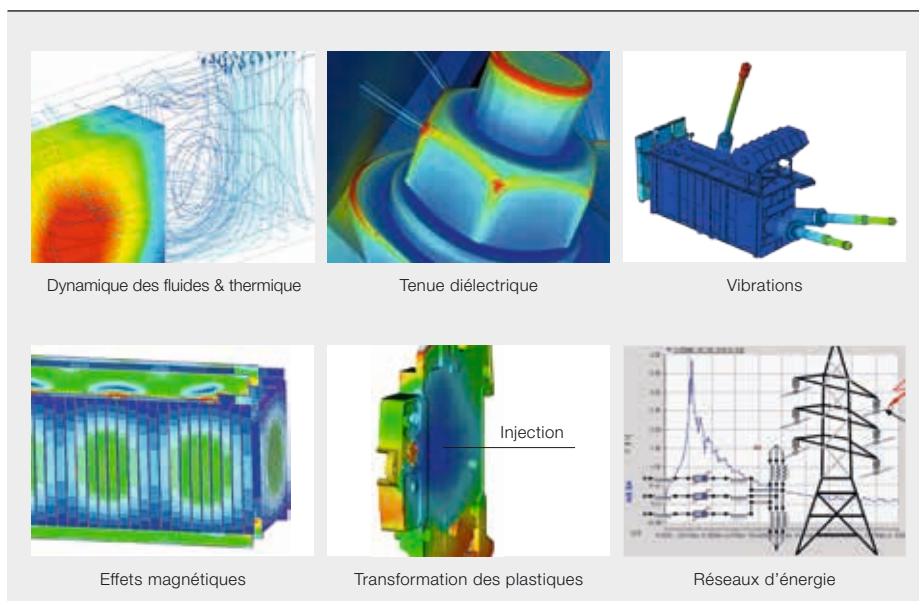




Réalité prédite

La simulation au service d'un monde meilleur

GEORG SCHETT, MAREK FLORKOWSKI, ARTHOUROS IORDANIDIS, PETER LOFGREN, PIOTR SAJ – La simulation numérique joue aujourd'hui un rôle central dans la recherche-développement (R&D). Les progrès, tant en termes de puissance informatique que de techniques de calcul, ne cessent de repousser les limites de sa précision et de son champ d'action, des analyses multiphysiques et études de systèmes aux procédés de fabrication et de production. La plupart des exemples applicatifs présentés dans ce numéro d'*ABB Review* concerne le calcul de la distribution spatio-temporelle de grandeurs électromagnétiques, fluidiques et thermiques. En voici quelques principes sous-jacents.



Le premier objectif d'une simulation est d'aider à comprendre les phénomènes à l'œuvre au sein d'un objet ou système physique réel pour en optimiser la conception → 1. La simulation se déroule selon un cycle immuable → 2 : tout commence par la mise en équations de l'objet réel (sa « modélisation ») et finit par la mise à profit des apports de la numérisation pour modifier et valider la conception.

Nombreuses sont les méthodes de simulation :

- avec maillage (discrétisation géométrique) ;
- sans maillage ;
- études des systèmes et réseaux ;
- analyses des procédés de production, etc.

Modélisation mathématique

La modélisation constitue la première étape d'une simulation numérique, au cours de laquelle le problème physique est traduit en équations mathématiques. La simulation ne permet de rendre compte que des phénomènes physiques

décrits par ces équations. Le défi de la modélisation mathématique est de trouver un compromis entre la complexité du système réel et la logique de développement nécessaire à la mise en œuvre du modèle dans la conception de produits. Parvenir à une description mathématique fidèle du phénomène étudié relève de la « physique théorique » (ou mathématique), discipline scientifique à la croisée de la physique et des mathématiques.

Prétraitement

La phase de prétraitement consiste en l'élaboration de la géométrie des simulations. C'est une étape de simplification qui vise, d'une part, à conserver les caractéristiques géométriques pertinentes et, d'autre part, à construire un maillage adéquat ; à la géométrie réelle se substitue donc une géométrie « maillée ». La réalisation d'un maillage de qualité est l'une des principales pierres d'achoppement de la simulation industrielle. En effet, les géométries réelles y sont généralement très complexes et difficilement descriptibles par un maillage numérique. En outre, si le maillage créé est de piètre qualité, la convergence simulation-réalité s'en trouvera vraisemblablement compromise ou conduira à des solutions physiquement inexactes.

Résolution

Les équations du modèle mathématique sont résolues numériquement sur le maillage. La méthode de discrétisation fait passer ces équations du domaine continu au domaine discontinu ou « discret ».

Chez ABB, les méthodes des éléments finis et des éléments de frontière sont couramment utilisées pour les calculs mécaniques et électromagnétiques, et celle des volumes finis, pour les calculs CFD de dynamique des fluides. Pour autant, de nombreux outils du commerce et scientifiques, basés sur d'autres méthodes de discrétisation, y ont également cours. Tout comme il est fréquent de voir des grands groupes industriels tels qu'ABB développer leurs propres méthodes de calcul numérique et solveurs¹, adaptés à leurs besoins.

Post-traitement

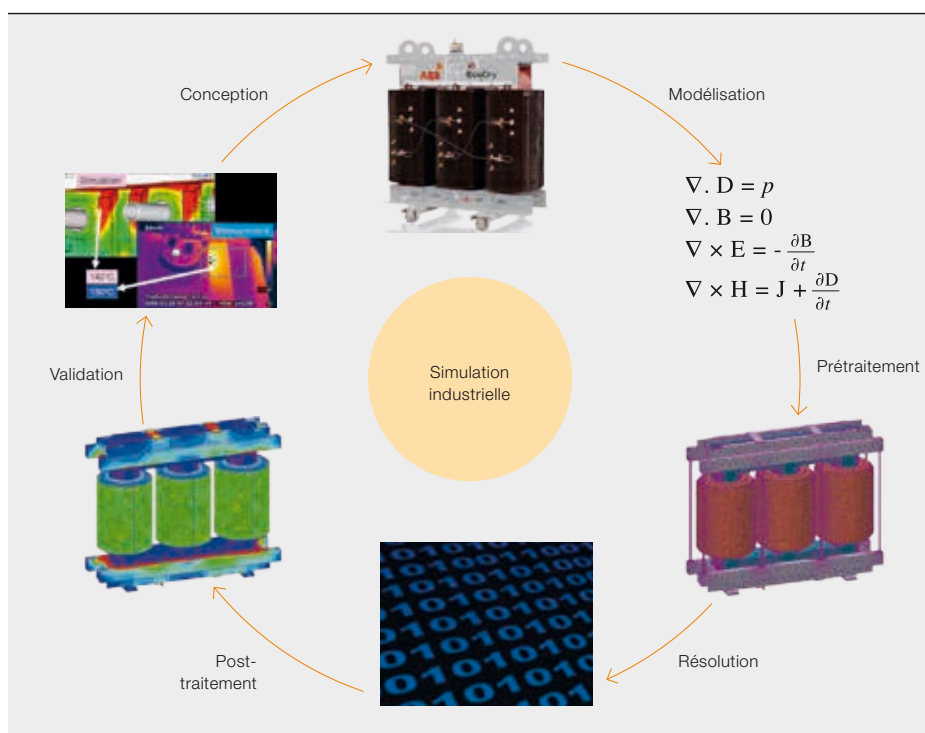
Partie intégrante du processus de simulation, la phase de post-traitement consiste en la visualisation des résultats, habituellement sous la forme de contours 2D ou 3D illustrant la distribution de la grandeur physique calculée. Le comportement dynamique de l'objet ou du processus simulé peut être visualisé à l'aide d'animations. Cette représentation spatio-temporelle facilite et agrmente l'analyse des phénomènes physiques complexes intervenant dans les dispositifs réels. Toutefois, outre la visualisation de champs, les représentations de grandeurs sous forme de nuages de points et de moyennes spatio-temporelles sont essentielles car elles peuvent être directement comparées aux valeurs mesurées. La percée des technologies d'ima-

Photo p. 6

La simulation joue un rôle crucial dans la conception et le développement de nouveaux produits, comme les dispositifs anti-effluves montés ici dans le hall d'essais ultra haute tension d'ABB à Ludvika (Suède).

Note

- 1 Lire également « Couplages multiples », p. 16 et « Plus vite que l'éclair », p. 34.



gerie 3D a également ouvert de nouveaux horizons en matière de visualisation des données de calcul numérique.

Validation

La relative simplicité avec laquelle la simulation permet d'appréhender en profondeur des phénomènes physiques complexes est également son talon d'Achille. Les simulations peuvent en effet déboucher sur des résultats faux, sans rapport avec le phénomène physique réel, ou fournir de belles images aux données hélas inexactes ou trompeuses qui trouvent leurs origines aux différentes étapes du processus : modèle incorrect, géométrie simpliste, données matière imprécises, maillage ou solveur inadapté.

Pour garantir l'adéquation entre simulation numérique et réalité physique, une validation s'impose. Cette ultime étape consiste généralement à confronter les résultats des calculs aux mesures expérimentales. Seul un petit nombre de paramètres est directement mesurable, ce qui complique le processus. La validation reste malgré tout une étape obligatoire qui garantit la puissance prédictive des simulations validées par opposition aux « simulations calibrées », pour lesquelles la validité des résultats est toujours sujette à caution, en dehors de la plage de calibrage.

Conception

L'extraction des données tirées des simulations et les modifications apportées à la conception sur cette base viennent boucler le cycle de simulation. C'est à ce stade que le formidable potentiel des simulations est exploité pour faciliter le développement produit ; elles affinent en effet la compréhension des phénomènes physiques étudiés et revêtent par là-même une importance majeure pour les concepteurs. Sans compter qu'il est bien plus rapide d'obtenir des résultats en simulation que de construire et de tester des prototypes. L'un des grands avantages de la simulation réside dans la possibilité de réaliser des études paramétriques qui remplacent les coûteuses méthodes empiriques caractérisant les processus de conception classiques.

La simulation au sein d'ABB

ABB, entreprise de technologie de premier plan, a introduit un grand nombre de simulations dans sa R&D.

Les essais de court-circuit sur nos plus gros transformateurs élévateurs de tension en sont une bonne illustration. Il est capital que ce matériel puisse supporter les forces électromagnétiques résultant de forts courants de court-circuit. Compte tenu des niveaux d'énergie en jeu, seules quelques installations dans le monde sont capables de tester ces appareils.

Leur gigantisme, et les contraintes de transport qui en découlent, ajoutent à la difficulté. Il va sans dire que ces tests coûtent cher et demandent beaucoup de temps. On comprend alors que les récentes avancées en matière de simulation aient fait progresser la normalisation internationale (CEI 60076-5) et qu'il soit désormais admis de recourir au calcul numérique pour tester la tenue au court-circuit.

Les simulations d'arc dans les disjoncteurs sont un autre exemple des simulations de champs couplées. Celles-ci apportent un précieux éclairage sur les phénomènes physiques au cœur de ces appareils conçus pour supporter et interrompre des courants de court-circuit de plusieurs centaines de kiloampères en quelques dizaines de millisecondes. Les tests s'avèrent non seulement coûteux et longs, mais le nombre de paramètres mesurables est très limité. ABB peut effectuer des simulations couplées électromagnétique-fluidique-mécanique pour reproduire le comportement réel du disjoncteur en coupure². Grâce aux simulations, les concepteurs disposent d'une vision complète des régimes d'écoulement dans le disjoncteur. Ils peuvent mesurer la pression et la tension en tout point de l'appareil et calculer les forces agissant sur les composants essentiels. C'est une technique puissante qui per-

Des simulations multiphysiques pointues et complexes dans les disjoncteurs, transformateurs, moteurs, variateurs, robots, réseaux électriques et bien d'autres systèmes sont le quotidien d'ABB.

Nos experts du monde entier sont à pied d'œuvre pour accélérer le développement et limiter le recours aux essais coûteux.

met de concevoir des disjoncteurs toujours plus fiables. Enfin, pour la quasi-totalité des produits ABB, les ingénieurs sont confrontés à des problématiques de tension. Si, aux tensions les plus faibles, l'isolation diélectrique peut être assurée par des règles de conception simples, en haute tension, il est pratiquement impossible de se passer de calculs de champ électrique en 2D et 3D, indispensables à nombre de processus de développement ABB.

Le recours à ces outils permet de limiter les contraintes diélectriques sur les composants critiques et d'éviter ainsi les claquages et les défaillances. Jusqu'à une date récente, les études numériques étaient réalisées en effectuant une série de simulations, souvent en nombre limité, afin de déterminer les paramètres les plus pertinents. Aujourd'hui, les progrès des techniques d'optimisation et de la puissance de calcul permettent d'obtenir les meilleures solutions en associant calculs de champ électrique et optimisation automatique. Ces perfectionnements, déjà intégrés aux outils de conception ABB tels que *Simulation Toolbox*³, révèlent aujourd'hui leur immense potentiel.

L'importance de la simulation et sa progression rapide dans la R&D ABB ont donné lieu, au sein du Groupe, à l'organisation de conférences de portée mondiale sur le sujet afin de partager les expériences et les bonnes pratiques. Ce fut également l'occasion pour ABB

d'apprendre beaucoup des entreprises de premier plan du domaine, dans des filières comme l'automobile, l'aéronautique et les biens de consommation.

Fort de ses compétences et des retours d'expérience, ABB a poursuivi l'optimisation de son environnement de simulation, dans quatre directions :

- Mise à disposition des outils de simulation essentiels à l'ensemble de ses ingénieurs ;
- Mutualisation des ressources et plates-formes (*clusters*) pour les simulations d'envergure, gourmandes en puissance de calcul ;
- Animation de forums virtuels de partage des meilleures pratiques ;
- Assistance aux équipes de développement les moins expérimentées.

Aujourd'hui, ABB peut sereinement affirmer son *leadership* dans la mise en œuvre de la simulation au service du développement des meilleurs produits pour ses clients. Ce numéro d'*ABB Review* présente un large éventail d'applications de simulation avancée, de l'électromagnétisme dans les transformateurs à la mise en forme des plastiques.

Tendances

Les avancées en matière de simulation suivent les progrès du logiciel et du matériel, principalement au niveau de la puissance de traitement, du stockage et des communications. Là où il fallait hier des supercalculateurs ou des grappes de serveurs pour mener des simulations hyperpointues, aujourd'hui, des ordinateurs de bureau très performants font de plus en plus souvent l'affaire. La puissance des supercalculateurs se mesurera

bientôt en exaflops (10^{18} opérations à virgule flottante par seconde) tandis que celle d'un ordinateur portable performant atteint d'ores et déjà plusieurs téraflows (10^{12} flops) : des prouesses difficilement imaginables il y a à peine une décennie ! Dans le même temps, les nouveaux processeurs graphiques ont permis une fabuleuse évolution du post-traitement et de la visualisation des résultats, avec la possibilité d'animations. Cette tendance se poursuit, comme l'atteste, par exemple, l'incroyable puissance de calcul des équipements mobiles actuels. L'informatique en nuage (*cloud computing*) est peut-être balbutiante mais, dans un avenir proche, des simulations complexes pourront être lancées depuis des équipements bureautiques ou nomades pour être exécutées « quelque part dans le nuage ».

Le champ d'action de la simulation est infini et va bien au-delà de la conception, de l'étude des systèmes et de l'optimisation de la production. On peut imaginer à brève échéance que des simulations sur site s'appuieront sur des services mobiles, que l'optimisation multiphysique totalement paramétrique sera possible, voire que des imprimantes 3D équipées de modules de simulation et d'optimisation seront capables de recalculer à la volée des géométries d'objet, avant impression.

Georg Schett

Power Products
Beijing (Chine)
georg.schett@cn.abb.com

Marek Florkowski

Piotr Saj
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
marek.florkowski@pl.abb.com
piotr.saj@pl.abb.com

Arthouros Iordanidis

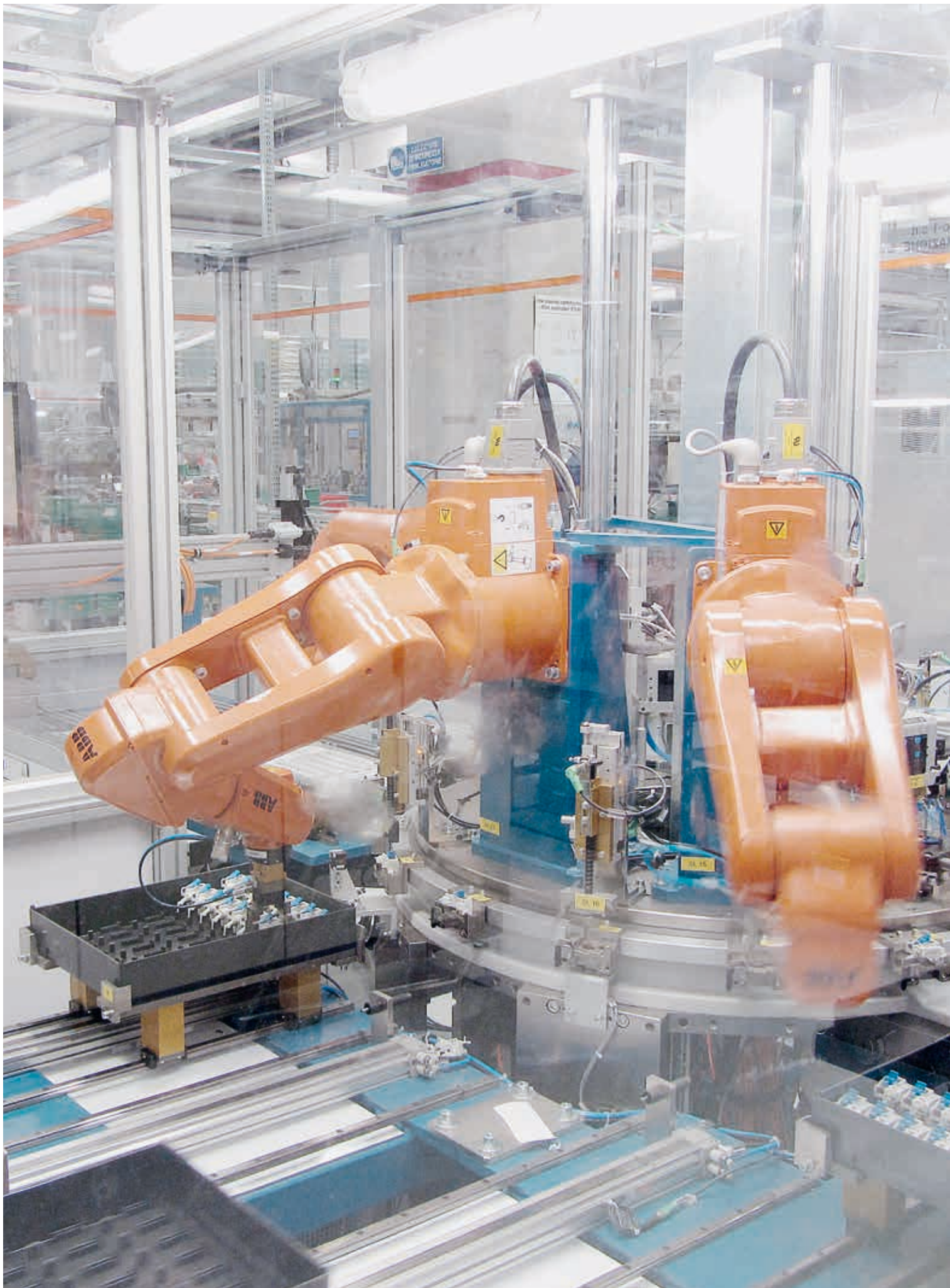
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
arthouros.iordanidis@ch.abb.com

Peter Lofgren

ABB Corporate Research
Västerås (Suède)
peter.lofgren@se.abb.com

Notes

- 2 Lire « Plus vite que l'éclair », p. 34.
- 3 Lire « Couplages multiples », p. 16.





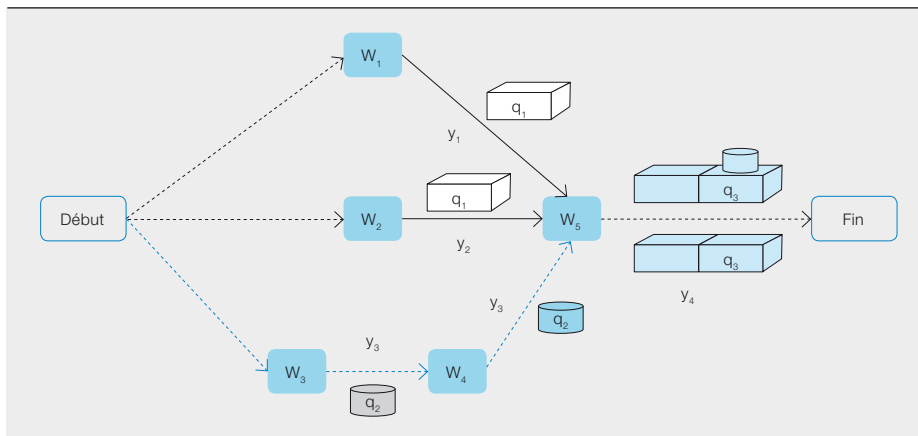
Chaos bien ordonné

Les mathématiques appliquées pour mieux produire

LUCA GHEZZI, ALDO SCIACCA – Dans un monde de ressources finies mais aux contraintes quasi infinies, les mathématiques appliquées, au fondement de la modélisation et de la simulation numérique, apportent une description et une représentation précises et rationnelles d'un problème, mais aussi des outils quantitatifs et qualitatifs de prédiction du comportement des systèmes complexes et de simulation des facteurs aléatoires et forces externes imprévisibles qui dégradent les performances. Elles sont également sources d'économies, tant dans l'industrie que dans des domaines opérationnels comme, par exemple, la logistique, la planification de la production et l'organisation des forces de vente.

Photo ci-contre

Depuis plus de 70 ans, les mathématiques ont apporté des réponses optimales à des problèmes multivariables. Elles gagnent aujourd'hui l'industrie pour identifier les meilleures stratégies qui réduiront les coûts et doperont la production.



ciaux, de même que l'ordonnancement et la plupart des fonctions des grandes entreprises fourmillent de situations complexes qui peuvent être rationalisées, simulées et optimisées par la RO.

Fort en maths !

La réponse mathématique à un problème de complexité combinatoire, multicritère et convexe consiste à minimiser une fonction objectif $f(x,z)$ sous contraintes d'égalités et d'inégalités $g(x,z)=0, h(x,z)\leq 0$, à l'aide de variables réelles (continues)

L'art de la modélisation consiste à réduire des problèmes complexes à des formules mathématiques simples mais traitant tous les aspects de la problématique.

et/ou entières (discrètes). La RO propose à cette fin des approches algorithmiques robustes, regroupées sous le vocable de « programmation mathématique », qui garantissent à l'avance l'existence et l'unicité d'une solution.

Modéliser revient à réduire des problèmes complexes à des formules mathématiques les plus simples possibles mais capables d'en traiter toute la quin-

tessence. Prenons l'exemple d'une usine ; sa fonction objectif est traditionnellement le profit. C'est une fonction linéaire des quantités de produits vendus et des coûts de production, lesquels dépendent linéairement des quantités produites → 1. Le marché demande un minimum de produits réclamant un minimum de sous-produits, et ainsi de suite jusqu'aux matières premières, chaque étape répercutant sa contrainte de quantité *minimale* sur la suivante. À chaque poste de travail, le temps-machine cumulé requis est contraint par le temps-machine disponible. Certains postes mobilisent des ressources humaines puisées dans des viviers de capacité finie (contraintes de spécialisation et de compétence) qui ajoutent des contraintes d'inégalités. Des stocks tampons et entrepôts intermédiaires assurent des espaces de stockage dynamique dans lesquels on peut prélever ou ajouter des articles, en respectant des seuils inférieur (marge de sécurité avant rupture d'approvisionnement) et supérieur (limite de capacité), et des critères de coût.

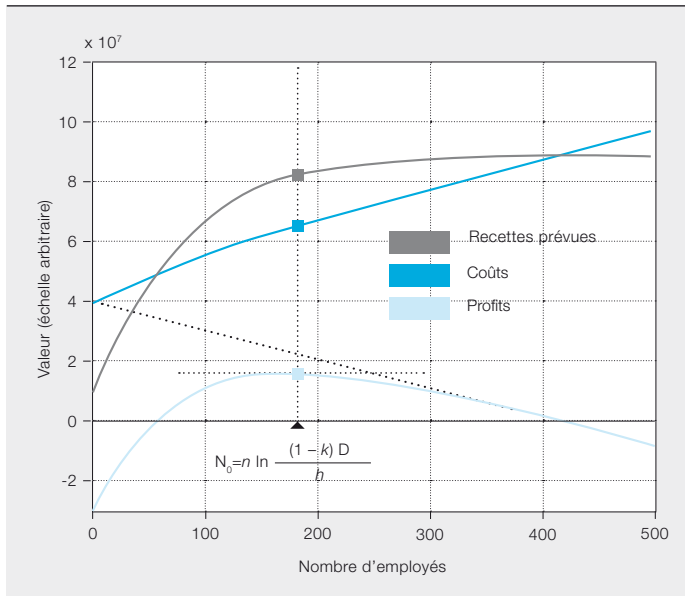
L'ensemble donne un programme mathématique convexe qui fournira la meilleure stratégie de gestion possible. Un large éventail de briques de base, assorties de milliers de variables et de contraintes linéaires, permettent de modéliser toute une chaîne de production, voire une usine, y compris les étapes sous-traitées. C'est le cas de l'usine de moteurs électriques ABB de Vittuone, en Italie.

Théorie des graphes

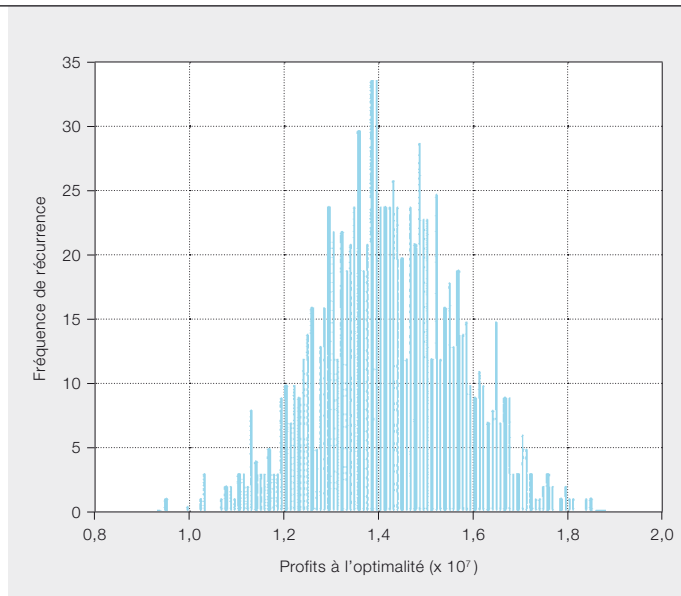
Dans notre exemple, un graphe permet de représenter et de visualiser de manière ordonnée et intuitive le problème à résoudre ; c'est un outil essentiel de la

Comme souvent, la guerre favorise le progrès technique et scientifique : la recherche opérationnelle (RO) et son principal outil quantitatif d'aide à la décision, la « programmation mathématique », ne sont-ils pas nés en pleine Seconde Guerre mondiale ? Mais pour la bonne cause ; les mathématiques promettaient de sauver des vies par l'implantation précise et optimale des tout premiers radars hors de prix qui devaient repérer et contrer les attaques aériennes ennemies. Encore fallait-il innover avec une méthode d'optimisation d'une fonction objectif qui maximise le territoire balayé par le radar, sans perdre de vue les contraintes physiques et économiques de l'opération, et son intégralité ; impossible en effet d'installer une partie de radar à Douvres et le reste quinze kilomètres plus loin, à Folkestone ! Cette nouvelle discipline servait également à dimensionner et à constituer au mieux les convois de ravitaillement de l'Atlantique nord.

Le nombre de problématiques de décision complexe posées à la RO s'est progressivement étoffé pour inclure, entre autres, l'optimisation combinatoire soumise à des contraintes d'égalités et d'inégalités avec des variables continues ou discrètes. Les procédés industriels, les flux logistiques et les circuits commer-



2a Calcul optimal des recettes prévues (courbe grise)/coûts (bleu)/profits (bleu ciel) en fonction des effectifs



2b Propagation de variance sur les profits dans un échantillon de données (exemple)

RO, tant pour trouver une solution que pour la formaliser en clair.

La théorie des graphes décrit tous les systèmes arbitraires à l'identique (circuits de distribution, machines de production, etc.), sous la forme d'un réseau constitué de sommets ou «nœuds» reliés par des liens ou «arcs». En logistique, par exemple, les clients, points de transit, plates-formes de distribution, entrepôts et équipements de production constituent les nœuds du graphe, et les itinéraires acceptables, les arcs. S'y ajoutent des contraintes de capacité en matière de transport, de manutention et de production. Le marché fixe des limites inférieures de distribution des marchandises (le reste étant stocké) et chaque chose a un coût.

La formulation canonique de nombreux problèmes mathématiques d'optimisation des réseaux et des flux équivaut au formalisme des graphes, dont les théorèmes aussi simples que puissants mènent directement à des solutions exactes, sans grands calculs.

La méthode fut d'ailleurs adoptée par ABB pour simuler une partie de son réseau logistique en Italie et en optimiser la gestion.

Heuristique

Hélas, calculer LA solution exacte prend souvent un temps démesuré. De même, l'incertitude et la variabilité intrinsèques

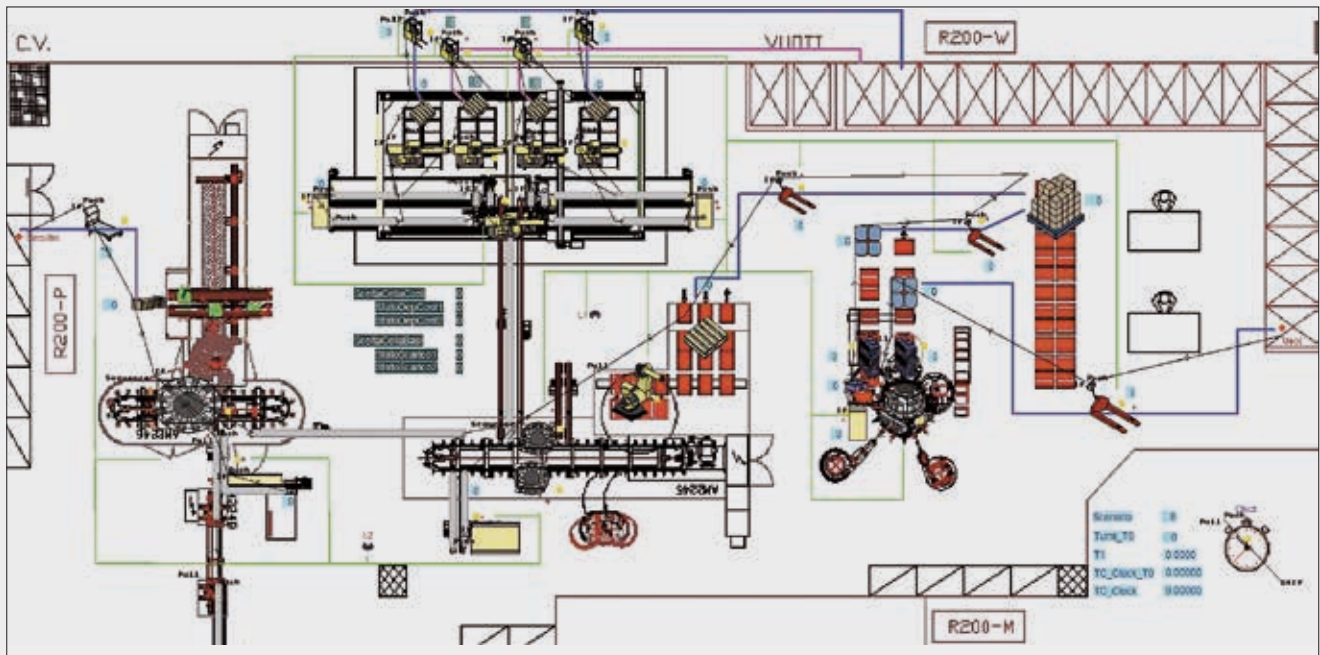
des données obligent à ménager une marge de sécurité. D'où le choix, plus raisonnable, d'un compromis «sous-optimal».

Fondée sur différentes approches (suite de règles d'amélioration ou imitation de l'évolution physique, humaine ou biologique), l'heuristique se définit comme une méthode de résolution des problèmes qui ne conduit pas forcément à l'optimum mais à une approximation de la meilleure solution réalisable. L'efficacité d'une méthode heuristique emprunte parfois aux mathématiques pures.

En l'appliquant aux étapes du célèbre algorithme d'Euclide pour calculer le plus grand commun diviseur (PGCD) de nombres entiers, on peut produire une suite de différents articles de même catégorie, tels que les produits à fabriquer dans un plan de production, pour essayer d'en maximiser la répartition. Et ici, curieusement, plus l'environnement est chaotique, mieux c'est !

Cette méthode, couplée à d'autres heuristiques adaptatives basées sur des gammes de production et des recettes empiriques déduites des meilleures pratiques opérationnelles, est aujourd'hui une composante de l'ordonnanceur de ligne à court terme (une semaine) de l'usine ABB de disjoncteurs à Dalmine, en Italie. La combinaison de ces différents outils en un système réactif et flexible, interagissant facilement avec

Le calcul de LA solution exacte prend trop de temps. Dans bien des cas, on se contente d'une solution « sous-optimale ».



Simplifier un problème est toujours un bon départ ; prendre en compte la sensibilité des variables et les effets d'ordre de grandeur facilite sa formulation.

l'intelligence humaine, constitue une « méta-heuristique » de résolution de la complexité et du chaos.

Modélisation analytique exacte

Simplifier un problème est toujours un bon départ. Appréhender la sensibilité des variables et les effets des ordres de grandeur aide aussi à le formuler. C'est exactement ce qu'il faut, par exemple, pour simuler des chiffres de vente ; une courbe de saturation des recettes, modélisant à la fois les conditions de marchés vierges et matures, peut être décrite par une équation différentielle avec quelques paramètres tirés des historiques disponibles. Couplée à une courbe de coûts liés à ces recettes, elle débouche sur un modèle analytique différentiable, assez simple à résoudre en boucle fermée, qui permet d'identifier les profits et leurs valeurs maximales → 2.

Modèles stochastiques : le hasard fait bien les choses

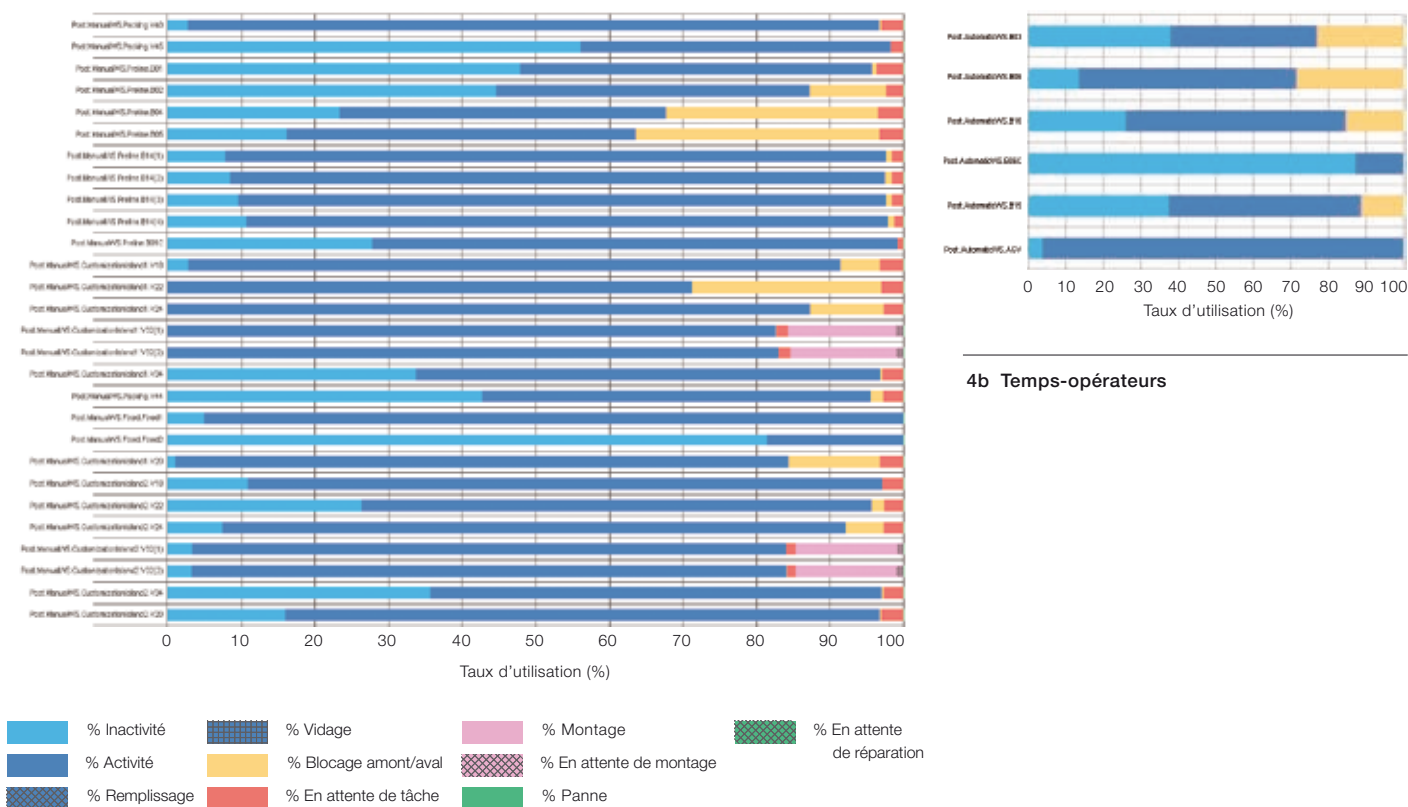
Nombreux sont les procédés à comporter des données d'entrée incertaines, que l'on formalise souvent à l'aide d'une fonction de densité de probabilité (FDP) décrivant, pour chacune, la probabilité d'apparition de chaque valeur admissible. Les données de sortie sont donc naturellement non déterministes. Plusieurs méthodes décrivent cette imprévisibilité.

La simulation de Monte-Carlo, très prisée pour sa puissance et son efficacité, construit la fonction FDP de sortie en exécutant une multitude (souvent un bon million) d'entrées choisies au hasard, par l'intermédiaire d'un simulateur déterministe de type « boîte noire ». Le taux de convergence asymptotique est indépendant du nombre d'entrées, ce qui ne signifie pas pour autant que le temps de convergence soit le même, qu'il y ait peu ou beaucoup de variables. Simple à comprendre et peu coûteuse à mettre en œuvre, la méthode pêche néanmoins par sa lenteur.

Une autre solution récente consiste à étendre la FDP de sortie en une suite tronquée de fonctions élémentaires connues, des polynômes orthogonaux par exemple (d'où l'appellation de « chaos polynomial »). Cette orthogonalité polynomiale permet de déterminer rapidement les coefficients d'expansion en seulement quelques simulations déterministes.

Simulation à événements discrets

Les méthodes quantitatives de haut niveau, telles que la programmation mathématique, aussi précieuses et stratégiques soient-elles, ne reflètent pas assez fidèlement le monde réel. Il faut leur ajouter les retards de livraison, les pannes machine et arrêts de maintenance, la planification des équipes et



4a Temps-machines

autres facteurs de complication qui plombent la production.

La solution réside dans la simulation à événements discrets, réplique virtuelle du site (ou du réseau logistique, de l'entrepôt, etc.) avec le cheminement des produits d'un poste à l'autre et l'impact sur le procédé des interférences déterministes et stochastiques. Des outils du commerce permettent de retranscrire la réalité avec force détails et d'exécuter différents scénarios pour optimiser la répartition des équipes, l'affectation des tâches de production aux machines et leur ordonnancement, etc.

Plusieurs usines ABB ont bénéficié de ce type de simulations qui fournissent des vues et animations interactives, comme en CAO, des opérateurs et transferts de pièces et produits d'une machine à l'autre → 3. On obtient ainsi des tableaux de bord listant les temps-machines → 4a et temps-opérateurs → 4b, les temps d'immobilisation (par suite de goulets d'étranglement en amont ou en aval, entre autres) ou les demandes d'intervention : une information indispensable à la juste allocation des ressources.

Soutenir l'effort

Dans certains cas, une simulation ponctuelle suffit. Dans d'autres, elle peut être intégrée en permanence au *process*. Reste qu'une modélisation et une simulation efficaces ne sont guère possibles sans une constante validation empirique.

Conditions indispensables à la réussite de ces techniques : un engagement fort des parties prenantes ainsi qu'une collecte et une gestion des données bien structurées. Cette dernière représente un investissement qui va au-delà de la mise en œuvre d'une solution informatique donnée, dont l'apport est aussi tangible en l'absence de simulations.

Les simulations quantifient en amont les gisements d'économies ou les actions de progrès, et permettent d'améliorer les opérations sur le court, moyen et long terme. Mises en œuvre avec soin et talent, dans leur globalité, elles peuvent faire beaucoup progresser l'entreprise.

Luca Ghezzi

Aldo Sciacca

ABB LPED

Milan (Italie)

luca.ghezzi@it.abb.com

aldosciacca@it.abb.com



Couplages multiples

Simulation Toolbox optimise les propriétés diélectriques et thermiques du matériel électrique

ANDREAS BLASZCZYK, JÖRG OSTROWSKI, BOGUSLAW SAMUL, DANIEL SZARY – Confrontés aux exigences de compacité et de réduction des coûts, les concepteurs de matériel électrique se voient forcés d'utiliser une isolation hybride gaz-solide et d'optimiser la forme des électrodes pour maintenir la tension de tenue au-dessus des niveaux admissibles. De surcroît, des valeurs nominales de courant élevées peuvent être à l'origine de problèmes de dissipation de chaleur qui nécessitent alors un système de refroidissement complexe, augmentant la taille et le coût des appareils. Leurs propriétés thermiques sont donc également primordiales. Si, dans ce domaine, les logiciels de simulation diélectrique et thermique constituent une aide précieuse, certaines analyses ne peuvent être réalisées avec les outils classiques, en particulier lors de l'évaluation des décharges électriques et du couplage fluide-électromagnétique. ABB apporte sa pierre à l'édifice avec ses propres outils et procédures regroupés dans *Simulation Toolbox*.



L'atout maître de l'approche par flux est sa performance.

La création de *Simulation Toolbox*, dans les années 1990, répondait avant tout au besoin des concepteurs de simuler les propriétés diélectriques et thermiques complexes des matériels électriques sans faire appel à des experts de la simulation. Depuis, ABB n'a eu de cesse de simplifier la tâche des utilisateurs, selon plusieurs axes :

- Les simulations sont directement intégrées aux logiciels de conception (CAO ou autres). La plupart des interactions avec l'utilisateur se fait au sein même du système de conception d'origine sans recourir à aucun outil tiers spécial ;
- Le temps d'apprentissage est très court (quelques jours ou semaines selon la procédure) ;

- Les outils fournissent les réponses aux problèmes types dans un temps raisonnable ;

Simulation Toolbox est utilisé par plus d'une centaine d'ingénieurs dans le monde pour exécuter plus de 10 000 simulations par an.

- Les procédures sont constamment améliorées et actualisées par les chercheurs ABB et leurs partenaires universitaires ;
- L'infrastructure matérielle et logicielle indispensable aux simulations avancées est disponible sur l'intranet d'ABB. Les développeurs n'ont rien à investir.

dans le cadre d'un projet universitaire il y a plus de 10 ans [1], fut bien accueillie chez ABB. La plate-forme est aujourd'hui utilisée par

plus d'une centaine d'ingénieurs dans le monde qui lui soumettent plus de 10 000 tâches de simulation par an. Elle a sa propre équipe de maintenance, également

chargée de l'assistance et de la formation.

Méthode des éléments de frontière

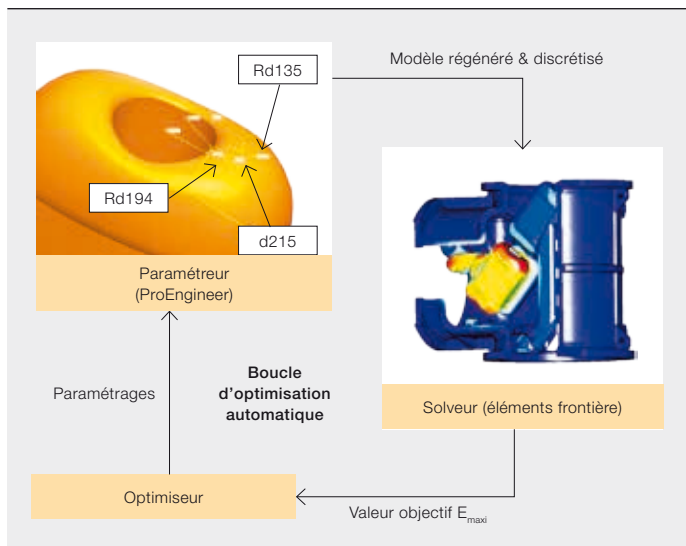
En général, la simulation de propriétés diélectriques commence par le calcul du champ électrostatique d'une géométrie 3D complexe. Ce type de calcul, basé sur la résolution de l'équation linéaire de Laplace, est proposé par de nombreux logiciels d'électromagnétisme du commerce depuis les années 1980. Or une simulation vraiment efficace exige une modéli-

Photo

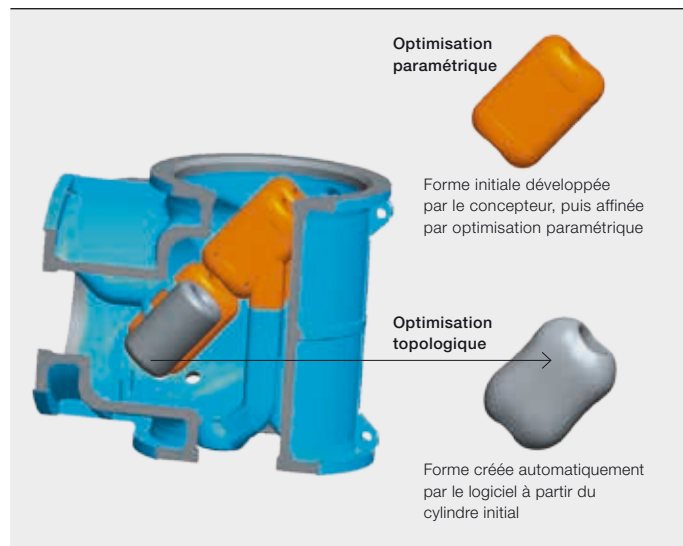
Les logiciels de simulation du commerce ne sont pas assez puissants pour simuler le comportement thermique et électromagnétique de matériels électriques compacts. Les voici « musclés » par la plate-forme *Simulation Toolbox* d'ABB.

La première mise en œuvre de *Simulation Toolbox*, sur une grappe de serveurs (*cluster*) Beowulf sous Linux créé

1 Optimisation paramétrique des propriétés diélectriques d'un appareillage à isolation gazeuse : architecture et exemple



2 Optimisation topologique des propriétés diélectriques d'un composant à isolation gazeuse



Dans le cadre d'un récent projet de collaboration entre ABB et plusieurs universités européennes, une autre méthode d'optimisation a été étudiée : l'optimisation topologique.

sation 3D très fine, clé de la qualité de conception globale. Au début de la décennie 1990, ABB a démontré l'efficacité de la méthode des éléments de frontière pour résoudre des modèles très complexes et détaillés. Celle-ci compte aujourd'hui parmi les premiers outils de Simulation Toolbox et est encore très utilisée par les ingénieurs d'ABB [2].

Optimisation paramétrique

Le gros avantage de Simulation Toolbox est son intégration inhérente aux systèmes CAO, couvrant la définition des conditions aux limites, les propriétés des matériaux et le maillage. Contrairement à la simulation par éléments finis, le maillage du volume extérieur est inutile. Toutes ces qualités ont permis de construire de manière totalement automatisée des modèles discrétisés (« maillés ») et d'inaugurer un nouveau domaine de la conception diélectrique avancée : l'optimisation paramétrique → 1. Développée avec un partenaire universitaire [3], celle-ci exécute automatiquement et systématiquement plusieurs centaines de calculs 3D complexes. En général, un concepteur qui soumet à Simulation Toolbox un modèle CAO/ProEngineer préparé récupère en quelques heures une géométrie optimisée ou une série de résultats pour un ensemble prédéfini de paramètres géométriques.

Optimisation topologique

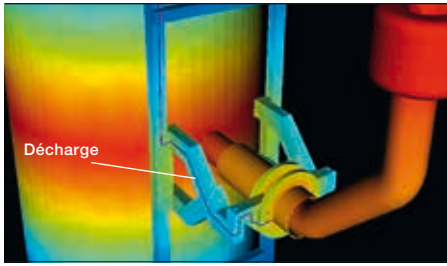
Dans le cadre d'un récent projet de collaboration entre ABB et plusieurs universités européennes, une autre méthode d'optimisation a été étudiée : l'optimisa-

tion topologique [3]. Il s'agit d'un outil numérique basé sur une formulation du « problème contigu » qui fournit les valeurs de gradient utilisées par l'optimiseur pour modifier les coordonnées des nœuds du maillage. À la différence de la méthode paramétrique, l'optimisation topologique n'a pas besoin de spécifier les paramètres géométriques. Au lieu de cela, l'algorithme numérique crée une nouvelle forme, allégeant considérablement la tâche des concepteurs lors de la préparation de la géométrie initiale. Dans l'exemple → 2, un simple cylindre sert de point de départ ; l'optimiseur topologique le convertit en une nouvelle forme très proche du résultat obtenu avec l'optimisation paramétrique. La méthode nécessite encore quelques travaux de recherche mais cette composante de Simulation Toolbox peut être mise à la disposition des ingénieurs ABB immédiatement, bien avant que la solution ne soit proposée par les outils du commerce.

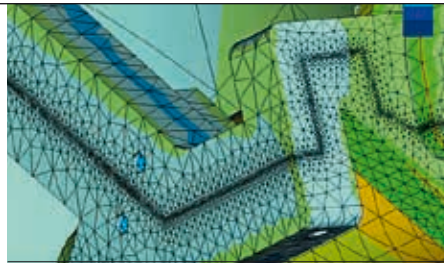
Étude des propriétés diélectriques de différents matériels électriques

Prédire la tension de tenue d'un matériel électrique compte parmi les plus grandes difficultés rencontrées par les ingénieurs de conception. En effet, connaître l'intensité de champ maximale pour prédire l'efficacité de l'isolant dans des structures complexes comportant barrières isolantes et électrodes enrobées d'un diélectrique solide ne suffit pas.

3 Exemple d'évaluation du parcours d'une décharge le long du support d'une borne de sortie d'un transformateur de puissance

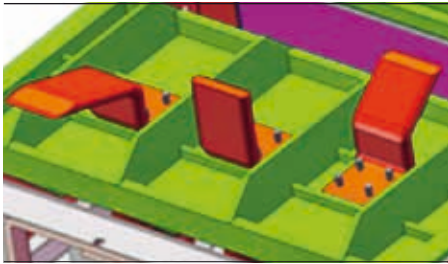


3a Distribution de potentiel

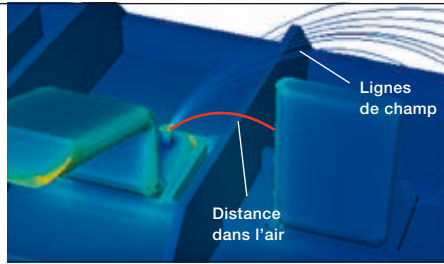


3b Distribution de l'intensité de champ

4 Exemple d'évaluation du trajet d'une décharge dans un appareillage MT isolé dans l'air (isolant hybride)



4a Vue générale des bornes



4b Lignes de champ pour l'évaluation de la tension de formation et du canal *streamer* dans la distance dans l'air entre le point de formation et la phase voisine

Il est impératif de bien définir le type de décharge électrique (filaments ionisés *streamers* ou traceur *leader*) susceptible de se former aux points critiques. Même en cas de décharge de type streamer, un système d'isolation bien conçu doit garantir l'extinction de la décharge pendant sa propagation inter-électrodes et un risque de claquage suffisamment faible pour réussir les essais diélectriques de type.

Il est possible de simuler la distribution de potentiel d'une décharge le long d'un support de borne de sortie de transformateur → 3, ce qui permet au concepteur de s'assurer que les contraintes cumulées se situent dans la plage admise par ABB. De même, on peut calculer les lignes de champ d'une borne d'élément d'appareillage moyenne tension (MT), qui serviront à évaluer la tension de formation d'un streamer pour lequel le nombre d'électrons produits par le mécanisme d'avalanche suffit à créer une tête de streamer qui s'auto-propage → 4. En cas de décharge, un nouveau dimensionnement doit se baser sur la distance dans l'air entre son point de formation et l'électrode voisine; le concepteur veillera à ce que l'intensité de champ moyenne le long de cette distance soit inférieure au champ de stabi-

lité du streamer déterminé par empirisme pour l'impulsion positive dans l'air [4].

Simulations électrothermiques

Simuler les échauffements au sein d'un matériel électrique n'est pas chose aisée. Les conducteurs chauffent du fait des pertes induites par les courants résistifs et inductifs; ils refroidissent par convection et rayonnement, alors que les échanges thermiques se font par conduction. Ainsi, la simulation doit tenir compte des interactions entre plusieurs physiques (électromagnétisme, dynamique des fluides et rayonnement), qui sont déjà difficiles à simuler séparément! En électromagnétisme, si les courants résistifs dominant, des phénomènes inductifs comme les effets de peau et de proximité doivent être pris en compte. Le refroidissement convectif turbulent continue de poser des problèmes en calcul numérique des écoulements CFD, tout particulièrement pour la convection naturelle, ce qui explique que différentes méthodes de calcul ont été développées pour les simulations électrothermiques.

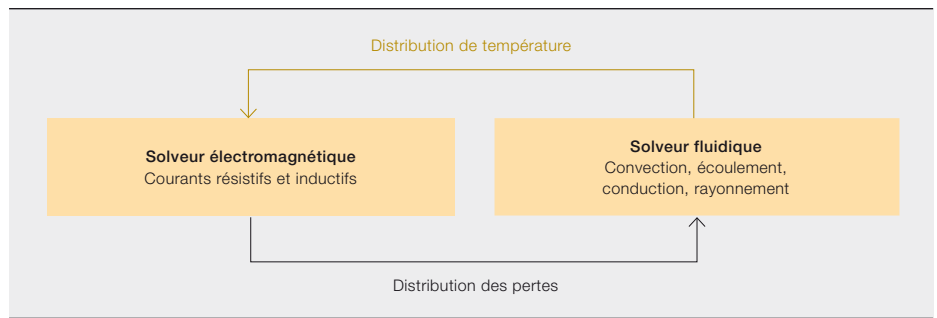
Calculs électromagnétiques-fluidiques couplés

Un traitement numérique rigoureux du problème de simulation électrothermique est basé sur la technique du couplage

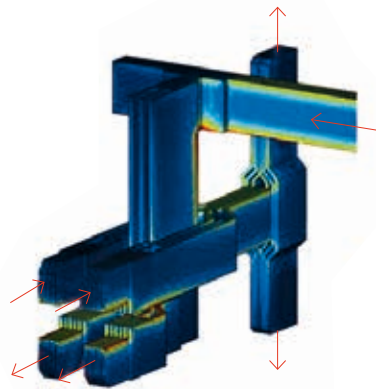
Une simulation vraiment efficace exige une très fine modélisation 3D, clé de la qualité de conception globale.

Simulation Toolbox répond au besoin des concepteurs de simuler des propriétés diélectriques et thermiques complexes dans le matériel électrique, sans être expert de la simulation.

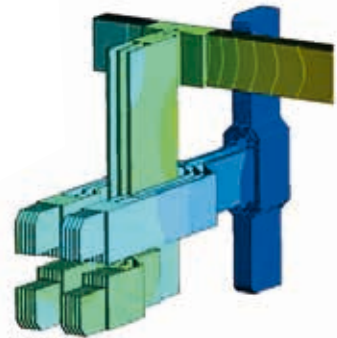
5 Couplage électrothermique : la distribution des pertes est calculée par le solveur électromagnétique et transmise au solveur fluide qui en déduit la distribution de température.



6 Calcul électromagnétique-thermique couplé d'un système de jeu de barres BT



6a Distribution de courant calculée par le solveur électromagnétique « maison » [5] (sens de circulation du courant indiqué par les flèches rouges)



6b Distribution de température calculée par Ansys/Fluent

« bidirectionnel faible » d'un solveur électromagnétique avec un solveur CFD → 5. Tous ces phénomènes physiques peuvent être traités par la méthode bien connue des éléments finis pour simuler le champ électromagnétique [5] et la méthode des volumes finis pour simuler la dynamique des écoulements avec des codes commerciaux comme Ansys/Fluent. Un couplage bidirectionnel s'impose si la dépendance en température des paramètres du matériau électromagnétique doit être prise en compte. Si celle-ci est négligeable ou si la température approximative est connue d'avance, les paramètres du matériau peuvent alors être anticipés et une cartographie unidirectionnelle de la distribution des pertes suffit.

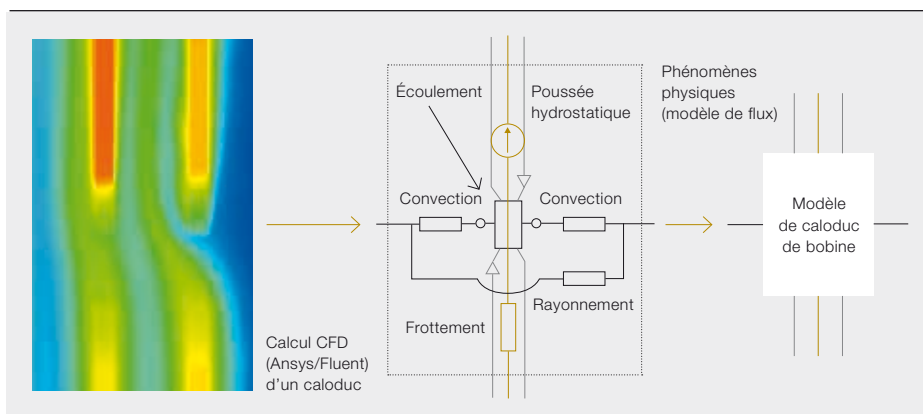
Cette méthode de calcul est avantageuse si les effets inductifs jouent un rôle important ou si la distribution de température fait apparaître des points chauds localisés. Dans ce cas, la distribution des pertes et celle de température doivent faire l'objet d'une résolution spa-

tiale. Un exemple est illustré par le système de jeu de barres de courants forts, partie intégrante d'un appareillage BT → 6. La distribution des pertes est fortement influencée par les effets de peau et de proximité dans les barres → 6a.

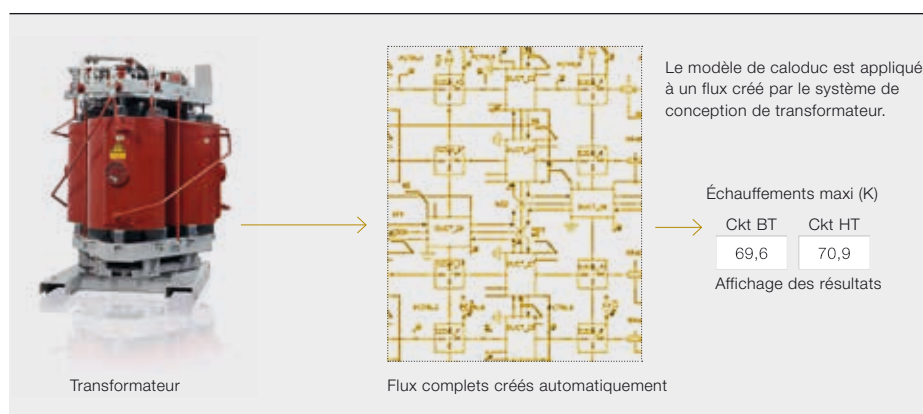
Pour autant, ce couplage électrothermique rigoureux et localement précis est une procédure complexe et fastidieuse car la géométrie doit être maillée et calculée avec deux solveurs couplés différents. Mieux vaut donc choisir une méthode de calcul plus simple dans le cas de conceptions moins contraignantes.

Flux thermiques et de pression

L'approche par flux est une séduisante alternative à la complexité du couplage électrothermique [6]. L'idée est de substituer aux composants géométriques des modèles de flux abstraits qui incluent les formulations thermodynamiques et électromagnétiques valables pour une partie spécifique de l'appareil. La figure → 7 montre un exemple de modèle représen-



7a Développement des modèles de flux intégrés validés par calculs CFD



7b Application des modèles de flux intégrés à un système de conception de transformateur pour calculer l'échauffement des enroulements

Andreas Blaszczyk

Jörg Ostrowski

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

andreas.blaszczyk@ch.abb.com

joerg.ostrowski@ch.abb.com

Boguslaw Samul

Daniel Szary

ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

boguslaw.samul@pl.abb.com

daniel.szary@pl.abb.com

Bibliographie

- [1] Blaszczyk, A., et al., « Tout bénéfice! », *Revue ABB*, 1/2002, p. 35–42.
- [2] De Kock, N., et al., « Application of 3-D boundary element method in the design of EHV GIS components », *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 14, n° 3, p. 17–22, mai/juin 1998.
- [3] 7^e programme-cadre de recherche de l'Union européenne (UE FP7), Action Marie Curie, *Projet IAPP CASOPT*, « Controlled Component- and Assembly-Level Optimization of Industrial Devices », ABB Corporate Research, université technique de Graz, université technique de Munich, université de Cambridge, 2009–2013.
- [4] Pedersen, A., et al., « Streamer inception and propagation models for designing air-insulated power devices », *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Virginia Beach (États-Unis), octobre 2009.
- [5] Hiptmair, R., et al., « A robust Maxwell Formulation for All Frequencies », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, n° 6, p. 682–685, juin 2008.
- [6] Blaszczyk, A., et al., « Convergence behavior of coupled pressure and thermal networks », *SCEE Conference (Scientific Computing in Electrical Engineering)*, Zurich (Suisse), 2012, à paraître dans *COMPEL Journal* 2014.
- [7] Morelli, E., et al., « Network-based cooling models for dry transformers », *ARWtr Conference*, Baiona (Espagne), 2013.

tant un caloduc de bobine de transformateur. Sa topologie interne inclut très peu d'éléments de flux responsables de la modélisation des phénomènes physiques survenant dans le caloduc : transfert de chaleur par les couches limites thermiques (convection forcée), écoulement, frottement, convection naturelle et rayonnement. Les modèles élémentaires sont validés par calculs CFD avancés et intégrés dans des composants de flux prêts à l'emploi. Ceux-ci peuvent être utilisés par les développeurs de systèmes de conception de transformateurs pour créer le modèle de transformateur complet qui calculera les valeurs d'échauffement des enroulements [7]. La précision de ces calculs de flux (quelques Kelvin) est acceptable. L'erreur est largement imputable à des incertitudes dans les données d'entrée et les tolérances de fabrication et de mesure plutôt qu'aux simplifications du modèle de flux. L'atout majeur de cette approche est sa performance ; en effet, la vitesse de calcul (quelques millisecondes à une poignée de secondes) permet l'intégration dans

des systèmes de conception interactifs et l'utilisation d'algorithmes d'optimisation qui exigent plusieurs centaines, voire milliers de calculs pour concevoir un transformateur.

Synergies d'avenir

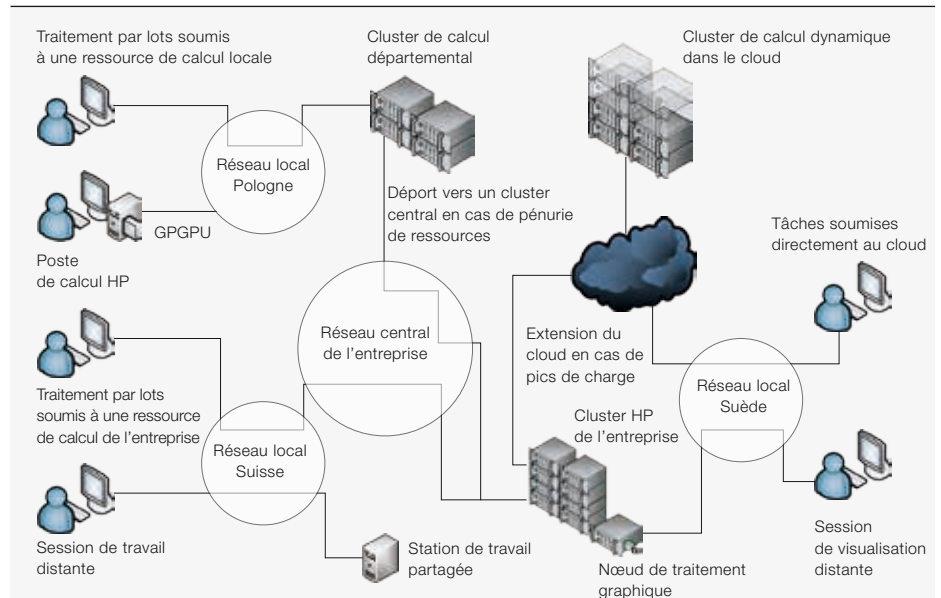
Les simulations des propriétés diélectriques et thermiques de la plate-forme Simulation Toolbox font désormais partie intégrante de la boîte à outils des concepteurs. En jetant les ponts entre, d'une part, le développement produits et, d'autre part, la recherche ABB et universitaire, cette plate-forme garantit l'utilisation des technologies les plus pointues dans la conception du matériel électrique ABB.



Arrêt sur image

La simulation
numérique
au programme
de l'industrie

BARTOSZ DOBRZELECKI, OLIVER FRITZ, PETER LOFGREN, JÖRG OSTROWSKI, OLA WIDLUND – L'une des grandes vertus de la simulation sur ordinateur est sa capacité à résoudre des problèmes industriels complexes pour concevoir mieux, plus vite et relativement moins cher. Le domaine continue d'évoluer avec les progrès du calcul scientifique, de l'architecture informatique et du traitement parallèle de l'information : beaucoup de logiciels de simulation mobilisent en effet des dizaines de « cœurs » pour résoudre des problèmes volumineux et complexes avec une précision accrue, dans des temps raisonnables. Les outils du commerce et ceux développés par ABB sont de plus en plus relayés par les logiciels libres (*open source*). Quelles infrastructures et technologies se cachent derrière ces avancées au service de l'industrie ?



Configuration actuelle et perspectives d'évolution

Souvent plus rapide, moins chère, plus précise et mieux pourvue en outils aptes à résoudre la complexité industrielle que le prototypage physique, la simulation est aujourd'hui au centre de l'innovation produit ABB. Décryptage.

Un écosystème voué au calcul

Le calcul intensif, ou calcul « à haute performance » (HP), est l'arme stratégique de la simulation numérique. C'est pourquoi ABB a investi au fil des ans dans ses propres *clusters* (ordinateurs répartis) et dispose aujourd'hui en interne de ressources dédiées au calcul HP. Si ces lourds systèmes permettent de simuler les produits les plus complexes, ce ne sont pas les seuls outils au service des spécialistes du domaine.

La démocratisation du calcul scientifique et la révolution de l'informatique « multi-cœur » ont mis le parallélisme à la portée des bureaux d'études. Beaucoup de simulations sont aujourd'hui effectuées sur d'énormes postes ou « supercalculateurs ». Si cette technologie de rupture a semblé un temps s'imposer avec l'émergence des accélérateurs graphiques GPU (*Graphics Processing Unit*) dédiés au calcul HP, elle doit encore faire ses preuves sur le terrain industriel.

D'autres plates-formes de calcul intensif fleurissent avec le potentiel de remodeler l'infrastructure de simulation : ce sont les centres de données (*datacenters*) accessibles à un large public, en libre-service payé à l'usage, piliers de l'informatique externalisée dite « en nuage », ou *cloud computing*.

Pour autant, ces outils généralistes se prêtent mal à la charge de calcul des simulations qui nécessitent souvent des solutions réseau spécialisées à large bande passante et faible latence, même

« nuage » pourrait réduire de moitié le coût total de possession de l'infrastructure. Mais le cloud continue d'inquiéter les entreprises ; la principale interrogation concerne la sécurité. Il reste beaucoup à faire avant que les industriels et leurs clients confient leurs données à une infrastructure de stockage et de traitement délocalisée échappant à leur contrôle.

À court terme, un centre de calcul HP s'annonce comme la solution la plus performante et économique, qui pourrait

d'ailleurs s'enrichir de clusters plus petits, dans chaque service de l'entreprise. Le synoptique → 1 préfigure l'architecture matérielle de la simulation numérique : des stations de travail dopées par des processeurs gra-

Le calcul haute performance est l'arme stratégique de la simulation numérique. ABB a donc investi dans ses propres clusters.

si certains hébergeurs de services *cloud* adaptent des parties de leurs datacenters aux exigences du calcul intensif. Les premières études comparatives d'offres *cloud* réalisées par ABB révèlent que les applications de traitement parallèle à mémoire distribuée et petit volume d'échanges offrent des performances satisfaisantes. D'après les projections de coûts basées sur des historiques d'usage extraits du système de calcul HP d'ABB, la migration de charges ciblées dans le

phiques de calculs génériques GPGPU (*General-Purpose GPU*) cohabiteront avec une configuration plus dynamique qui permettra de résorber les pics d'activité et le déficit de moyens internes en déportant une partie de la charge vers les postes de calcul de l'entreprise et en

Photo p. 22

La puissance de calcul ne cesse d'évoluer, tout comme les outils de simulation qui permettent de développer de nouveaux produits.

L'explosion des datacenters publics est appelée à redessiner l'infrastructure de simulation.

sollicitant à la volée les ressources supplémentaires d'un cloud externe public.

Une fois l'infrastructure en place, il faut développer les bons processus pour garantir un emploi efficace des ressources matérielles et logicielles disponibles.

Du bon usage des ressources

L'achat et la maintenance du matériel de calcul intensif reviennent d'habitude moins cher que l'acquisition d'une licence de logiciel de simulation. Bien dimensionner et exploiter ces ressources limitées obligent à arbitrer entre plusieurs facteurs : le nombre de processeurs à la tâche, la topologie matérielle (mémoire partagée ou distribuée), l'interconnexion du cluster (débit de transmission), le nombre de licences disponibles et la configuration des systèmes de file d'attente (pour maximiser le rendement des simulations par lot, par exemple, tout en préservant la disponibilité des licences pour une utilisation interactive le jour).

La pondération de ces facteurs varie selon le modèle de licence propre à l'éditeur de logiciels. D'ordinaire, chaque tâche est régie par une seule licence « simple cœur » onéreuse, alors que chaque processeur supplémentaire exploite une licence de calcul HP moins chère. Les éditeurs pratiquent en majorité des tarifs dégressifs, le coût de la licence diminuant en fonction de la quantité achetée. Cette politique de prix pousse à exécuter chaque simulation sur un maximum de processeurs en un minimum de temps, afin de rentabiliser les coûteuses licences simple cœur.

ABB a beaucoup fait ces huit dernières années pour coordonner et partager ses ressources matérielles et logicielles, d'abord de manière plutôt informelle avec quelques-unes des plus grandes équipes spécialistes de la simulation, et maintenant avec tous les services SI/TI du Groupe. L'objectif est double : prendre conscience des coûts mais aussi mutualiser avantageusement les ressources disponibles. Les équipes qui en font un

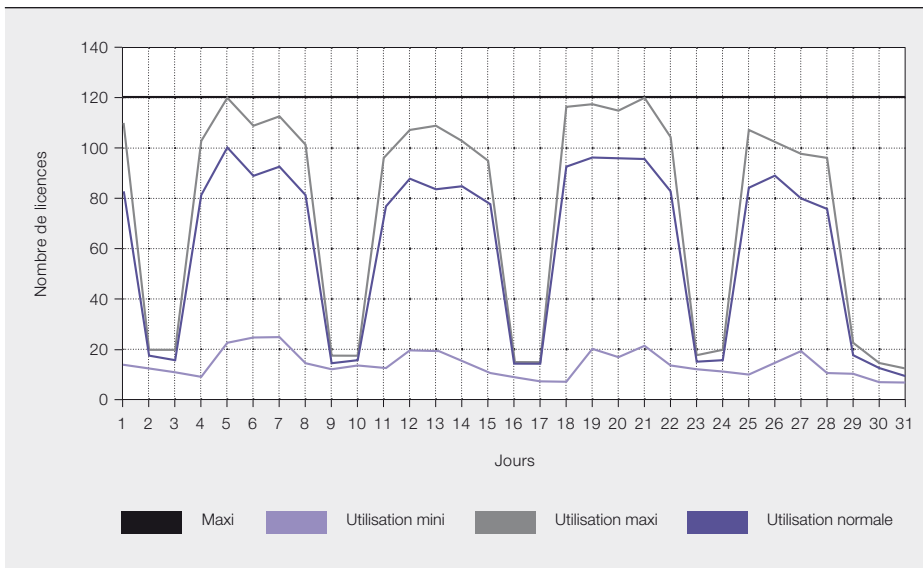
usage limité ou les nouveaux utilisateurs peuvent ainsi y avoir accès sur une courte période. De quoi simplifier l'essai et l'évaluation des outils de simulation, et limiter l'investissement de départ. Ce partage des matériels et licences logicielles entre branches d'activité et sites ABB est très important dans le cadre de projets avec transfert de technologies, surtout pour les centres de recherche du Groupe ; chacun peut très tôt accéder aux outils et modèles développés. La plupart des éditeurs de logiciels y a aussi vu son intérêt : faciliter l'accès des nouveaux utilisateurs à leurs produits permet notamment de mieux cerner les besoins de la clientèle. La démarche implique généralement des contrats groupés avec les éditeurs. L'intérêt est ici d'améliorer la visibilité d'ABB. Le Groupe détient aujourd'hui des contrats et des « *pools* de licences » mondiaux pour plusieurs grandes suites logicielles de simulation.

Un bon exemple de partage des ressources matérielles de calcul intensif est le nouveau cluster leo de Linux, hébergé par l'un des centres de recherche ABB et spécialisé dans les simulations complexes de mécanique des fluides et de dynamique moléculaire. Leo est cofinancé par deux centres de recherche ABB et utilisé par plusieurs équipes dans de nombreux pays. Un autre cluster, krak, est financé et géré par un troisième centre de recherche du Groupe, tout en cohabitant avec leo, pour des raisons pratiques. Krak réalise d'ailleurs les calculs de la plate-forme *Simulation Toolbox* d'ABB (cf. p. 16–21).

Ce partage ne va pas de soi. Certaines difficultés, d'ordre technique, se règlent facilement ; d'autres, relevant du logiciel, sont plus délicates :

- Modes de résolution des conflits ;
- Prise en compte des différents profils d'usage ;
- Affectation et répartition des coûts d'utilisation de nouvelles ressources en cas de pénurie ;
- Interprétation des statistiques de licences.

ABB a beaucoup fait ces huit dernières années pour coordonner et partager ses moyens matériels et logiciels.



eLicense fournit de précieuses données aux processus d'achat des licences d'exploitation.

Comme pour le partage de logiciels, la réussite de la solution passe par la mise en œuvre d'une méthode rigoureuse d'administration du pool de licences : définition de politiques et règles communes d'utilisation, anticipation de problèmes potentiels, proposition de solutions. Cela peut se traduire par des conférences téléphoniques avec des représentants de toutes les équipes contribuant au pool, mais aussi par une petite équipe chargée de régler les problèmes au quotidien. Dans un souci d'équité et de conciliation en cas de conflit, il est fondamental de recueillir et de suivre les statistiques d'usage, et d'en informer tous les utilisateurs. C'est dans cette optique qu'ABB a développé son outil de gestion sur le Web eLicense → 2.

Modèles physiques, méthodes numériques

Le point de départ de toute simulation est un modèle mathématique qui décrit les phénomènes physiques du processus étudié. Une fois ce modèle élaboré, un algorithme numérique de calcul peut être mis en œuvre.

Ces deux outils sont aussi importants que l'ordinateur lui-même. Impossible, par exemple, de mesurer le champ électromagnétique dans un transformateur à l'aide d'un modèle atomique, même avec le plus rapide des supercalculateurs ; l'appareil comporte bien trop d'atomes ! À la place, on construit un modèle en moyennant le comportement

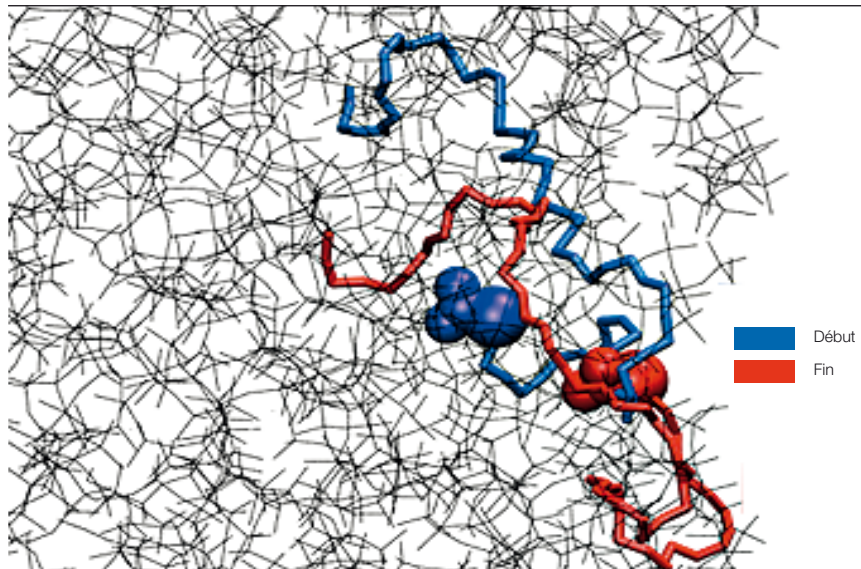
des atomes et des électrons pour en déduire les propriétés du matériau. Cette description, couplée aux équations fondamentales de l'électromagnétisme (Maxwell), débouche sur un modèle adapté à la simulation des champs électromagnétiques dans un transformateur.

Mais ce n'est pas tout. Après avoir choisi un modèle adéquat offrant un bon niveau de simplification, il faut « dire » à l'ordinateur comment le calculer, ce qui revient à sélectionner et à implanter un algorithme de résolution des équations mathématiques constituant le modèle physique : c'est l'« approche numérique », dont la méthode des éléments finis (MEF) est un exemple. Elle est garante de la précision, de la rapidité et de la robustesse du calcul. Une bonne méthode dépend donc du problème étudié et d'une judicieuse combinaison de modèle physique, d'algorithme numérique et de matériel.

Les problèmes de mécanique des structures, de dynamique des fluides et de calcul de champ électromagnétique sont le lot habituel des simulations numériques en ingénierie. Les codes commerciaux ou libres donnent souvent satisfaction. Par contre, les simulations de processus spécifiques requièrent le développement de méthodes de calcul propres à l'entreprise, aux trois niveaux précités : modélisation, algorithmique, matériel.

Les ingénieurs ABB emploient les outils les plus performants et les modèles les plus puissants pour concevoir les meilleurs produits.

3 Simulation de dynamique moléculaire



Orientation initiale et finale d'une molécule chargée près de la surface d'un isolant PDMS ; en configuration finale, le groupe chargé pénètre plus profondément dans la masse.

Les propriétés de matériaux ou géométries spéciales compliquent la tâche. Pour cela, le calcul multiphysique, qui résout de front les équations de plusieurs paramètres physiques, suscite un intérêt croissant qui a d'ailleurs amené les fournisseurs à intégrer le « multiphysique couplé » à leurs logiciels, surtout pour les principales combinaisons de phénomènes physiques rencontrées dans l'industrie, comme les interactions fluide-structure. Pour d'autres, notamment les processus d'arc mêlant dynamique des fluides et électromagnétisme dans les produits ABB, il n'y a guère de solutions « sur étagère » efficaces... ni même de solutions du tout.

Les domaines classiques ayant recours aux méthodes basées sur le maillage, comme la MEF, coexistent aujourd'hui avec des méthodes de calcul et des modèles physiques destinés aux processus moléculaires ou atomiques, dont les plus connus sont la théorie de la fonctionnelle de la densité DFT (*Density Functional Theory*) et la dynamique moléculaire. Même si ces outils de haut vol ne devraient pas occuper une place aussi importante chez ABB que dans l'industrie pharmaceutique, l'ambition est de les appliquer à la résolution des grandes interrogations de la science des matériaux. L'isolation des réseaux en courant alternatif et continu à haute tension (HT), notamment, en tire aujourd'hui parti pour donner une vue plus « microscopique » du transport électrique et

d'autres processus dynamiques. Une application concrète de la dynamique moléculaire a récemment été développée en collaboration avec la recherche IBM : le calcul de la diffusion des molécules légères du PDMS (polymère organominéral de la famille des siloxanes) a permis d'expliquer une nette reconstitution de l'hydrophobicité en surface du matériau, cruciale pour la stabilité et la longévité de l'isolation des câbles d'extérieur HT. On a ainsi pu simuler l'orientation et la polarisation des molécules → 3 avec des groupes méthyles à la surface de l'isolant. Le phénomène explique la perte d'hydrophobicité superficielle en cas d'oxydation mais aussi le rétablissement de cette propriété par une interaction particulière des molécules de cyclométhicone (famille des silicones), des groupes méthyles oxydés et des ions Na+.

ABB trace la voie

Si l'informatique en nuage (*cloud computing*) et le calcul GPU tardent à percer dans le domaine de la simulation numérique, la parallélisation sur machines multicœurs fédérées en clusters y joue déjà un rôle décisif.

Pour les différentes équipes d'une entreprise, le partage des matériels et logiciels est un moyen facile et économique d'accéder aux dernières ressources technologiques et matérielles de la simulation. Cela se concrétise chez ABB par un échange efficace des résultats

de la recherche-développement et des meilleures pratiques entre ses centres de recherche et ses divisions opérationnelles.

Les études de marché sont unanimes : les groupes industriels qui sortent du lot associent immanquablement la simulation numérique avancée à leur développement produit. ABB emploie les méthodes et les modèles les plus performants pour doter ses clients des meilleurs produits. Pour ce qui est de la simulation adaptée aux besoins du Groupe, inutile de réinventer la roue ! Les outils sont là. Ce qui n'empêchera pas nos scientifiques d'ouvrir de nouvelles pistes d'innovation partout où la technologie ABB prédomine.

Bartosz Dobrzelecki

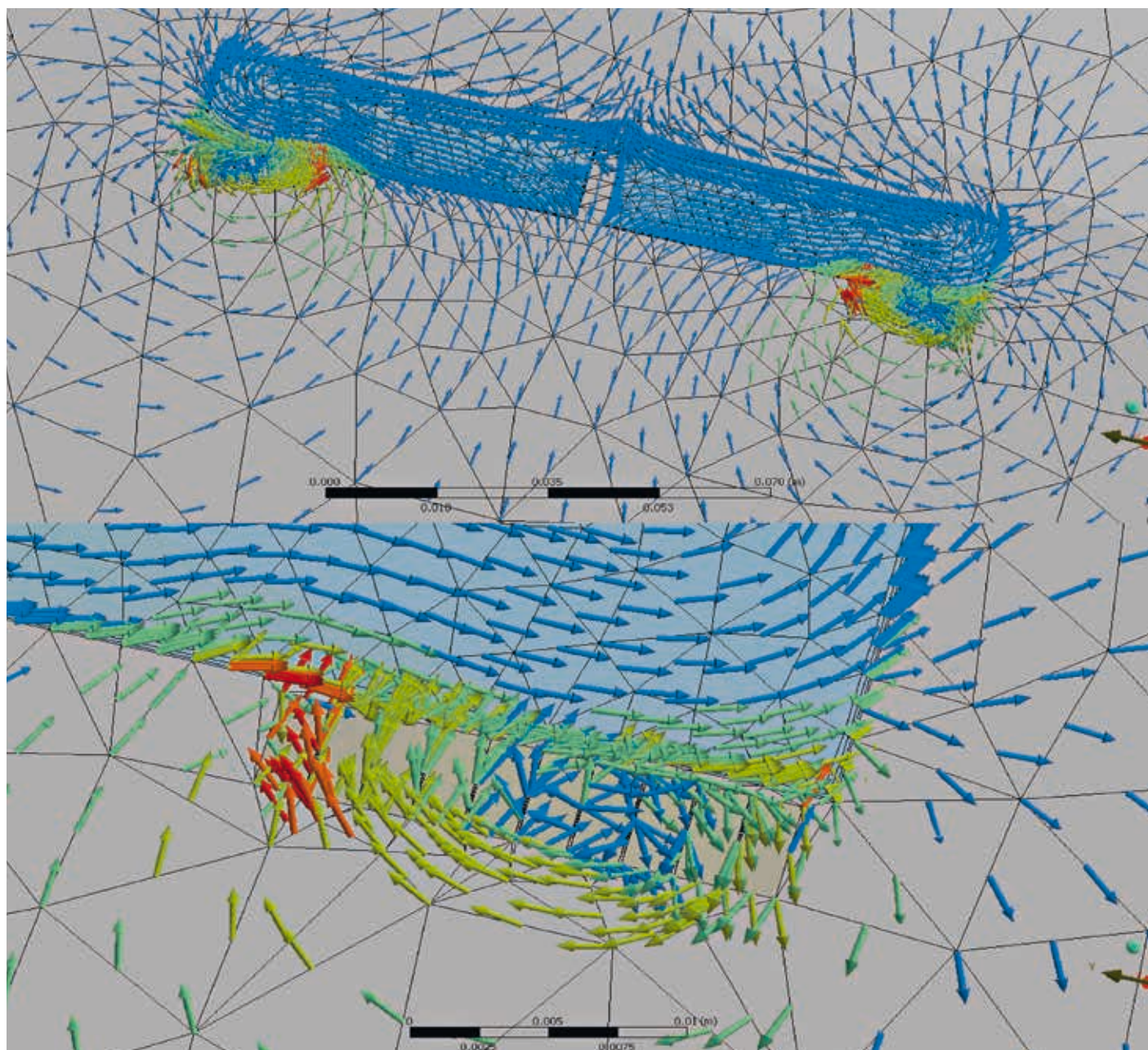
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
bartosz.dobrzelecki@pl.abb.com

Oliver Fritz

Jörg Ostrowski
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
oliver.fritz@ch.abb.com
joerg.ostrowski@ch.abb.com

Peter Lofgren

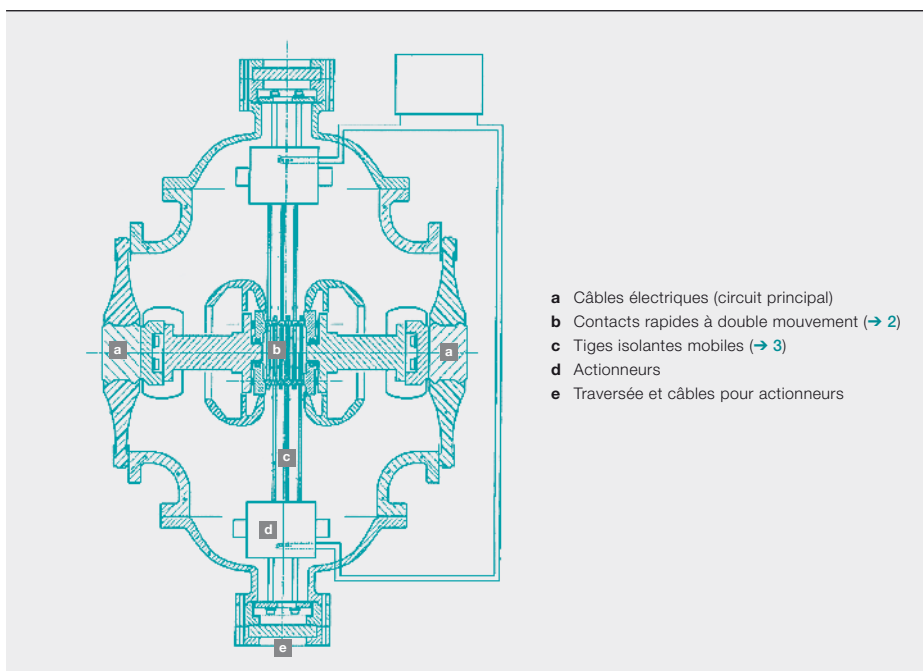
Ola Widlund
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)
peter.lofgren@se.abb.com
ola.widlund@se.abb.com



Élan d'ouverture

30 fois plus rapide
qu'un battement de cil :
ABB simule l'extrême
dans un disjoncteur
CCHT

DANIEL OHLSSON, JAKUB KORBEL, PER LINDHOLM, UELI STEIGER, PER SKARBY, CHRISTIAN SIMONIDIS, SAMI KOTILAINEN – L'une des innovations ABB les plus remarquables de ces dernières années a été son disjoncteur hybride CCHT, dernier tremplin vers la réalisation de réseaux en courant continu à haute tension et l'intégration accrue des énergies renouvelables. La portée du dispositif et ses fondements technologiques ont déjà fait les titres de précédents numéros d'*ABB Review*¹. Voyons ici l'un de ses composants critiques, le sectionneur ultrarapide, et les apports de la simulation avancée pour le développer.



Si le CCHT est surtout synonyme de transport d'énergie longue distance ou sous-marin, sur des liaisons à ce jour toutes point à point, leur interconnexion et, *in fine*, la construction de

faibles impédances du réseau CCHT, il lui faut être près de dix fois plus vélocité que son cousin alternatif. Autre handicap: l'absence de passage par le zéro de courant.

La solution ABB tient dans un disjoncteur CC hybride² qui associe la technologie des semi-conducteurs (pour une coupure quasi instantanée du courant) à un interrupteur mécanique ultrarapide.

Les courants de défaut en CCHT peuvent rapidement augmenter à cause des faibles impédances du réseau. Le disjoncteur CCHT doit par conséquent être près de dix fois plus vélocité que son homologue alternatif.

Descriptif

Le sectionneur ultrarapide d'ABB doit être capable de basculer, en quelques millisecondes, de l'état de conducteur de courant à celui d'isolant haute tension (HT). Cet interrupteur HT est logé

grands réseaux CCHT confirmeront les attraits de la technologie. Reste un obstacle de taille: l'absence de disjoncteur CCHT à la hauteur des enjeux!

dans une enveloppe métallique → 1 remplie d'un gaz isolant comprimé, à laquelle

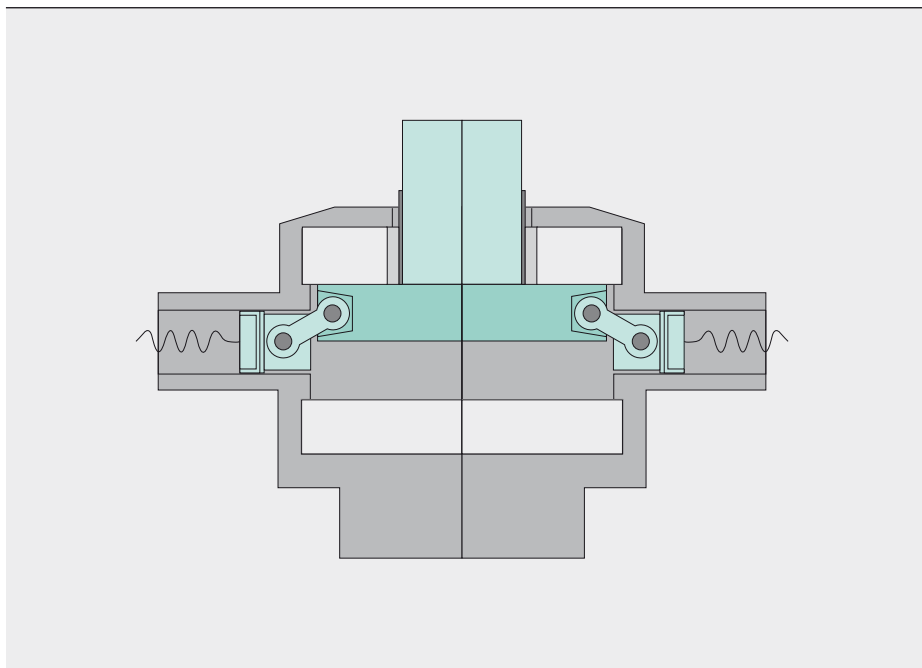
Ce disjoncteur doit en effet relever bien des défis techniques. Les courants de défaut augmentant très vite du fait des

Photo p. 27

Distribution de densité de flux à l'intersection de la bobine et du poussoir

Notes

- 1 Lire « La revanche d'Edison », *Revue ABB*, 1/2013, p. 6, et « Montée en charge : le nouveau disjoncteur hybride d'ABB fiabilise les réseaux en courant continu à haute tension », *ABB Review*, 2/2013, p. 7-13.
- 2 Hafner, J., Jacobson, B., « Proactive hybrid HVDC breaker – a key innovation for reliable HVDC grids », CIGRÉ, Symposium de Bologne (Italie), n° 264, p. 1-9, septembre 2011.



Le sectionneur ultrarapide d'ABB doit pouvoir basculer, en quelques millisecondes, de l'état de conducteur de courant à celui d'isolant haute tension.

sont raccordés les deux câbles d'arrivée → 1a, par l'intermédiaire de traversées elles-mêmes connectées à un parcours de courant interne jalonné d'isolateurs. Un système de contacts rapides à double mouvement → 1b assure la commutation active → 2.

Ce dernier, constitué de plusieurs segments, est inséré dans des tiges isolantes mobiles → 1c, elles-mêmes couplées à des actionneurs à bobines de Thomson → 1d. Ce principe autorise une très forte accélération, presque instantanée, des contacts. Les actionneurs manœuvrent perpendiculairement au parcours du courant, leurs bobines d'ouverture et de fermeture étant reliées en série pour synchroniser le déplacement. Ils sont équipés de mécanismes à ressorts bistables pour bien définir les positions ouverte et fermée. Totalement confinés dans le boîtier, ils sont reliés à une unité distincte de stockage d'énergie, au moyen de traversées et de câbles étanches au gaz → 1e.

Simulation multi-ingénierie

Qui dit simuler un disjoncteur implique de modéliser plusieurs physiques. Certaines peuvent être dissociées, en l'absence d'influence mutuelle significative (champs électriques et contraintes mécaniques, par exemple), quand d'autres interagissent fortement et font tout l'intérêt de la « simulation multiphysique ». Cet article porte précisément sur les interac-

tions de la mécanique, de la physique des gaz et de l'électrodynamique.

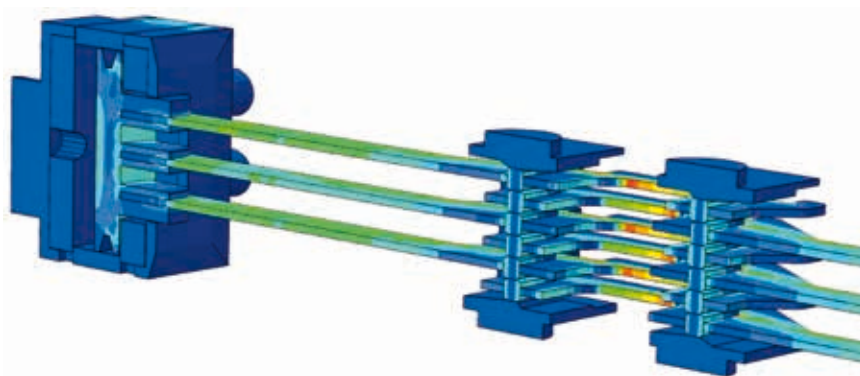
Modélisation

Les différentes méthodes de simulation peuvent globalement se rattacher à deux grands types de modèles, par « éléments finis » (EF) et « globaux ». Les premiers sont les plus précis, grâce à leur géométrie détaillée. Les seconds décrivent souvent assez bien le système étudié, et ce dans des temps de simulation beaucoup plus courts (quelques secondes au lieu d'heures ou même de jours). Leur développement demande néanmoins plus de travail car il faut tout simplifier et adapter en conséquence. De son côté, la méthode par éléments finis (MEF) nécessite la formulation des éléments et met beaucoup l'accent sur la construction et le maillage du modèle. Choisir la bonne méthode est donc une affaire de compromis entre temps de modélisation, temps de simulation et précision.

Mécanique

Le modèle de simulation mécanique comporte une cinquantaine de pièces. Leur géométrie CAO permet de créer un maillage optimal et performant de quelque 150 000 éléments et 200 000 nœuds, particulièrement fin à la surface des contacts. Compte tenu de la grande vitesse de manœuvre du dispositif et des interactions complexes des pièces de contact, ABB opta pour une méthode

La géométrie CAO du modèle permet de créer un maillage optimal de quelque 150 000 éléments et 200 000 nœuds.



d'intégration temporelle explicite. La simulation de l'ensemble dura plusieurs heures.

Première étape : les boulons et ressorts prétendus sont mis dans leur état initial. Puis la charge de la bobine de Thomson est appliquée sous la forme d'une force induite sur la zone de l'armature faisant face à la bobine. Côté opposé, face au sens de déplacement, une force d'amortissement est appliquée en fonction de la vitesse et de la position de l'armature.

Les simulations permettent d'étudier, d'évaluer et d'analyser des grandeurs telles que déformations, pressions de contact, déplacements, vitesses et accélérations → 3.

Amortisseur à gaz

La forte accélération du système de contacts doit être suivie d'une décélération sur une très courte distance.

Un bon moyen de dissiper cette énergie cinétique est d'utiliser un amortisseur à gaz, avantageux par sa grande densité de puissance, son faible encombrement et l'absence de pièces en mouvement. Sachant que la commande du sectionneur baigne dans l'hexafluorure de soufre (SF_6) sous pression, on peut tout naturellement utiliser ce gaz. La force d'amortissement est obtenue en contrôlant la fuite de gaz pour produire une différence de pression sur le poussoir. Reste à arrêter ce mouvement sans impact ni rebond → 4.

Le dimensionnement correct d'un amortisseur à gaz se fait forcément par itération. L'évolution possible des exigences en cours de développement du produit oblige à renouveler l'opération plusieurs fois. D'où le choix d'une modélisation par modèles globaux.

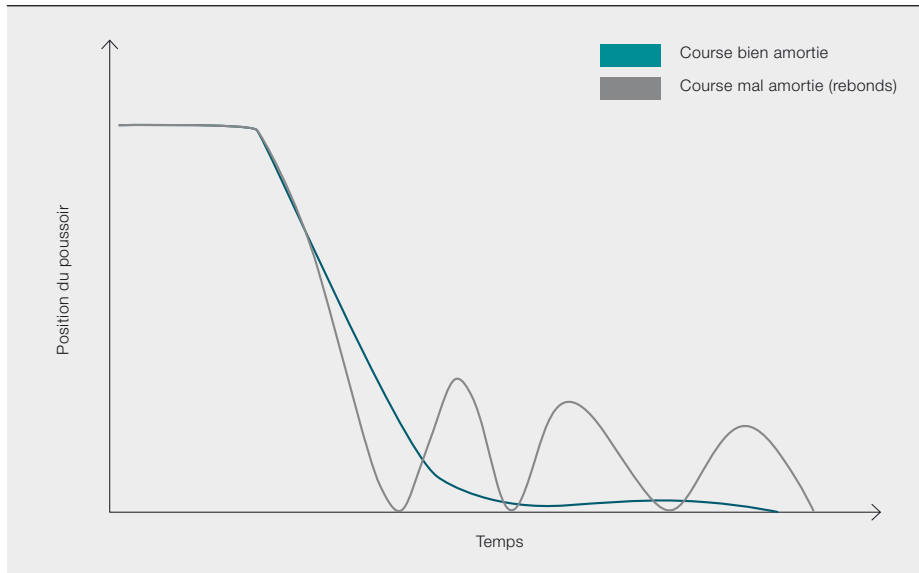
Autre difficulté de la conception : obtenir un bon amortissement pour les manœuvres à la fois d'ouverture et de fermeture, sans dissipation d'énergie en cours d'accélération.

Le dimensionnement de l'amortisseur se fit par optimisation multiobjectif pour identifier les arbitrages entre courbes de Pareto optimales et trouver ainsi le meilleur compromis, en fonction des exigences.

Commande à effet Thomson

L'effet Thomson utilise l'inductance mutuelle entre deux conducteurs électriques, laquelle crée un important champ magnétique variable dans le temps, qui entraîne à son tour une force de répulsion (Lorentz) entre conducteurs, lors d'un court-circuit bref mais important → 5.

Un actionneur à bobine de Thomson fonctionne selon le principe de décharge d'un condensateur dans une bobine électrique qui induit des courants de Foucault dans une plaque d'aluminium ; la force de Lorentz produite entre la bobine et la plaque accélère le mécanisme raccordé à cette dernière.



Une difficulté majeure de la conception est d'obtenir un bon amortissement pour les manœuvres d'ouverture et de fermeture, sans dissipation d'énergie en accélération.

La simulation multiphysique couplée (électromagnétisme, thermique et mécanique) mit en œuvre deux méthodes à visées différentes. L'analyse 3D par éléments finis fut appliquée avec des modèles électromagnétiques exécutés dans les logiciels du commerce pour capter les effets détaillés des champs électriques et magnétiques transitoires (y compris les phénomènes thermiques), mais en se contentant d'un modèle global simplifié de la plaque mobile. La résolution visualise le processus de diffusion du champ magnétique, des courants de Foucault variables dans le temps et des pertes associées.

Co-simulation

Ces modèles de simulation furent ensuite couplés en co-simulation pour résoudre la totalité du problème et capter les influences mutuelles. Un programme de couplage assure les échanges de variables d'état entre logiciels → 6. L'analyse complète ne durant que 10 ms, un pas de couplage de 0,01 ms fut choisi pour assurer la stabilité numérique et limiter la perte d'informations.

Commande

Dans le couplage électrique-mécanique, les variables d'interfaçage sont l'énergie de commande électromagnétique et la position du poussoir. Le modèle électromagnétique global calcule l'énergie de manœuvre agissant sur le poussoir et la transmet au modèle EF à

chaque pas de couplage. Ce dernier calcule alors l'accélération du poussoir et la distance entre poussoir et bobine. L'état de la position est renvoyé au modèle global à chaque intervalle d'échange, permettant la prédiction précise du déplacement.

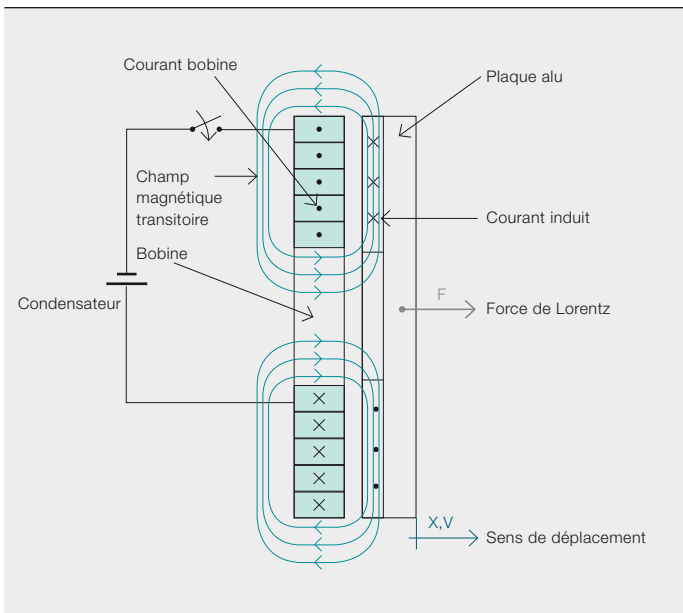
Amortissement

Dans le couplage fluide-mécanique, les variables d'interfaçage sont la force d'amortissement et la position de l'amortisseur. Le modèle EF fournit l'état de la position de l'amortisseur à chaque intervalle d'échange. Le modèle fluide-dynamique global calcule de façon

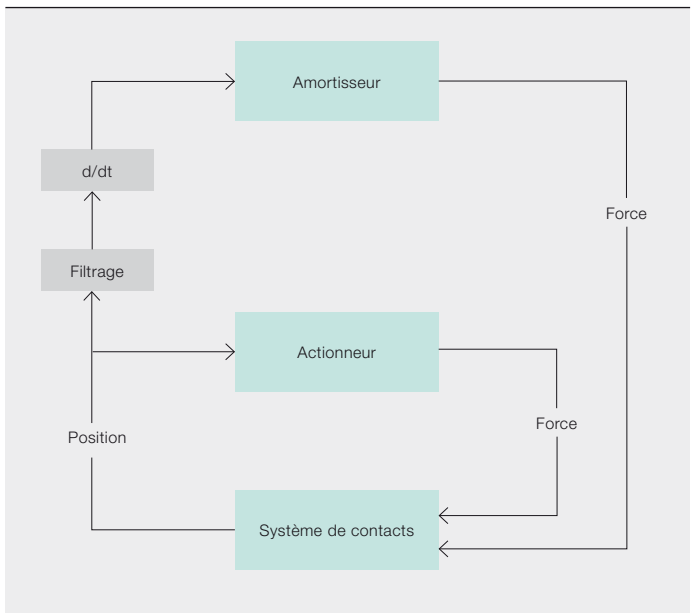
Simuler un disjoncteur ne va pas sans modélisation multiphysique.

En plus de l'analyse EF coûteuse en ressources de calcul, un modèle global simplifié du système électro-thermodynamique fut créé pour permettre la co-simulation avec des modèles de mécanique des structures plus compliqués. Les équations magnétiques complexes furent alors réduites à des équations différentielles ordinaires, couplées par inductance mutuelle, ce qui revint à simplifier le problème d'équations différentielles partielles en un problème d'électromagnétisme statique.

5 Représentation schématique des bobines de Thomson et des champs électromagnétiques



6 Logigramme de co-simulation



L'effet Thomson exploite l'inductance mutuelle de deux conducteurs électriques, qui crée entre eux une importante force de répulsion (Lorentz).

transitoire les rapports pression/volume et renvoie au modèle EF la charge d'amortissement sur la partie concernée.

Mesure vibratoire

Le vibromètre laser à effet Doppler est un capteur optique destiné à mesurer avec précision la vitesse et le déplacement des vibrations émises par un point fixe. Cette technique sert à tester le disjoncteur d'ABB; l'émission d'un faisceau laser dans l'enveloppe remplie de SF₆, par un orifice de visée, permet en effet d'enregistrer la position et la vitesse avec une grande précision, et même d'identifier les mouvements structurels de chaque pièce de la cinématique.

Un exemple d'enregistrement expérimental de la course et de la vitesse par vibromètre → 7 affiche des courbes

lisses, même sans filtrage. La courbe de vitesse → 7b caractérise les oscillations à une gamme de fréquences plus élevée, montrant ainsi le comportement vibratoire de la structure → 8; l'important changement de vitesse traduit les énormes forces d'accélération agissant sur le système.

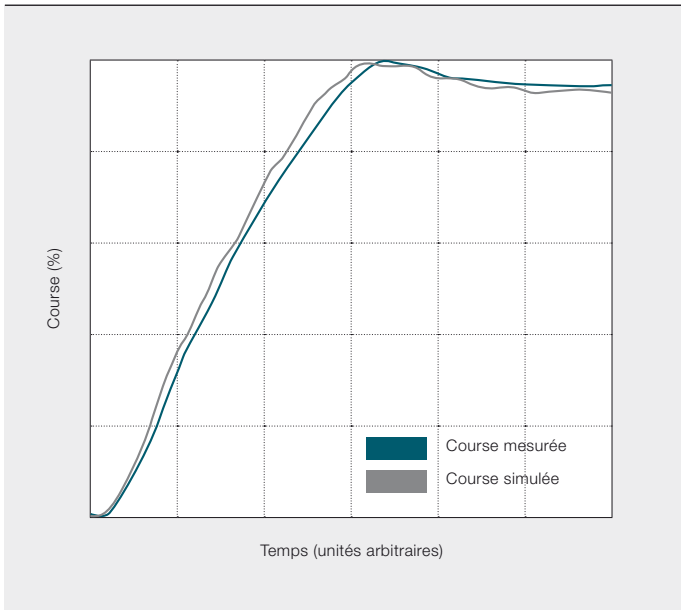
Validation

Le logiciel de simulation a beaucoup aidé à visualiser le comportement des contacts pour en réduire les effets.

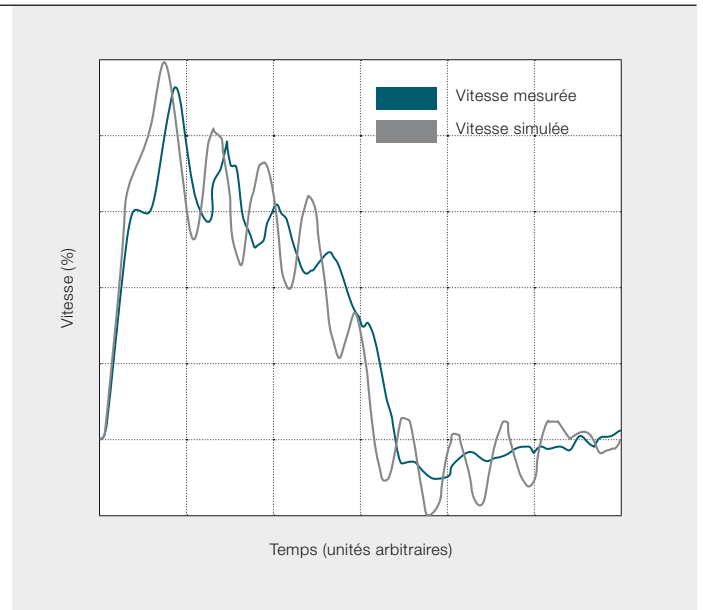
La partie la plus délicate du système, d'un point de vue mécanique, est la liaison entre les plaques isolantes et le poussoir (pièce manœuvrée). Toutes les charges (commande et amortissement) ayant été intégrées dans la co-simulation, les points sujets à défaillances furent localisés et la conception fut améliorée pour les éviter.

Des résultats concluants

L'accélération du développement produit rend la simulation avancée multi-ingénierie indispensable. L'ubiquité des puissantes ressources de calcul a permis de mener des simulations à un niveau de fidélité bien supérieur à celui du passé. Non seulement ces outils complètent le travail expérimental réalisé sur des prototypes physiques, mais ils ouvrent considérablement l'espace de conception. Après avoir défini la fidélité requise du modèle et suffisamment corrélé les mesures expérimentales et les résultats de

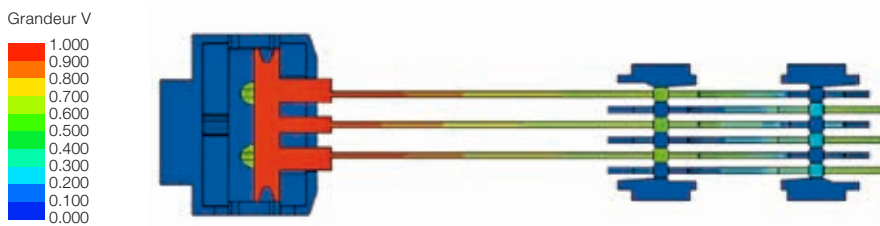


7a Course



7b Vitesse

8 Vitesse de propagation de l'onde dans le système



Les équations magnétiques complexes sont ramenées à des équations différentielles ordinaires, couplées par inductance mutuelle.

la simulation, l'étape suivante peut inclure l'optimisation numérique des modèles pour mener simultanément les variables de conception vers de multiples objectifs. La pluridisciplinarité du génie électrique et de l'automatisation (électricité, mécanique, techniques de calcul) fera de la simulation avancée un outil prépondérant du développement produit.

Daniel Ohlsson

Jakub Korbel

Ueli Steiger

Sami Kotilainen

ABB High Voltage Products

Baden (Suisse)

daniel.ohlsson@ch.abb.com

jakub.korbel@ch.abb.com

ueli.steiger@ch.abb.com

sami.kotilainen@ch.abb.com

Per Lindholm

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

per.o.lindholm@se.abb.com

Per Skarby

ABB High Voltage Products

Zurich (Suisse)

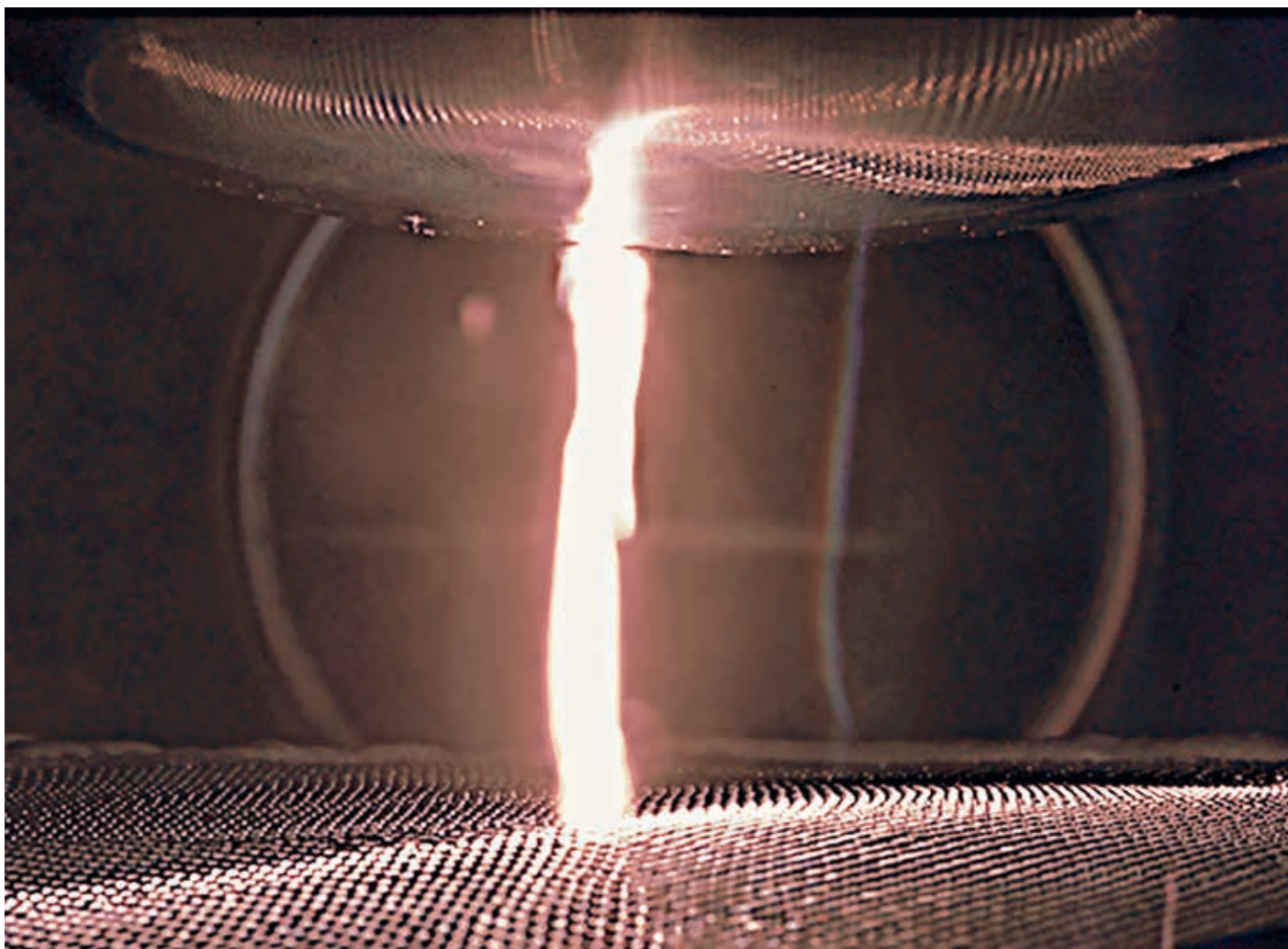
per.skarby@ch.abb.com

Christian Simonidis

ABB Corporate Research

Ladenburg (Allemagne)

christian.simonidis@de.abb.com

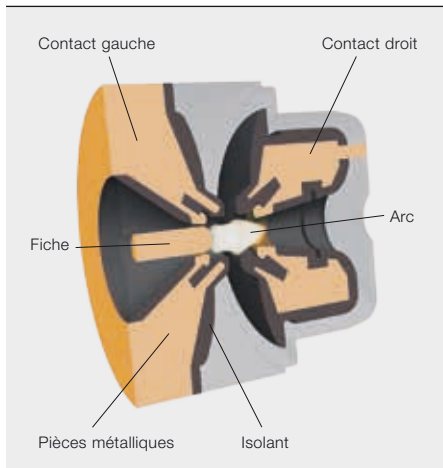


Plus vite que l'éclair

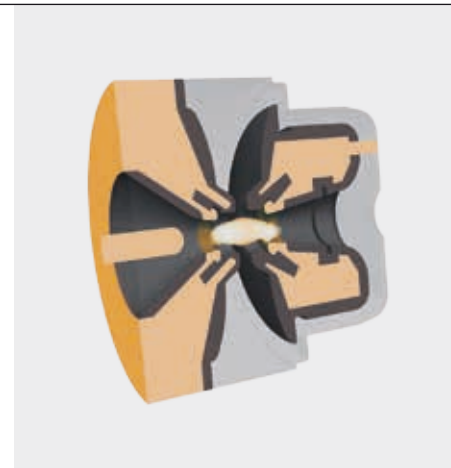
Simulation d'arcs électriques dans les disjoncteurs

JÖRG OSTROWSKI, MAHESH DHOTRE, BERNARDO GALLETTI, RUDOLF GATI, LUCA GHEZZI, MICHAEL SCHWINNE, XIANGYANG YE – Dans chaque pays, les réseaux de production, de transport et de distribution d'électricité quadrillent presque tout le territoire pour assouvir notre soif d'énergie. Les dispositifs de commutation et de coupure des énormes tensions et courants transités comptent parmi les maillons essentiels de la chaîne électrique. La chambre de coupure en est la pièce maîtresse : c'est en effet là que le circuit

électrique s'ouvre et se ferme, mais aussi que les arcs mettent au défi le concepteur d'adapter l'appareil standard aux conditions physiques extrêmes. Prévoir le comportement du plasma formé par l'arc est aujourd'hui l'une des tâches de simulation les plus délicates pour les ingénieurs ABB. Les fabuleux progrès récemment accomplis dans ce domaine permettent de prédire de nombreux aspects du comportement de l'arc ainsi que son impact sur les disjoncteurs.



1a La fiche se déplace vers la gauche et sépare les contacts de droite et de gauche.



1b La fiche se rétracte, le disjoncteur s'ouvre complètement et l'arc brûle entre les contacts.

L'exemple d'arc électrique le plus connu est l'éclair qui illumine le ciel pendant un orage. L'arc qui se crée à l'ouverture ou la fermeture des contacts d'un disjoncteur repose sur les mêmes principes physiques, quoiqu'à une échelle bien inférieure : un tunnel de gaz ionisé conducteur extrêmement chaud se forme et est traversé par un courant électrique, que le disjoncteur a justement pour vocation d'éteindre.

Les conditions dans l'arc et à son voisinage sont extrêmes, avec une température qui dépasse aisément 20 000 °C et, dans certains cas, une pression dans la chambre de coupure atteignant 70 bar. Ces phénomènes complexes restreignent énormément la portée des mesures et rendent la conception du produit très difficile et laborieuse. Dans ce contexte, la simulation numérique est un outil de choix pour à la fois étudier l'arc et ses effets physiques dans la chambre de coupure, et orienter le développement des disjoncteurs.

Photo p. 34

Image vidéo d'un arc de disjoncteur : les conditions physiques extrêmes dans lesquelles se produit l'arc mettent les concepteurs au défi de toujours mieux comprendre et simuler son comportement et son évolution.

Cette simulation doit prendre en compte un grand nombre de processus physiques, à diverses échelles. La chaleur extrême de l'arc dégage de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, que le gaz environnant transfère en partie à la chambre de coupure. L'arc s'échauffe et vaporise le matériau des parois qu'il éjecte dans la chambre. Les ions générés dans l'arc chauffent aussi les surfaces et vaporisent les contacts du disjoncteur ; cette vapeur métallique se mélange alors aux éléments gazeux de la chambre.

Simuler ces processus multiphysiques complexes à grande échelle n'est guère aisé et a nécessité des années de recherches physiques et numériques pour mettre au point des méthodes de calcul appropriées. Les progrès rapides de l'informatique et du calcul intensif ont été décisifs : les simulations se déroulent aujourd'hui souvent sur des stations de travail multicœurs ou fédérées en grappes (clusters) haute performance. Cette évolution permet de simuler avec succès les phénomènes d'arc dans divers types de disjoncteurs.

Disjoncteurs d'alternateur

Le disjoncteur d'alternateur HEC 9 d'ABB est le plus grand disjoncteur au SF₆ au monde. Capable d'interrompre un courant assigné de court-circuit de 250 kA, il trouve sa place dans des centrales électriques produisant jusqu'à 1,8 GW. En cours de manœuvre, l'arc libère en très peu de temps une quantité phénoménale d'énergie dans la chambre de coupure.

La surpression extrême qui l'accompagne est déterminée par le courant d'arc, mais aussi par la tension d'arc qui dépend elle-même de la forme et de la température de l'arc. Cette pression pouvant détruire les équipements, il faut simuler avec précision les régimes d'écoulement et les forces électromagnétiques qui jouent sur la forme de l'arc. Simuler le rayonnement émis est tout aussi important, puisqu'il s'agit du principal mécanisme de refroidissement de l'arc.

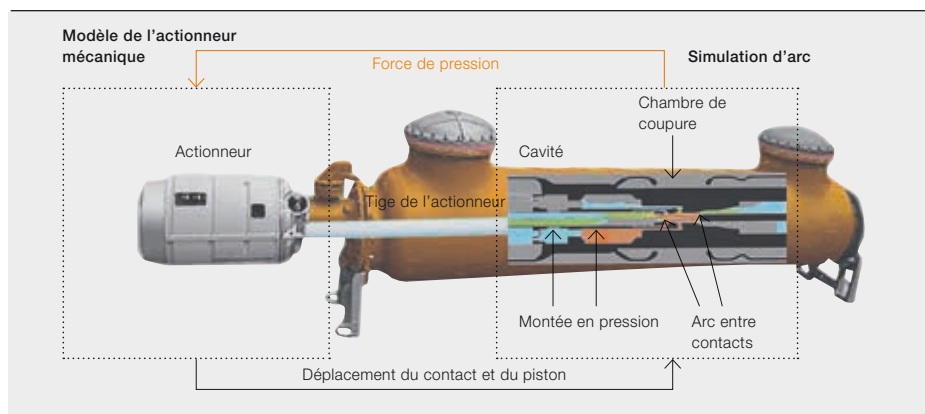
Dans la chambre de coupure du disjoncteur HEC 9 → 1, une fiche relie les contacts électriques lorsque ce dernier est fermé. L'arc apparaît entre la fiche et le contact de droite au moment où celle-ci se détache du contact → 1a ; il commute ensuite vers le contact de gauche quand la fiche s'en sépare. Le disjoncteur est complètement ouvert lorsque la fiche s'est rétractée, et l'arc brûle entre les deux contacts → 1b. Notons que l'arc n'est pas axisymétrique ; il fluctue et forme des boucles, notamment autour du zéro de courant. En conséquence, la tension d'arc et la pression dans la chambre de coupure fluctuent aussi. Les valeurs de pression données par la simulation coïncident à ±10 % avec les valeurs mesurées.

Co-simulation mécanique de disjoncteurs haute tension (HT) à isolation gazeuse

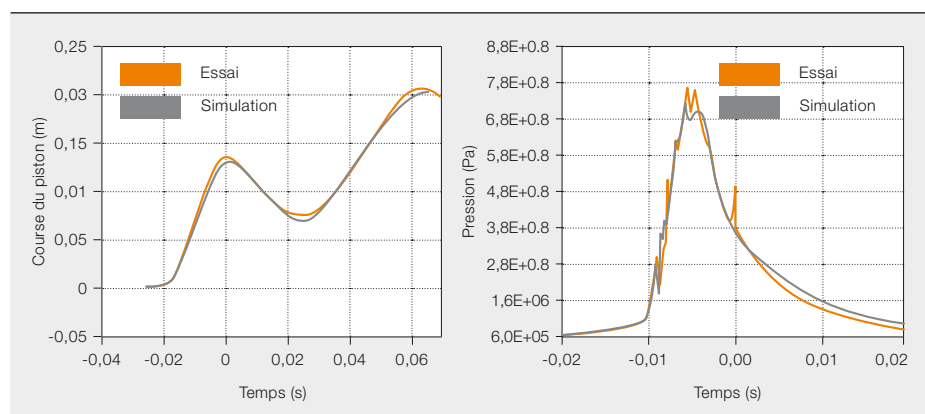
Les disjoncteurs HT assurent la protection et la commande des réseaux de transport électrique. Si les niveaux de

Simuler l'arc et ses effets physiques dans la chambre de coupure est crucial pour le développement des disjoncteurs.

2 Simulation d'un disjoncteur HT à isolation gazeuse



2a Couplage simulation d'arc-simulation mécanique de l'actionneur



2b Comparaison d'un essai et d'une simulation de la montée en pression et du déplacement du piston de soufflage

puissance et les courants de court-circuit ne sont pas aussi extrêmes que ceux observés dans les disjoncteurs d'alternateur, le champ électrique atteint vite des valeurs très élevées, peu après la coupure. Pendant la régénération diélectrique, le gaz chaud entre les contacts d'arc doit rapidement être évacué par un fort écoulement gazeux pour éviter que le champ électrique ne pose problème.

ABB propose des disjoncteurs HT jusqu'à 1100 kV avec des courants assignés de coupure de court-circuit atteignant 90 kA. Pour prédire un claquage diélectrique causé par les forts champs électriques, il faut simuler la température et la densité des gaz ainsi que le champ électrique peu après la coupure. Il importe à cette fin de prédire avec précision la position des électrodes dont le déplacement dépend de l'interaction de la pression générée par l'arc et de l'actionneur mécaniquement couplé à la chambre de pression.

C'est pour ce type de coupure qu'ABB a inventé les disjoncteurs à autosoufflage → 2, dans lesquels l'énergie thermique de l'arc sert à produire un gaz sous haute pression, mais relativement froid, qui souffle l'arc.

Pendant les manœuvres de fermeture-ouverture, le gaz chaud se mélange au gaz froid de la chambre. Ce mélange reflue ensuite vers la zone d'arc pour assurer la coupure du courant et la régénération diélectrique des contacts. Le phénomène dure de 10 à 40 milli-secondes. Une simulation couplée des physiques de l'arc et de l'actionneur mécanique permet de prédire avec précision la montée en pression, la tension d'arc, le mélange des gaz dans le volume fixe et le profil d'écoulement dans le dispositif complet : des informations cruciales pour la conception et le développement d'un disjoncteur.

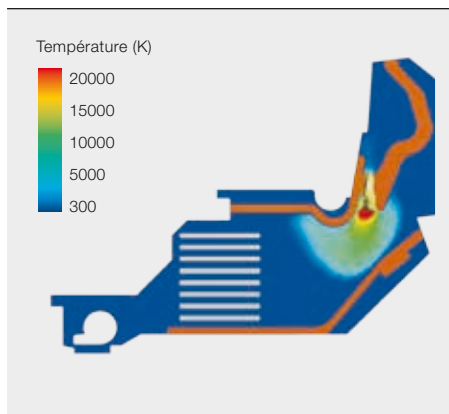
De plus, comme la pression générée dans la chambre risque de ralentir ou d'inverser le déplacement des contacts, celui-ci est amplifié par des actionneurs

hydrauliques ou à ressorts. Cette co-simulation mécanique permet de concevoir un actionneur sans cahier des charges trop strict, tout en satisfaisant à toutes les exigences des clients et des essais de type en matière de vitesse de séparation.

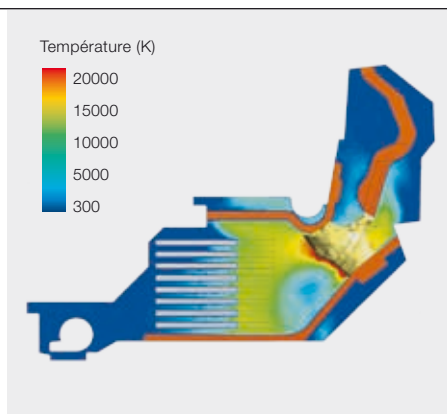
Déplacement d'arc dans les disjoncteurs basse tension (BT)

Paradoxalement, les disjoncteurs BT sont les plus difficiles à simuler ! Des phénomènes supplémentaires entrent en jeu, comme le déplacement de l'arc le long des électrodes ou rails, l'interaction des matériaux ferromagnétiques et des champs magnétiques produits par l'arc, ou de l'arc et du circuit externe. Ce dernier phénomène est particulièrement important puisque les disjoncteurs BT sont, par nature, des limiteurs de courant. Ils accumulent une tension comparable à la tension réseau, ce qui maintient le courant électrique sous des valeurs critiques et permet de déclencher la coupure bien avant le passage naturel par zéro du courant.

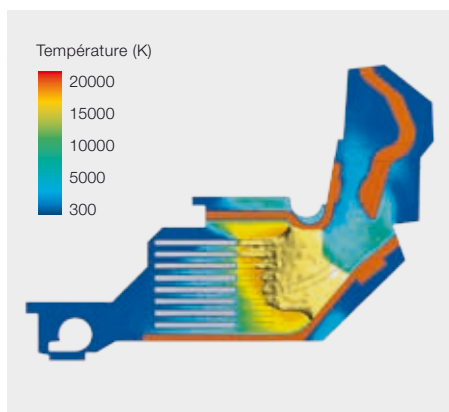
3 Simulation transitoire d'un essai de court-circuit BT : la température du gaz est représentée par le gradient bleu-rouge, et l'arc par l'isosurface blanc-jaune indiquant la densité de courant.



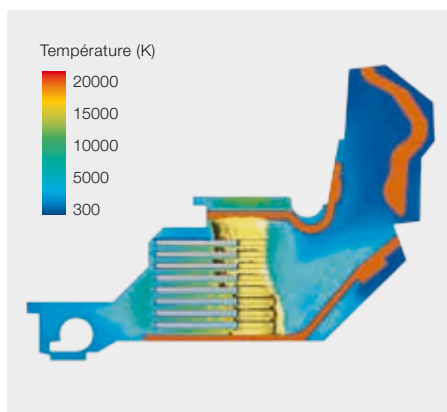
3a



3b



3c



3d

Il est indispensable de simuler avec précision les régimes d'écoulement et les forces électromagnétiques qui influent sur la forme de l'arc.

Pour limiter le courant, on augmente la tension d'arc en supprimant les matériaux polymères du boîtier et en découpant l'arc en petits tronçons, ce qui ajoute du gaz froid au plasma et réduit ainsi sa température. Le refroidissement est encore amélioré en tronçonnant l'arc et en augmentant la surface métallique pour absorber l'énergie d'arc. Ce découpage n'est possible que si l'arc est transféré de son point d'amorçage à la chambre d'arc. Le champ magnétique généré par l'arc sert à éloigner ce dernier des contacts nominaux. La force motrice est accrue par le matériau ferromagnétique (généralement des plaques d'acier) qui concentre et renforce le champ.

Simuler un arc dans un disjoncteur BT revient à reproduire les différentes étapes de sa « vie » : amorçage (expansion entre les contacts qui s'écartent → 3a), commutation vers les spires conductrices → 3b le long d'une colonne mue par la force magnétique et le gradient de pression → 3c, déplacement jusqu'aux ailettes métalliques qui tronçonnent le plasma d'arc et favorisent son extinc-

tion → 3d. La coupure du courant dans un disjoncteur BT résulte donc d'une interaction complexe de nombreux phénomènes physiques qui surviennent en quelques millisecondes. Cette simulation a porté sur le récent développement du disjoncteur différentiel électronique DSN200 d'ABB, protégé contre les surcharges.

Perspectives

Les simulations d'arc électrique, en appui de la conception des disjoncteurs, remplacent souvent des essais très coûteux et longs, voire impossibles, mais qui restent irremplaçables. Pour s'en affranchir, il faut perfectionner les modèles physiques, augmenter les vitesses de calcul et mieux connaître les matériaux.

Au-delà de la conception de matériels électriques, la simulation d'arc permet d'approfondir notablement la compréhension physique du phénomène pour développer de nouveaux concepts de coupure.

Jörg Ostrowski

Michael Schwinne

Bernardo Galletti

Rudolf Gati

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

joerg.ostrowski@ch.abb.com

michael.schwinne@ch.abb.com

bernardo.galletti@ch.abb.com

rudolf.gati@ch.abb.com

Xiangyang Ye

Mahesh Dhotre

ABB Power Products, High Voltage Products

Baden (Suisse)

xiangyang.ye@ch.abb.com

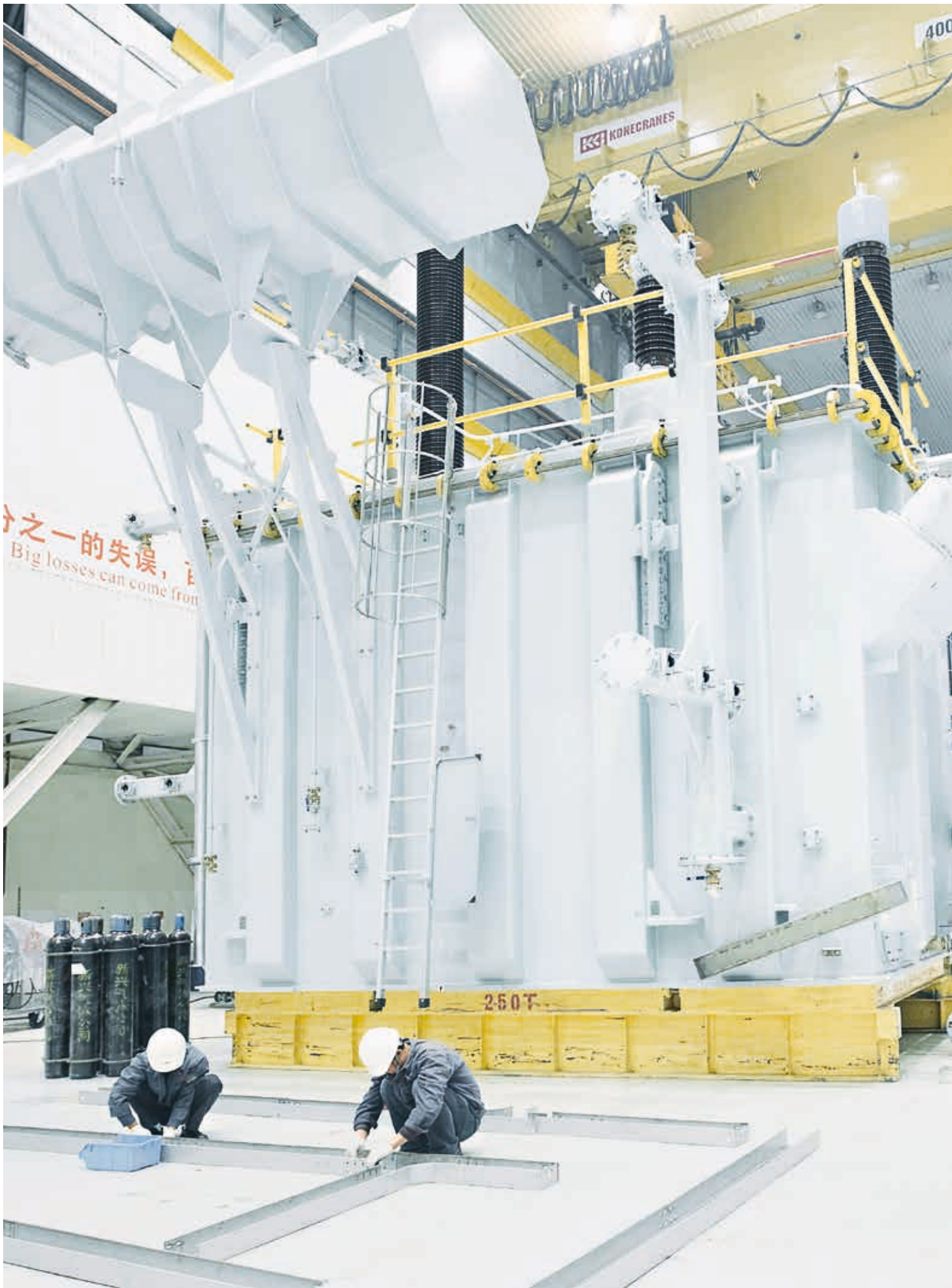
mahesh.dhotre@ch.abb.com

Luca Ghezzi

ABB LPED

Milan (Italie)

luca.ghezzi@it.abb.com





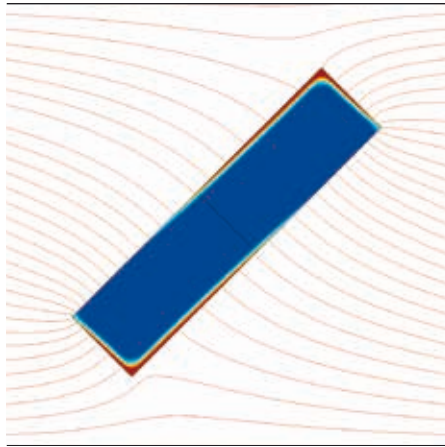
Copie conforme

Simulation électromagnétique des transformateurs

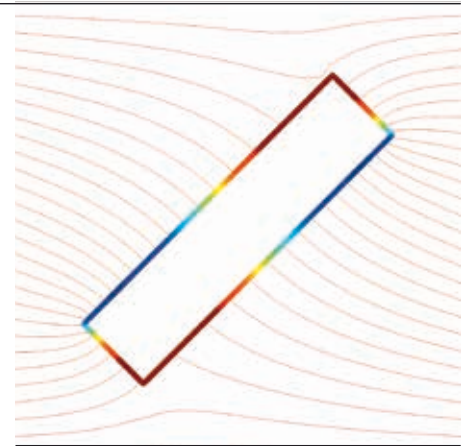
DANIEL SZARY, JANUSZ DUC, BERTRAND POULIN, DIETRICH BONMANN, GÖRAN ERIKSSON, THORSTEN STEINMETZ, ABDOLHAMID SHOORY – Les transformateurs de puissance figurent parmi les maillons les plus coûteux de la chaîne électrique. Aussi méritent-ils d'approcher la perfection ! Les logiciels de simulation basés sur la méthode des éléments finis sont pour cela irremplaçables. Outils de prédiction des effets des lois physiques fondamentales, ils offrent à ABB un moyen d'exploiter à l'optimum son expérience centenaire dans la conception des transformateurs et d'en lever les multiples complexités (pertes de flux magnétique, comportements non linéaires, idiosyncrasies de la conception physique), sans charge ni temps de calcul dissuasifs.

Photo

Une simulation fine du comportement électromagnétique est fondamentale pour bien concevoir un transformateur.



1a Calcul du volume plein



1b Calcul par soustraction du volume intérieur (méthode SBIC)

Si les propriétés non linéaires des matériaux et la complexité des transformateurs de puissance immergés et secs sont deux facteurs déterminants de la puissance de calcul nécessaire à leur simulation, c'est une connaissance poussée de leur conception qui permet d'en affiner la précision sans atteindre les limites du calcul haute performance.

d'énergie; elle peut créer des points chauds qui écourtent la vie du transformateur.

Si la simulation 2D détermine avec précision les pertes résistives et par courants de Foucault, le calcul des pertes supplémentaires à l'extérieur de l'enroulement est un problème 3D complexe dont la résolution passe par une modélisation numérique du trans-

formateur avec la méthode des éléments finis (MEF). Celle-ci est en effet l'outil de référence pour résoudre les problèmes posés, entre autres, par les champs électromagnétiques et les effets thermiques. Son principe? Approcher la solution d'un problème complexe en le ra-

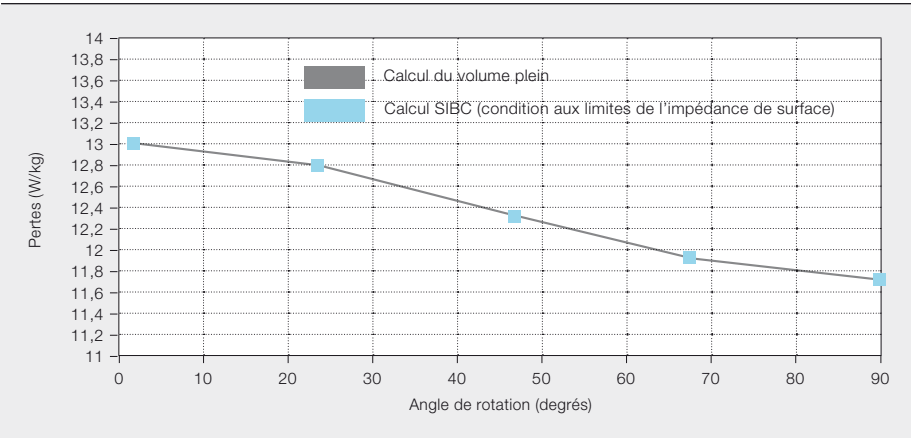
Le calcul précis des pertes supplémentaires et de leur distribution spatiale passe par des modèles numériques appropriés des mécanismes de pertes dans les matériaux du transformateur.

Chargés d'élever la tension en sortie des centrales puis de l'abaisser progressivement jusqu'au consommateur final, les transformateurs de puissance sont des points névralgiques du réseau électrique. Dans l'idéal, ils devraient afficher 100 % de rendement, mais en réalité ils accusent des « pertes en charge » à trois composantes : pertes résistives et par courants de Foucault dans les enroulements et les jeux de barres ; pertes supplémentaires dans les structures métalliques exposées aux champs magnétiques (cuve et son blindage, bridage du noyau, etc.). Cette fuite inévitable de flux magnétique ne représente pas seulement une perte

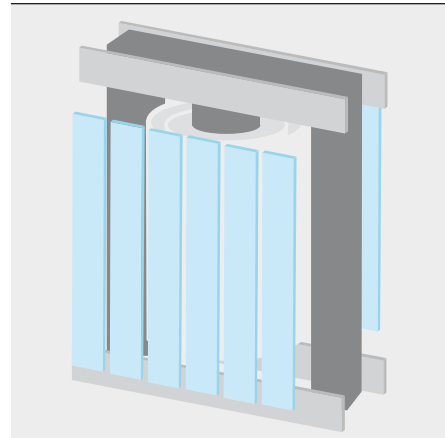
menant à une construction matricielle faite d'éléments plus petits, donc plus simples, mais au prix d'une puissance de calcul accrue. Force est de trouver un compromis entre la taille de ces éléments, le niveau de détail du modèle, l'approximation des propriétés des matériaux, le temps de traitement et la précision des résultats.

Les logiciels de simulation peuvent résoudre les problèmes élémentaires de champs magnétiques à l'aide d'équations de Maxwell dans un domaine fini de l'espace, borné par des conditions aux limites appropriées (excitation du courant

2 Simulation des pertes totales dans la plaque en fonction de l'angle de rotation : la méthode SIBC donne des résultats très proches de ceux obtenus avec le calcul du volume plein.



3 Géométrie du modèle de simulation d'un transformateur de puissance (hors cuve)



et conditions aux bords du modèle). Mais le reste de l'opération dépend des contributions de l'utilisateur ; c'est là qu'intervient l'expertise de longue date ABB dans la conception des transformateurs.

Pertes supplémentaires

Le calcul précis de ces pertes et de leur distribution spatiale requiert des modèles numériques adaptés à ces mécanismes, dans les matériaux qui constituent l'appareil.

Ces pertes sont importantes dans les matériaux massifs mais aussi les aciers feuilletés, par exemple, les champs parasites n'étant en général pas circonscrits au plan parallèle au sens de laminage. Aux pertes par courants de Foucault s'ajoutent des pertes par hystérésis dans les tôles ferromagnétiques, sous l'effet d'une dissipation d'énergie microscopique quand le matériau est soumis à des champs magnétiques oscillants. En outre, pour calculer avec précision la distribution des pertes totales, le modèle doit prendre en compte la non-linéarité de la courbe d'aimantation, laquelle influence non seulement la distribution du champ magnétique mais aussi, indirectement, celle des courants de Foucault. La forte anisotropie de l'acier feuilleté complique encore la tâche.

Autre difficulté : l'effet pelliculaire ou « effet de peau » dû à la présence de courants de Foucault induits en surface d'un objet métallique, qui font blindage en provoquant une décroissance exponentielle des champs et de la densité de courant à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie de l'objet. Ce phénomène s'am-

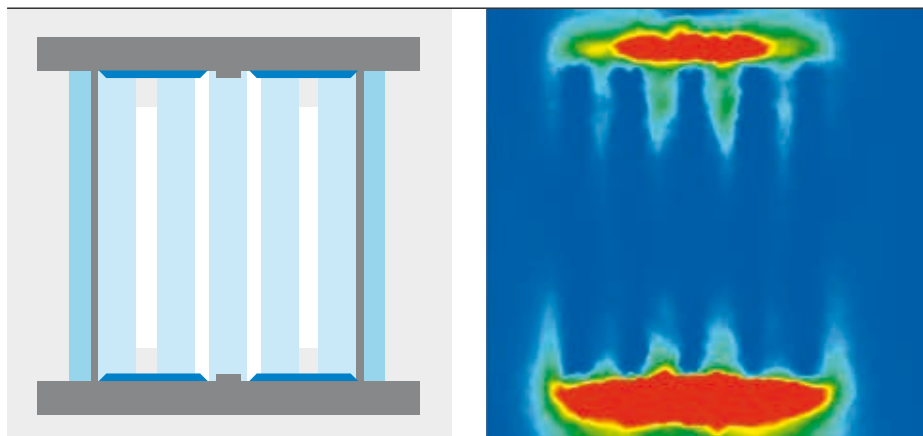
plifie avec la conductivité et la perméabilité jusqu'à former en surface du conducteur une coque fictive dont l'épaisseur, pour les matériaux caractéristiques d'un transformateur, peut atteindre le millimètre. Les pertes se concentrent alors dans cette fine couche périphérique. Pour les calculer, on pense d'emblée à diviser cette « épaisseur de peau » en plusieurs éléments finis, mais une simulation 3D intégrale demande trop de calculs. Heureusement, les conditions aux limites de l'impédance de surface, ou méthode *SIBC* (*Surface Impedance Boundary Conditions*), permettent de réduire notablement le volume de la solution et, du coup, la charge de calcul. Dans ce cas, l'intérieur de l'objet métallique est soustrait du domaine de calcul et l'effet des courants de Foucault en périphérie est pris en compte en spécifiant analytiquement l'impédance de surface, à savoir le rapport entre les champs électriques et magnétiques superficiels.

Un exemple illustrera l'utilité de la méthode : une plaque d'acier de longueur infinie, de 12 × 50 mm de section et de 1 mm d'épaisseur de peau à 50 Hz, peut être simulée sous plusieurs angles de rotation dans un champ magnétique. Les pertes totales par courants de Foucault sont calculées avec le volume plein de la plaque → 1a (nécessitant 4220 éléments finis pour l'ensemble du domaine de calcul) et une formulation SIBC → 1b (ramenée à 1674 éléments finis) ; cette dernière fournit des valeurs de pertes quasiment identiques à celles de la première méthode → 2. Le gain relatif est ici considérable, même pour un petit

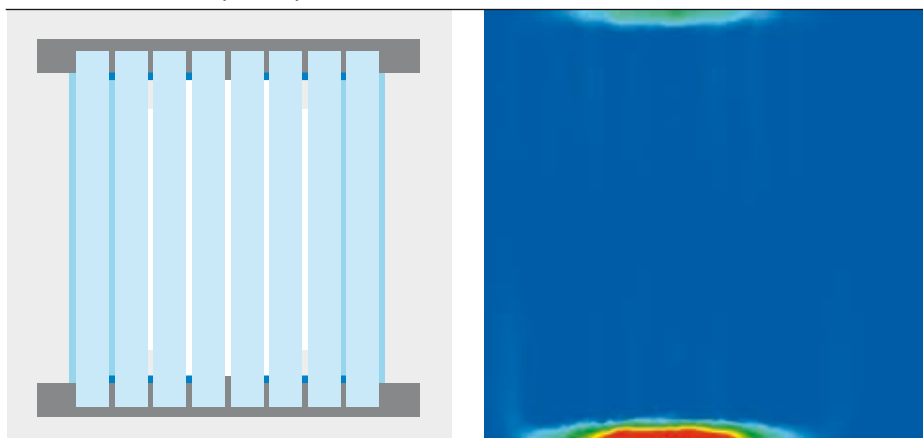
Le développement et l'amélioration des transformateurs secs s'appuient sur différents types de simulations numériques avancées, le plus souvent par éléments finis.

ABB travaille à des modèles de simulation 3D les plus précis possibles tout en conservant une charge de calcul raisonnable.

4 Influence de la géométrie des shunts magnétiques sur la distribution des pertes dans la cuve du transformateur



4a Shunts courts et espacés : pertes élevées



4b Shunts longs et rapprochés : pertes réduites

objet, et va croissant avec la taille de ce dernier.

ABB évalue et améliore sans cesse les différentes techniques numériques de calcul des distributions de pertes dans les matériaux d'un transformateur. Son objectif ? Trouver les modèles les plus précis en simulation 3D, tout en conservant une charge de calcul raisonnable. Il y parvient en cumulant mesures expérimentales minutieusement contrôlées et simulations détaillées, dont les résultats permettent d'évaluer les différentes techniques en lice de modélisation des pertes sur matériaux non linéaires et/ou feuilletés.

Transformateurs de puissance immergés

Les enroulements d'autotransformateurs (comme l'illustre ici un appareil monophasé ABB 243 MVA-512,5/230/13,8 kV) ont tendance à produire beaucoup de flux parasites au regard de leurs dimensions ; d'où le risque de fortes pertes supplémentaires et de points chauds dans la cuve, que l'on peut éviter par une simulation et une conception judicieuses du blindage. Dans notre cas, ce sont des

shunts magnétiques → 4 (éléments en acier ferromagnétique qui canalisent le flux émanant de l'extrémité des enroulements) montés sur la paroi de la cuve qui assurent ce blindage.

Le modèle 3D par éléments finis reprend toutes les pièces de construction importantes pour réaliser les simulations magnétiques et les calculs de pertes → 3. Vu la complexité du transformateur réel, certaines simplifications sont apportées pour faciliter les opérations. Au départ → 4a, les shunts magnétiques sont trop espacés et pas assez hauts : les densités de pertes sont nettement plus élevées au droit des parties actives par rapport aux autres zones de la cuve. Les zones critiques exposées à l'impact du champ magnétique sont clairement visibles, principalement au-dessus et en dessous des shunts. La hauteur et le nombre de shunts sont alors augmentés, et leur écartement réduit → 4b par itérations successives : les pertes dans la cuve diminuèrent de près de 40 %. Ces simulations permettent d'atteindre les performances requises tout en minimisant les matériaux supplémentaires et, par conséquent, les coûts.

Transformateurs de type sec

À la différence des transformateurs immergés dans l'huile et de distribution, la partie active d'un transformateur sec (noyau, enroulements, structure et conducteurs) ne baigne pas dans un diélectrique liquide mais est enrobée et moulée dans un isolant électrique dont le refroidissement est assuré par l'air environnant. Différentes méthodes de simulation numérique avancée, généralement à base de MEF, s'emploient à développer et à améliorer cette technologie.

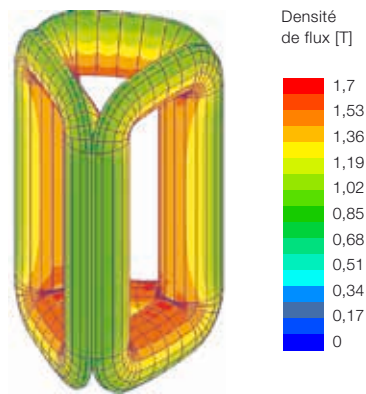
Noyaux enroulés triangulaires : TriDry

Contrairement aux appareils traditionnels constitués de noyaux magnétiques à tôles empilées, le transformateur triangulaire sec *TriDry* d'ABB comporte trois noyaux symétriques enroulés en forme de boucle et soumis aux mêmes conditions magnétiques → 5a. La simulation numérique des champs magnétiques est épineuse ; elle nécessite un modèle anisotrope du matériau car la perméabilité est très élevée dans le plan parallèle aux tôles feuilletées mais bien inférieure dans le sens orthogonal → 5b. Les simulations permettent de mieux comprendre le

5 Simulation de la distribution de densité de flux magnétique dans le noyau d'un transformateur TriDry



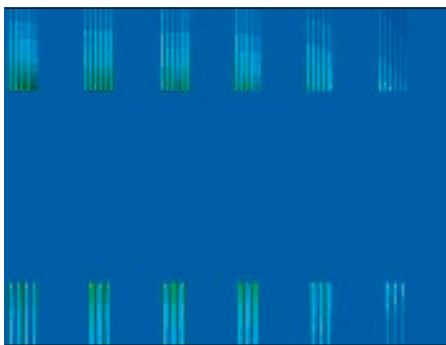
5a Transformateur TriDry



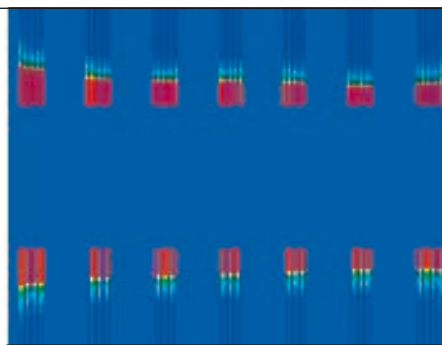
5b Distribution de la densité de flux

La méthode SIBC réduit énormément le volume de résolution du problème et, du coup, la charge de calcul.

6 Simulations électromagnétiques d'un transformateur dodécaphasé : distribution des pertes Joule à l'extrémité des conducteurs



6a À la fréquence fondamentale



6b À la fréquence harmonique de rang 5

comportement magnétique des transformateurs TriDry et d'analyser en détail les intensités de champs parasites émis par ces appareils. De quoi respecter, par exemple, la valeur limite de 1 microtesla (en valeur efficace) de la norme fédérale suisse pour les installations dans les lieux à utilisation sensible (LUS).

Alimentation de variateurs de vitesse

Ici, le transformateur alimente un variateur de vitesse qui alimente lui-même un moteur en courant alternatif. Son électronique de puissance génère des courants harmoniques qui augmentent les pertes par effet Joule dans les enroulements, sources potentielles de points chauds. La construction des modèles de simulation doit en tenir compte. Voyons un exemple type de simulation des pertes dans les enroulements d'un transformateur dodécaphasé à double secondaire → 6 : on remarque la distribution relative des pertes Joule aux extrémités des conducteurs en feuille des deux enroulements opposés. Ces pertes à la fréquence fondamentale sont plus uniformément réparties le long de la surface du conducteur que celles dues à l'har-

monique de rang 5. La raison en est que les courants des enroulements secondaires sont en phase à la fréquence fondamentale, créant principalement un flux axial, mais en opposition de phase à la fréquence harmonique de rang 5. Cela entraîne un flux radial qui concentre les pertes dans la zone proche de l'espace axial entre enroulements. Il en résulte des points chauds qui obligent à revoir la conception.

Simulation réussie

La simulation numérique des champs électromagnétiques est assurément un outil très puissant de conception et de développement des transformateurs actuels. Des modèles appropriés facilitent, par exemple, la simulation des pertes supplémentaires dans les composants structurels, des pertes Joule ou de l'aimantation du noyau, sur différents types de transformateurs.

Au service de nos équipes de recherche, de développement et d'ingénierie, ces simulations concourent à la qualité des transformateurs immergés et secs d'ABB.

Daniel Szary

Janusz Duc

ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
daniel.szary@pl.abb.com
janusz.duc@pl.abb.com

Bertrand Poulin

ABB Power Products, Transformers
Varenes (Québec, Canada)
bertrand.f.poulin@ca.abb.com

Dietrich Bonmann

ABB Power Products, Transformers
Bad Honnef (Allemagne)
dietrich.bonmann@de.abb.com

Göran Eriksson

ABB Corporate Research
Västerås (Suède)
goran.z.eriksson@se.abb.com

Thorsten Steinmetz

Abdollah Shoori

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
thorsten.steinmetz@ch.abb.com
abdollah.shoori@ch.abb.com

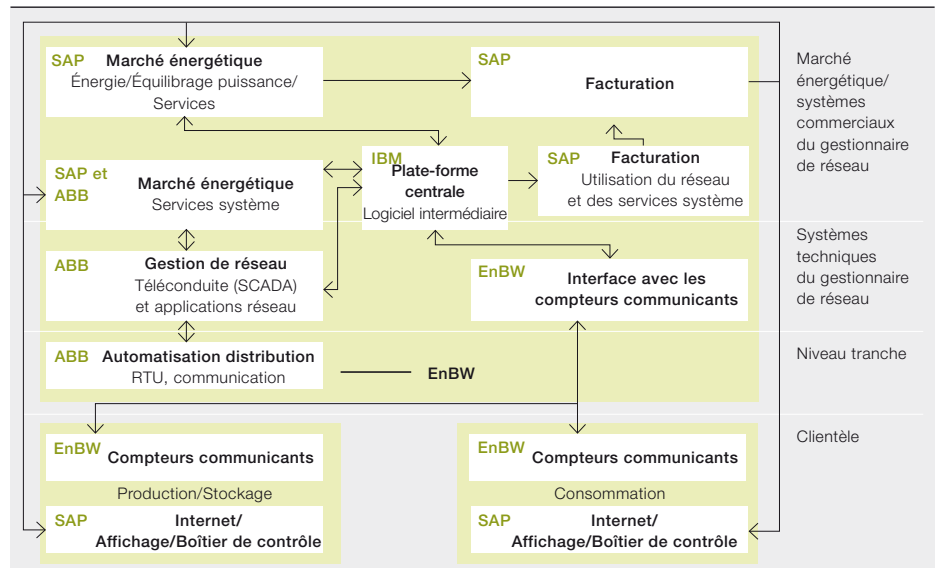


Projet phare

Un partenariat pilote
pour consolider
les réseaux électriques
du futur

CARSTEN FRANKE, TATJANA KOSTIC, STEPHAN KAUTSCH, BRITTA BUCHHOLZ, ADAM SLUPINSKI – ABB n’a de cesse de développer la totalité des composants nécessaires à la construction et à l’optimisation des réseaux électriques intelligents, en participant à d’ambitieux projets de recherche et installations pilotes pour évaluer et améliorer les solutions existantes. En témoigne sa contribution au *MeRegio* (*Minimum Emission Region*), l’un des six projets phares de l’initiative *E-Energy* financée par le gouvernement allemand. Le déploiement de nouvelles technologies ABB de l’information et de la communication destinées à renforcer et à stabiliser ces réseaux « intelligents » est le fruit de l’étroite collaboration d’un grand nombre d’acteurs.

1 Synergies entre les acteurs du consortium MeRegio



En 2012, ABB achevait avec succès sa participation au projet pilote MeRegio lancé en 2008 dans le cadre du programme *E-Energy Smart Grids made in Germany* [1], financé par le ministère fédéral de l'Économie et de la Technologie avec le ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sûreté nucléaire.

Comme tous les projets E-Energy, MeRegio avait pour mission première de développer, de mettre en place et de tester les technologies de l'information et de la communication (TIC) pour gérer les futurs systèmes d'énergie. Ont participé à ce consortium :

- ABB
- EnBW Energie Baden-Württemberg
- IBM Allemagne
- SAP
- Systemplan GmbH
- Université de Karlsruhe (KIT)

ABB s'est principalement vu confier la gestion du réseau et l'automatisation de la distribution, et IBM, le logiciel intermédiaire d'échange d'informations pour relier les différentes composantes du projet. SAP, pour sa part, se chargeait du développement du marché de l'électricité et l'énérgéticien EnBW, du déploiement de l'infrastructure de comptage évolué et de

l'intégration des boîtiers de contrôle dans son réseau → 1. Le consortium fut piloté par EnBW et soutenu par l'université de Karlsruhe et ses travaux de recherche spécifiques. Enfin, Systemplan aida à configurer et installer les sous-compteurs pour les clients industriels.

Mariage de l'intelligence énergétique et numérique

Le projet MeRegio fut l'occasion pour ABB de développer et d'installer de nouveaux dispositifs et techniques de mesure évolués, mais aussi, et surtout, de déployer de nouvelles TIC englobant les

Les postes électriques secondaires peuvent quasiment doubler la production d'énergies renouvelables intégrables.

applications et mécanismes supplémentaires de gestion des réseaux électriques communicants. La contribution d'ABB se déclina en quatre actions dont trois donnèrent lieu à des simulations poussées.

Simulations hors ligne

ABB se focalisa de prime abord sur les simulations hors ligne du réseau pilote moyenne tension (MT) et basse tension

(BT) pour identifier les possibilités d'optimisation. Plusieurs solutions techniques de dernière génération furent ainsi envisagées comme la régulation du facteur de puissance ($\cos \phi$), les régulateurs de tension et le stockage d'énergie. Résultat : les réglages de tension dans les postes secondaires, par exemple, peuvent presque doubler le volume de production d'énergies renouvelables intégrable au réseau et éviter les dépassements de plages de tension dans les réseaux BT, sans toucher à leur topologie. On s'assura également que tous les résultats de ces simulations hors ligne s'appliquaient aussi à d'autres réseaux de façon à pouvoir réutiliser ces connaissances et aider les clients confrontés aux mêmes problématiques. Ces résultats permirent en outre d'identifier les cas de figure où l'installation de TIC supplémentaires pour approfondir les recherches, améliorer la surveillance et accroître la fiabilité de l'approvisionnement dans le réseau de distribution se justifiait.

Nouvelles techniques de mesure

Partant de ces acquis, ABB s'attachait à mettre au point des techniques de mesure pour les postes secondaires, au moyen d'automatismes de téléconduite ou RTU (*Remote Terminal Units*). Concrètement, ABB utilisa son RTU560 et son multimètre 560CVD11 pour déterminer

Photo p. 44

La région pilote de Freimat, à 25 km au nord de Fribourg (Allemagne), connue pour son autosuffisance énergétique.

Crédit photo : ©2013 Luca Siermann

la tension côté MT du poste, uniquement par des mesures côté BT. Cette technique de mesurage originale, spécifique au pilote MeRegio, fut aussi amplement testée et éprouvée sur le terrain. Ses résultats concluants lui valent aujourd'hui d'être employée dans d'autres projets pilotes d'ABB.

Intégration

Le troisième axe de travail du projet MeRegio porta sur l'intégration de toutes les mesures MT et BT issues de différents postes ainsi que l'utilisation des mesures de compteurs évolués disponibles dans le système de gestion de réseau. De quoi améliorer les calculs sur le réseau et les capacités de gestion en ligne de l'opérateur. Si les données rapatriées des postes étaient directement intégrables, grâce aux protocoles de communication existants, l'importation des données de comptage évolué nécessita un tout nouveau mécanisme. Les échanges empruntèrent une interface de services web avec la plate-forme centrale IBM, à l'aide d'un modèle de données nettement influencé par les normes en place. Le protocole d'échange développé par ABB, en particulier, s'inspira du modèle d'information commun CIM (*Common Information Model*) et de ses extensions pour la distribution CEI 61968-11 et CEI 61970-301 (DCIM). Les données intégrées en provenance des niveaux BT et MT permettent ainsi de gérer les flux de puissance et de visualiser les goulots d'étranglement du réseau et les dépassements de tension. On utilisa à cette fin un code couleur qui montre clairement le lien entre l'impact de la charge et de la production, et les problèmes repérés. Tous ces concepts et méthodes furent validés par des simulations approfondies du système.

Orientation marché

Le projet pilote MeRegio porta également sur les applications de maîtrise de la demande d'énergie (MDE) en MT et BT, qui permettent à l'utilisateur de modifier le volume consommé ou le moment de sa consommation. En l'occurrence, ABB se chargea des prévisions de la production photovoltaïque et éolienne décentralisée. De plus, une autre interface avec la plate-forme centrale IBM fut mise en place pour recevoir les prévisions des boîtiers de contrôle spéciaux équipant le réseau de distribution EnBW. Toutes ces données permirent de prédire les transits

de puissance afin d'anticiper les éventuels goulots d'étranglement du réseau jusqu'à six heures à l'avance. Les résultats de ces calculs prédictifs sont codés en XML et transférés à un tout nouveau module d'analyse qui calcule, pour toutes les charges et sources de production, leur « sensibilité » aux problèmes anticipés, puis, sur cette base, préconise

Les goulots d'étranglement du réseau sont simulés pour pallier la difficulté à les observer à une fréquence suffisante en conditions réelles.

des plans de redistribution au vu de la production et de la consommation locales. Ces solutions sont codées sous la forme de « signaux de priorité » transmis au marché énergétique du gestionnaire du réseau de distribution pour être traités. Leur modèle d'échange étant une extension du DCIM, les problèmes de même nature dans les réseaux de distribution peuvent être réglés d'une façon très similaire avec des messages de contenu et charge utile identiques. La totalité du dossier, depuis la prédiction des flux de puissance et l'analyse des goulots d'étranglement jusqu'à l'élaboration des signaux de « sensibilité » et la communication, fut confiée à une équipe d'experts ABB.

La capacité de ces signaux à résoudre par anticipation les goulots d'étranglement de la distribution fut surtout évaluée par des simulations en ligne, qui vinrent pallier les difficultés à observer ces phénomènes à une fréquence suffisante sur le système électrique réel. On modifia pour cela certaines charges et données de prévision de production pour provoquer des goulots à différents moments clés, puis on évalua l'efficacité des algorithmes et mécanismes d'échange d'informations à identifier et à résoudre les problèmes de réseau ainsi prédits.

L'union fait la force

Le projet MeRegio lui-même ne fut pas seulement évalué par des mesures de terrain mais aussi par des simulations d'envergure. Pour valider et diffuser son bilan à un large public, ABB mit au point

le démonstrateur *ABB Smart Distribution System*, qui permet de présenter et d'expérimenter les réseaux électriques intelligents en général, et d'expliquer d'avantage les questions soulevées par MeRegio ainsi que les stratégies pour y répondre. Cet outil élaboré sert également à étudier l'impact économique des solutions de réseaux communicants sur certains

problèmes d'exploitation des réseaux. Si la simulation fut déterminante pour développer la solution présentée dans le démonstrateur, la réussite du projet doit beaucoup à la synergie des nombreux acteurs qui ont par-

tagé leur expertise et leurs idées. C'est là un exemple de partenariat fructueux entre différents groupes d'intérêt œuvrant au bénéfice du plus grand nombre. Car, comme le dit l'adage, « *deux têtes (ou plus) valent mieux qu'une* ».

Carsten Franke

Tatjana Kostic

ABB Corporate Research
Baden (Suisse)
carsten.franke@ch.abb.com
tatjana.kostic@ch.abb.com

Stephan Kautsch

Britta Buchholz

ABB Power Systems, Smart Grids
Mannheim (Allemagne)
stephan.kautsch@de.abb.com
britta.buchholz@de.abb.com

Adam Slupinski

ABB Power Systems Consulting
Mannheim (Allemagne)
adam.slupinski@de.abb.com

Tous nos remerciements à

Klaus von Sengbusch

Ancien collaborateur ABB Power Systems

Bibliographie

- [1] *E-Energy: ICT-based energy system of the future*, [en ligne], disponible sur : <http://www.e-energy.de/en/> (en anglais), consulté le 5 juin 2013.



De la mesure en toutes choses

La simulation système et multiphysique améliore la précision et la robustesse des capteurs de process

ROLF DISSELNKOETTER, JÖRG GEBHARDT, ROSTYSLAV TYKHONYUK, HOLGER NEUBERT – L'instrumentation est au cœur de bien des activités ABB. Pour répondre aux exigences d'un grand nombre d'applications industrielles (robustesse, précision, compacité, conformité normative...),

le Groupe est à l'avant-garde de la recherche et de l'innovation sur les capteurs. La simulation système et multiphysique est un levier incontournable de ses nouveaux développements.



(Déformations multipliées par 1000 pour les besoins de l'illustration)

Les progrès de l'instrumentation s'accompagnent souvent d'une exigence de précision accrue, qui peut atteindre 0,1 % de la valeur mesurée, voire 0,05 % dans certaines applications et conditions d'étalonnage.

Les différentes technologies de capteur ont des effets non négligeables au niveau système, du fait notamment des détails de conception ou du nombre de composants dont le comportement influe sur la chaîne de mesure. Ces influences internes et externes, qu'elles soient thermomécaniques, chimiques ou électromagnétiques (diaphonie), entraînent un risque de dérive du gain, de la phase et de l'*offset*, qui peut dégrader la précision et la stabilité des signaux de mesure.

Les simulations de systèmes complets ou multiphysiques évitent la lourdeur des essais sur prototypes en dur et permettent de prédire de manière fiable et précise les performances du dispositif. La conception des capteurs est un exemple représentatif du développement mécatronique à base de modèles [1]. Pour l'illustrer, voyons deux exemples de simulation.

Débitmétrie à effet Coriolis

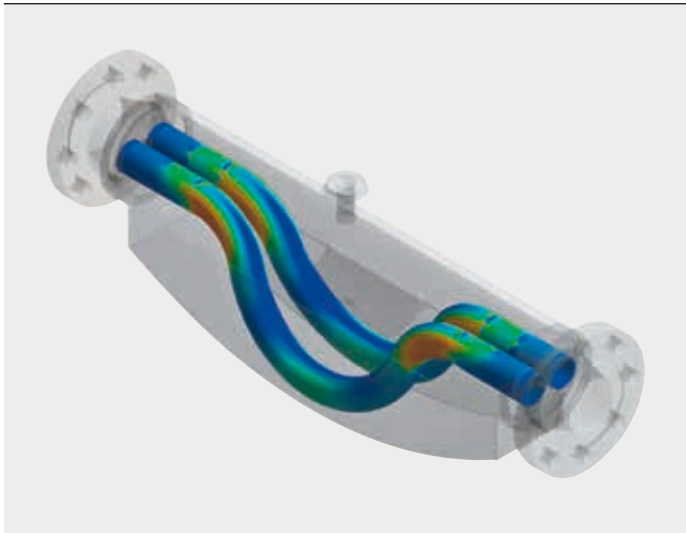
Les constituants d'un débitmètre à effet Coriolis interagissent fortement les uns avec les autres. Quand l'excitation fournit aux tubes de mesure un courant alternatif qui les met en vibration, les

La conception des débitmètres Coriolis associe obligatoirement de solides connaissances théoriques et une méthodologie de recherche-développement très efficace.

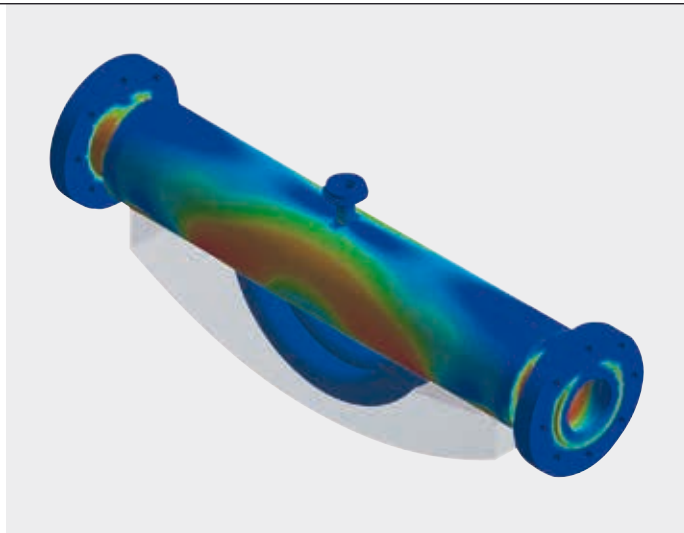
forces de Coriolis agissant sur l'écoulement du fluide dans ces tubes induisent de légers retards de phase entre vibrations, en différents points de la structure mécanique. Ces déphasages sont détectés par deux capteurs délivrant un signal sinusoïdal et judicieusement positionnés pour obtenir une amplitude suffisante. L'électronique mesure le décalage entre les deux sinusoïdes et utilise leur ampli-

Photo p. 47

Débitmètre à effet Coriolis FCB 350 d'ABB (DN25)



2a Fréquence en fonctionnement : distribution des contraintes et déformations



2b Distribution des contraintes à la plus basse fréquence propre du boîtier du capteur

tude pour piloter le courant d'excitation. La conception des débitmètres Coriolis ne s'improvise pas : à de solides connaissances théoriques doit succéder une méthodologie de recherche-développement très efficace pour être à même de concevoir des gammes complètes de produits, ainsi que les déclinaisons et variantes clients. Des critères quantitatifs de conception, mis à l'épreuve par des essais expérimentaux et virtuels, donnent d'excellents résultats.

Sensibilité à l'effet Coriolis et aux autres vibrations

Une prédiction numérique exacte de la sensibilité du flux a deux avantages : d'abord, elle permet d'analyser les influences externes en fonction de leur impact réel sur le mesurage, ce qui minimise les sensibilités croisées indésirables (effets de l'environnement, vibrations de la conduite, par exemple) et optimise la conception. Ensuite, la même plage de signaux de sortie est commune à toutes les dimensions de capteurs, optimisant les algorithmes de traitement du signal.

Robustesse mécanique et stabilité dynamique

Tous les signaux de mesure produits par l'appareil doivent être stables sous l'action d'influences externes inévitables, potentiellement irrégulières.

Un critère important de performance et de stabilité du dispositif, parfaitement simulable, est la mesure de masse volumique (appelée souvent à tort *densité*) sous plusieurs charges externes. Pour cela, on commence par soumettre

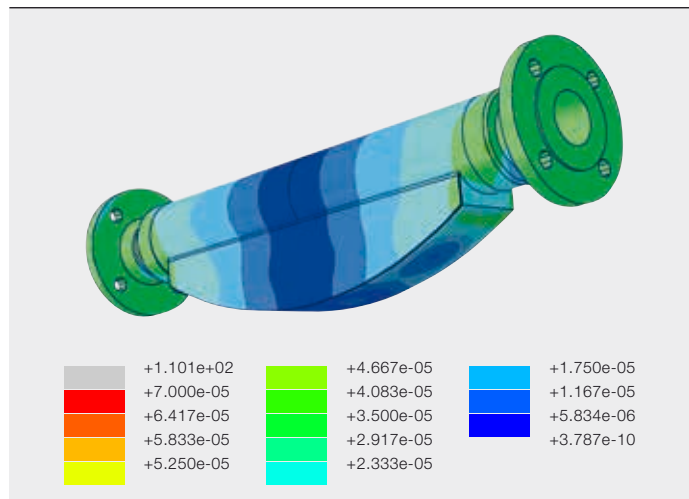
l'appareil à la pire des conditions de charge ; la réponse non linéaire de la structure est illustrée en → 1. Cet essai éprouve également sa robustesse mécanique.

On calcule ensuite les fréquences d'oscillation propres du système → 2a. Pour réussir ce test, il est primordial que les glissements de fréquence induits par la charge n'excèdent pas les spécifications de précision du débitmètre. Il faut aussi découpler les vibrations engendrées par l'appareil en fonctionnement de son boîtier externe. Le choix de paramètres spéciaux de conception permet de bien dissocier les comportements modaux des deux structures → 2b.

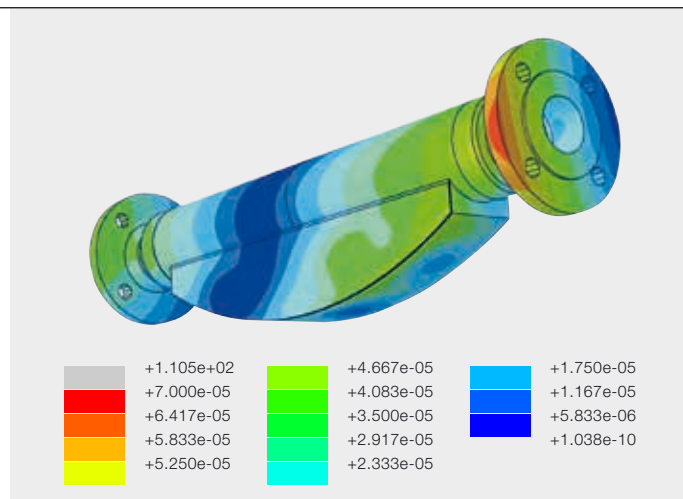
Capteurs robustes, mesure fiabilisée

Pour la mesure de flux à forte valeur ajoutée, la principale variable de régulation est la « phase zéro », à savoir la mesure intégrale de l'influence des tolérances et asymétries superposées du capteur, inhérentes à sa fabrication, qui entraînent un signal non nul en l'absence d'écoulement. La difficulté réside surtout dans la réduction des influences physiques temporelles sur cette phase zéro, qui risquent de fausser le résultat de la mesure, sans possibilité de correction. Des dispositifs d'amortissement externes peuvent toucher l'appareil en n'importe quel endroit du boîtier, lequel vibre puisque le principe même du débitmètre à effet Coriolis est de mesurer les vibrations. Dans pareil cas, l'énergie prélevée en ce point modifie légèrement la structure de l'onde parcourant l'appareil.

Une prédiction numérique exacte de la sensibilité du flux permet d'analyser les influences externes en fonction de leur impact réel sur le mesurage et d'optimiser la conception.



3a Appareil non contraint (pas de force statique externe)



3b Appareil sous forte contrainte statique externe (couple axial)

Pour la mesure de flux de grande qualité, la principale variable de régulation est la « phase zéro », à savoir la mesure intégrale de l'influence des tolérances et asymétries de fabrication superposées du capteur.

La mécanique interne et externe d'un Coriolis doit être choisie avec soin pour minimiser cette influence, surtout au regard des conséquences du déplacement des tubes de mesure et de la détection des signaux.

Des algorithmes savent efficacement calculer ces phases zéro, compte tenu de l'amortissement local (force et emplacement des amortisseurs). Ce calcul numérique est très délicat en présence de phases extraordinairement faibles, de l'ordre de 10^{-5} degrés.

La figure → 3a reproduit le tracé en couleur des phases zéro induites en fonction de l'emplacement de l'amortisseur, pour une force constante donnée; le résultat du calcul peut être comparé à la limite autorisée des phases zéro pour le débitmètre concerné. → 3b représente la même situation, quand le système est soumis à un fort couple axial. Résultat: dans notre cas, la phase zéro se stabilise à une très faible valeur, même sous fortes sollicitations externes.

Au final, des critères représentatifs ont été sélectionnés pour exploiter et reproduire fidèlement le comportement stable de la phase zéro des débitmètres Coriolis-Master d'ABB. Sur un certain nombre de Coriolis, des essais au choc virtuels sont effectués par la méthode de calcul à éléments finis avec une intégration temporelle explicite [2].

Pour réaliser des capteurs robustes et bon marché, on procède à des analyses de sensibilité aux inévitables tolérances

de fabrication. Les constructeurs de débitmètres peuvent ainsi répondre aux exigences et impératifs du client pour valoriser ses produits. Pour une construction robuste, les tolérances pèsent moins sur les performances [3] → 4.

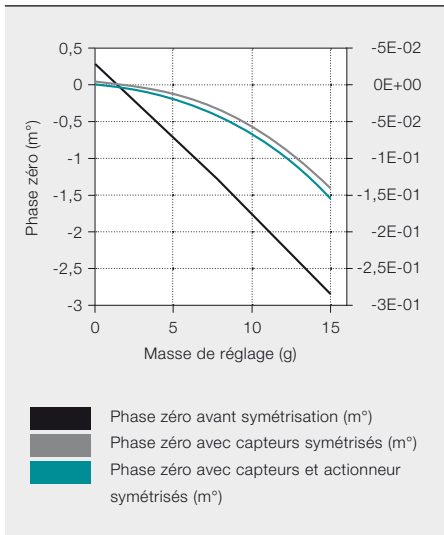
Incursion magnétique

Les couplages et interactions des éléments constitutifs d'un Coriolis sont fléchés en vert → 5. L'actionneur et les capteurs de vibration intégrés sont basés sur le principe de la bobine acoustique: un aimant permanent, un concentrateur de flux magnétique « doux » et une bobine mobile dans l'entrefer magnétique. La force entre l'aimant et la bobine de l'actionneur produit des vibrations qui sont mesurées par la tension induite dans les bobines du capteur.

Pour concevoir et optimiser les composants magnétiques, il faut tenir compte de tous les éléments en interaction de la chaîne de mesure. Les sensibilités requises de l'actionneur et des capteurs, par exemple, dépendent l'une de l'autre et des propriétés des sous-ensembles mécaniques et électroniques. Les conditions aux limites, telles la masse et la taille maximales des éléments magnétiques, tout comme les limitations des impédances électriques et des amplitudes de signal dérivées des exigences de sécurité intrinsèque, doivent aussi être prises en considération.

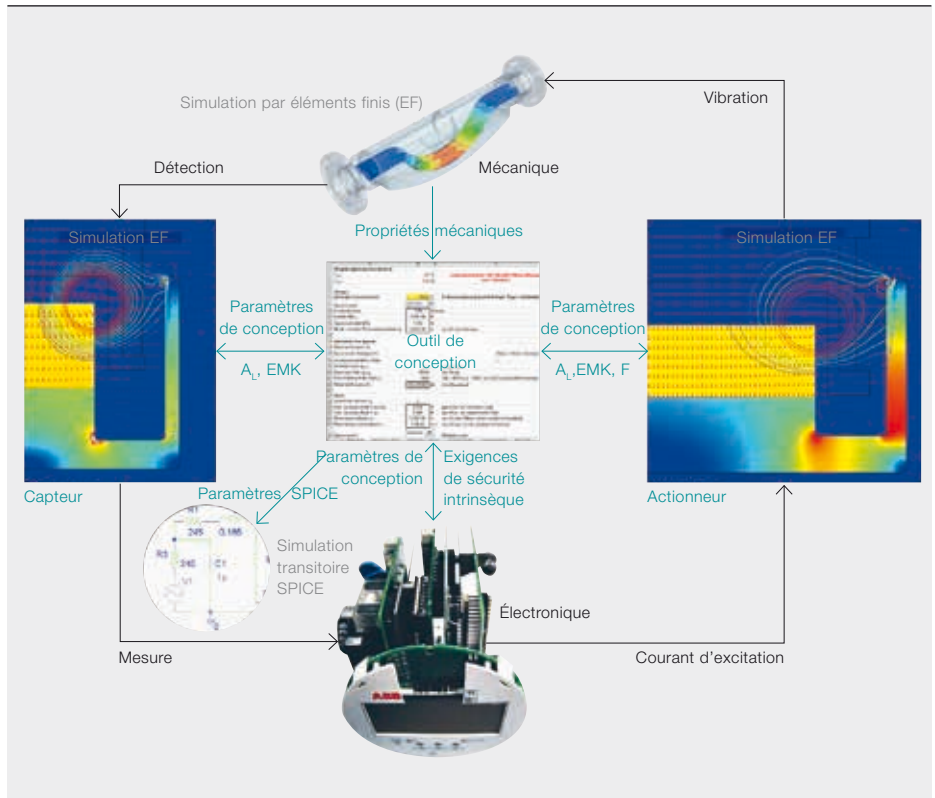
On utilise pour cela un outil de conception sur tableur qui permet la saisie et la corrélation des données magnétiques, électroniques et mécaniques requises.

4 Courbe phase zéro/masse de réglage



L'axe y de droite (mis à l'échelle par un facteur de 10) vaut pour les courbes grise et verte. La conception symétrisée a une phase zéro beaucoup plus stable en cas de différences de masse entre les deux tubes.

5 Conception magnéto-électrique d'un système de capteur/actionneur



L'outil assure l'interface avec la modélisation par éléments finis (MEF) des composants magnétiques, grâce à l'échange des paramètres de conception et des caractéristiques électromagnétiques qui en découlent. De plus, il regroupe les résultats de la simulation mécanique et comprend un modèle simplifié du circuit d'excitation. En phase d'optimisation des paramètres, il surveille leur confor-

la mécanique. ABB a déjà à son actif plusieurs capteurs Coriolis de nouvelle génération conçus avec cette méthode et cet outil.

Capteurs électromagnétiques

Les capteurs électromagnétiques les plus répandus sont les transformateurs de courant (TC), les capteurs de position et de proximité. Si plusieurs outils de simulation conviennent à ces systèmes, des techniques de modélisation et des solveurs spéciaux sont souvent nécessaires pour garantir la stabilité et la performance du calcul, et la précision des résultats. Il faut en outre trouver un bon compromis entre complexité du modèle et exigences de précision.

La simulation des capteurs électromagnétiques se heurte à plusieurs difficultés :

- Géométrie 3D complexe et détaillée, dans une large palette de dimensions ;
- Effets non linéaires ;
- Hystérésis ;
- Transitoires ;
- Diaphonie ;

- Couplage d'effets physiques (électriques et thermiques, par exemple) réagissant à différentes échelles de temps.

Depuis 2009, ABB collabore avec l'université de Technologie de Dresde au développement de modèles à éléments finis 3D multiphysiques (avec paramètres couplés) et multiprojets.

Exemple

La géométrie utilisée pour modéliser les capteurs de courant est illustrée en → 6. Même s'il ne s'agit pas d'une conception réelle, elle reproduit les propriétés caractéristiques de certains types de capteurs de courant.

Le modèle 3D non symétrique est celui d'un TC doté d'un jeu de barres primaire, d'un enroulement secondaire à deux bobines et d'un noyau magnétique présentant deux types d'entrefer. On peut modifier les dimensions de ce modèle paramétrique et lui ajouter un capteur de flux, dans l'un des entrefers, et un circuit électrique pour former un capteur de courant en boucle fermée.

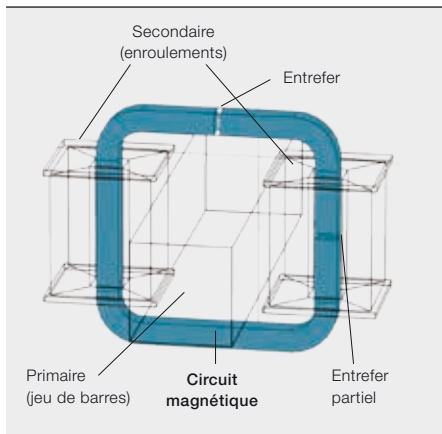
Plusieurs versions de modèles développées sur cette base ont servi à explorer différents aspects physiques et à modé-

La réalisation de capteurs robustes et bon marché passe par des analyses de sensibilité aux inévitables tolérances de fabrication.

mité aux objectifs de conception et aux conditions aux limites, et signale les écarts. La conception des composants magnétiques et du circuit d'excitation peut donc adopter une démarche itérative. L'outil fournit également les paramètres d'un modèle de circuits électriques équivalents élémentaires SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) pour la simulation transitoire de l'excitation, de l'actionneur et de

Pour concevoir et optimiser les composants magnétiques, il faut tenir compte de l'ensemble des éléments et interactions en présence.

6 Géométrie d'un modèle de transformateur



liser les phénomènes et leurs propriétés, un à un ou combinés.

Caractéristiques du modèle

Ce modèle 3D pose plusieurs problèmes : non symétrique – ce qui empêche de le réduire à une sous-géométrie avec des conditions aux limites adaptées –, il est fait de petits détails, comme les entrefers noyés dans une grosse structure. Ces derniers jouent un rôle considérable sur la répartition des champs parasites et les propriétés du capteur. Néanmoins, sans maillage optimisé de la géométrie, ils augmentent le nombre d'éléments finis et les temps de calcul !

D'autres caractéristiques sont énumérées en → 7. On voit que, dans un capteur réel, nombreux peuvent être les effets physiques et les couplages dont la prise en compte dans l'analyse dépend de la problématique étudiée.

Bilan

Ces modèles ont déjà bien progressé [4, 5] ; en témoignent les résultats obtenus sur une version dotée de barres cuivre, d'un noyau magnétique en alliage fer-silicium → 8 et de caractéristiques magnétiques non linéaires. Supposé électriquement non conducteur, le modèle ne présente pas de pertes fer et le noyau peut être en tôles non feuilletées. La MEF est couplée aux modèles de circuits SPICE, avec une source de courant sinusoïdal au primaire et une résistance de charge au secondaire, à N_{sec} boucles. La distribution des pertes calculée sert de données d'entrée à la simulation thermique qui fournit la distribution de température. La conduction électrique est thermodépendante. La caractéristique non linéaire du noyau et le couplage à un

7 Caractéristiques d'un modèle de capteur électromagnétique

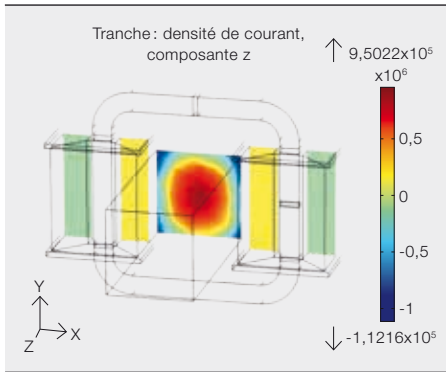
- Caractéristique magnétique anhystérétique $H(B)$ non linéaire du matériau du noyau ; le choix d'une formulation analytique améliore la stabilité numérique.
- Distribution « fil de fer » de courant secondaire dans les enroulements modélisés avec huit corps prismatiques ; la résistance du cuivre dépend de la température.
- Adéquation des modèles à la simulation transitoire.
- Couplage aux modèles intégrés de circuits SPICE (source de courant, charge secondaire, fonctionnement en boucle fermée avec capteur de flux supplémentaire, p. ex.).
- Courants de Foucault induits dans le jeu de barres (primaire) occasionnant des pertes supplémentaires et une distribution de densité de courant non homogène due à l'effet de peau ; les entrefers entraînent une sensibilité aux champs magnétiques parasites et à la distribution de courant.
- Calcul des densités de perte par conduction dans les enroulements primaires et secondaires.
- Modélisation analytique explicite des noyaux feuilletés (lamelles de tôles empilées ou bobines enroulées).
- Hystérésis et distribution des pertes électriques dynamiques à partir des courants de Foucault dans le noyau.
- Modèle thermique intégré de calcul de la distribution de température à partir des pertes électriques dans les enroulements et le noyau magnétique ; la dérive thermique des conductivités électriques est prise en compte dans un processus d'itération en boucle fermée, piloté par programme externe.

Plusieurs techniques de modélisation et solveurs spéciaux sont souvent nécessaires pour garantir stabilité, performance du calcul et précision des résultats.

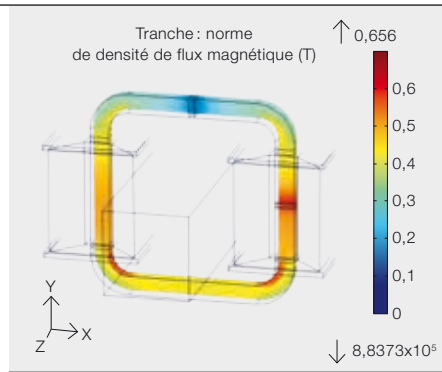
modèle de circuit imposent une simulation transitoire.

La figure → 8 illustre la distribution de densité de courant résultante dans les conducteurs, à un instant donné. L'effet

8 Distribution de densité de courant et de flux magnétique dans le transformateur

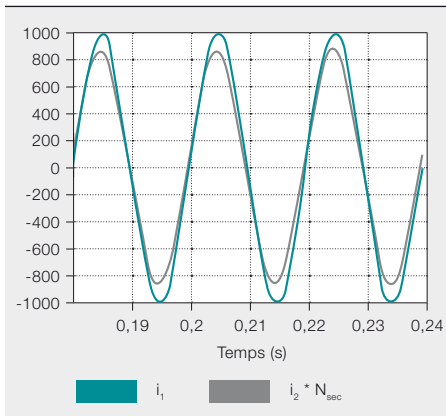


8a Distribution de densité de courant instantanée (composante z) avec effet de peau au primaire (jeu de barres)

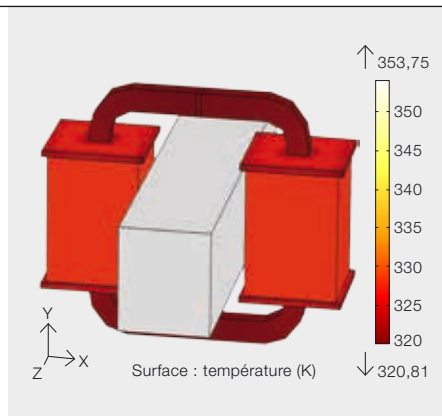


8b Distribution de densité de flux magnétique instantanée (valeur absolue) au centre du noyau

9 Signaux de courant et distribution de température



9a Courant primaire et secondaire normalisé, révélant un mauvais raccordement du transformateur



9b Distribution résultante de la température stationnaire à la surface des solides

de peau est visible, et même la circulation d'un courant inverse au centre du jeu de barres. La distribution de densité de flux du noyau asymétrique est influencée à la fois par la distribution de courant et les entrefers.

En → 9a, le décalage des signaux de courant indique un couplage imparfait du transformateur, à cause des entrefers. De plus, la distribution de température en régime stationnaire → 9a montre clairement l'effet des pertes par conduction électrique.

ABB et ses partenaires universitaires poursuivront leurs efforts de recherche sur l'amélioration des modèles de noyau en tôles feuilletées pour les plus hautes fréquences, l'étalonnage automatique des caractéristiques magnétiques non linéaires, la mise en œuvre de différentes formes d'enroulement, la modélisation SPICE et la validation des modèles expérimentaux.

Essais transformés

Les simulations système et multiphysiques sont essentielles pour approfondir et affiner la connaissance de l'instrumentation et de ses performances. Les débitmètres Coriolis, par exemple, l'attestent : après avoir réussi les traditionnels essais physiques et une batterie de tests virtuels minutieusement choisis, ils font preuve d'une précision, d'une robustesse et d'un usage optimisé des matériaux qui confèrent une réelle valeur ajoutée aux clients.

L'année 2009 marqua le début du partenariat d'ABB avec l'université de Technologie de Dresde pour développer des techniques MEF destinées aux capteurs électromagnétiques.

Rolf Disselinkötter

Jörg Gebhardt

ABB Corporate Research,
Sensors and Signal Processing
Ladenburg (Allemagne)
rolf.disselinkoetter@de.abb.com
joerg.gebhardt@de.abb.com

Rostyslav Tykhonyuk

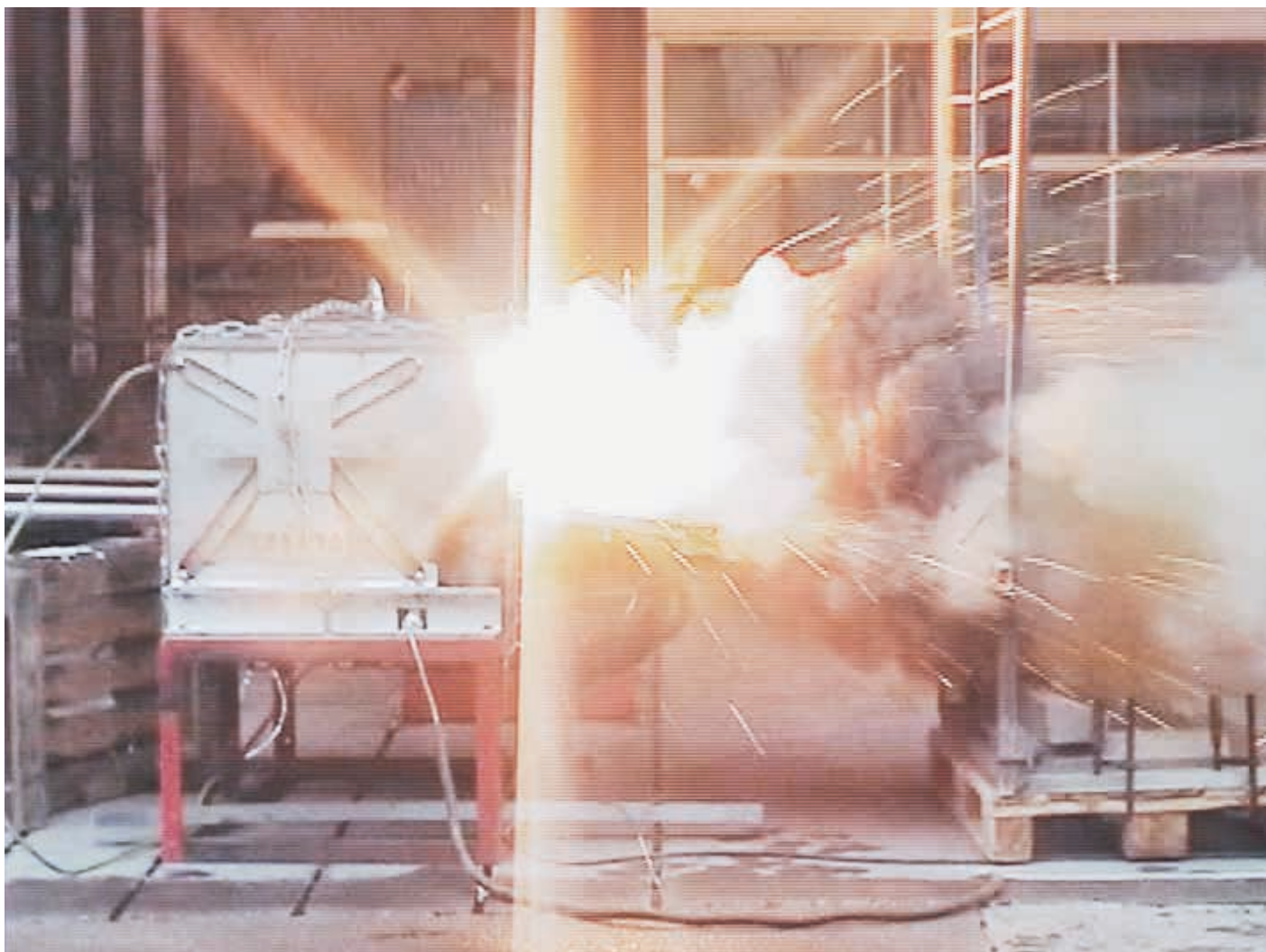
ABB Automation Products GmbH
Göttingen (Allemagne)
rostyslav.tykhonyuk@de.abb.com

Holger Neubert

TU Dresden, IFTE
Dresde (Allemagne)
holger.neubert@tu-dresden.de

Bibliographie

- [1] Gebhardt, J., König, K., « Model-based development for an energy-autonomous temperature sensor », *VDI/VDE Mechatronik 2013*, Aix-la-Chapelle (Allemagne), p. 177–181, 2013.
- [2] Juszkievicz, G., Gebhardt, J., « Virtual drop impact investigation for a mechanical sensor element », *Deutsche Simulia Konferenz*, Bamberg (Allemagne), 2011.
- [3] Gebhardt, J., « Absolute and relative phases in twin-tube structures and performance criteria for Coriolis meters », *SIMULIA Community Conference*, Vienne (Autriche), p. 421–432, 2013.
- [4] Neubert, H., et al., « Transient Electromagnetic-Thermal FE-Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics 4.2 », *2011 COMSOL Conference*, Stuttgart (Allemagne), 2011.
- [5] Disselinkötter, R., « Modeling of Inductive Components », *ABB Research Center Germany, Annual Report 2011*, Ladenburg (Allemagne), p. 32–37.



Avancée détonante

Simuler la montée en pression dans les installations électriques

EDGAR DULLNI, PAWEŁ WOJCIK, TOMASZ BLESZYNSKI – Un défaut d'arc interne dans un appareillage électrique est un arc accidentel de très grande énergie qui entraîne la circulation de courants de court-circuit entre phases et dans la terre. L'arc se traduit par des émissions de gaz brûlants et de fortes surpressions dans l'enveloppe isolée à l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou l'air. C'est un phénomène certes très rare, mais aux conséquences graves (détérioration du matériel électrique et de la construction), voire dramatiques (mise en danger du personnel). La montée en pression dans un bâtiment ne peut être évaluée que par calculs, renforcés néanmoins par des essais spéciaux permettant la mesure de la surpression externe. ABB a pour cela mis au point un programme facile d'emploi à destination des développeurs d'appareillages électriques et ingénieurs en génie civil.



Les élévations de pression imposent aux enveloppes de fortes contraintes mécaniques qui peuvent entraîner leur rupture. Pour l'éviter, un dispositif de décharge s'ouvre à une pression donnée. L'arc de défaut interne produit en effet des gaz chauds qu'il faut canaliser pour les évacuer dans le milieu environnant. La plupart du temps, l'appareillage est surmonté de conduits d'échappement débouchant souvent sur un caisson de détente ou un dispositif d'absorption dans lequel les gaz chauds sont refroidis avant évacuation.

Les appareillages doivent répondre à des normes, comme la CEI 62271-200 [1], qui garantissent la sécurité des biens et des personnes, y compris en cas d'arc interne. Des essais de type → 1 visent à valider non seulement la tenue mécanique de l'enveloppe à la surpression, mais aussi l'évacuation des gaz chauds, à distance du personnel. La norme CEI 61936-1 [2] oblige les concepteurs du bâtiment à prendre en compte la

montée en pression résultant de ces gaz d'échappement. Pourtant, les essais de défaut d'arc dans l'appareillage électrique ne couvrent pas cet aspect ; l'installation est simulée par un sol, un plafond et deux murs perpendiculaires, sans local étanche au gaz permettant la mesure de pression. L'évaluation de la montée en pression dans un volume fermé ne peut donc se faire que par calcul. Le programme doit aussi simuler l'élévation de pression pour les deux gaz isolants que sont le SF₆ et l'air. Les essais de validation furent effectués en partenariat avec l'école supérieure polytechnique de Rhénanie-Westphalie RWTH (Aix-la-Chapelle) et l'entreprise TÜV Nord Systems GmbH (Hambourg).

Équations mathématiques

La pression de gaz dans une enveloppe est fonction de sa température, suivant la loi bien connue des gaz parfaits. Les équations de bilan massique considèrent le débit massique à l'extérieur de l'enveloppe. Les compartiments sont représentés par leurs volumes effectifs (hors composants) et les zones de décharge de pression intermédiaires. Les propriétés du gaz, comme les chaleurs spécifiques, sont indépendantes de la température et uniformes dans tout le volume [3].

Une fraction, ou « coefficient de transmission thermique k_p », de l'énergie d'arc de défaut chauffe le gaz dans le compartiment de l'arc :

$$Q_1 = k_p \cdot W_{el}$$

La puissance électrique de l'arc est évaluée à partir des courants mesurés et des tensions phase-terre, soit

$$W_{el} = (u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T) t$$

Les tensions mesurées ne sont pas forcément identiques à la tension d'arc car un arc triphasé peut brûler entre deux conducteurs de phase, mais aussi dans l'enveloppe reliée à la terre. L'outil de calcul de pression importe les tensions phase-terre mesurées d'un fichier de données formaté ou applique une tension phase-terre moyenne empirique.

Toutes les grandeurs temporelles de l'outil d'arc interne IAT (*Internal Arc Tool*) d'ABB sont prises en compte avant et après un pas de temps Δt . L'équation de calcul de la masse passant du compartiment de l'arc au compartiment d'échappement s'écrit

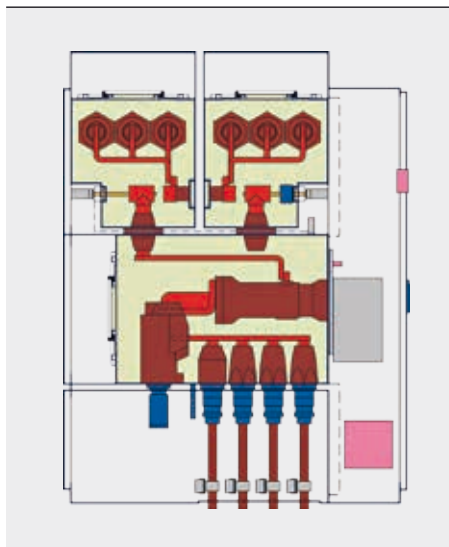
$$m_{12} = \alpha_{12} \cdot p_{12} \cdot w_{12} \cdot t$$

α_{12} désigne l'efficacité du dispositif de décharge de surface A_{12} et considère la contraction du flux gazeux par une ouverture à arêtes vives (0,7 à 1,0), mais aussi la réduction du flux due, par exemple, à une grille ou un dispositif

Photo p. 54

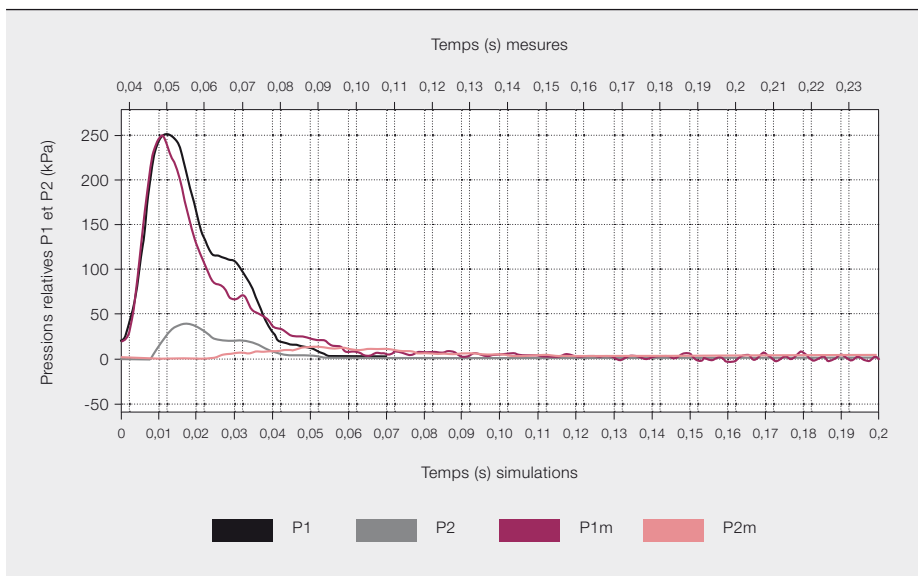
Image tirée d'une vidéo à grande vitesse montrant l'échappement contrôlé des gaz chauds d'un appareillage moyenne tension lors d'un essai d'arc interne. Le logiciel ABB calcule l'évolution de la pression observée dans l'appareillage et le local.

2 Coupe du tableau ZX2 avec amorçage d'un arc dans le compartiment des barres et décharge de la pression dans le conduit supérieur

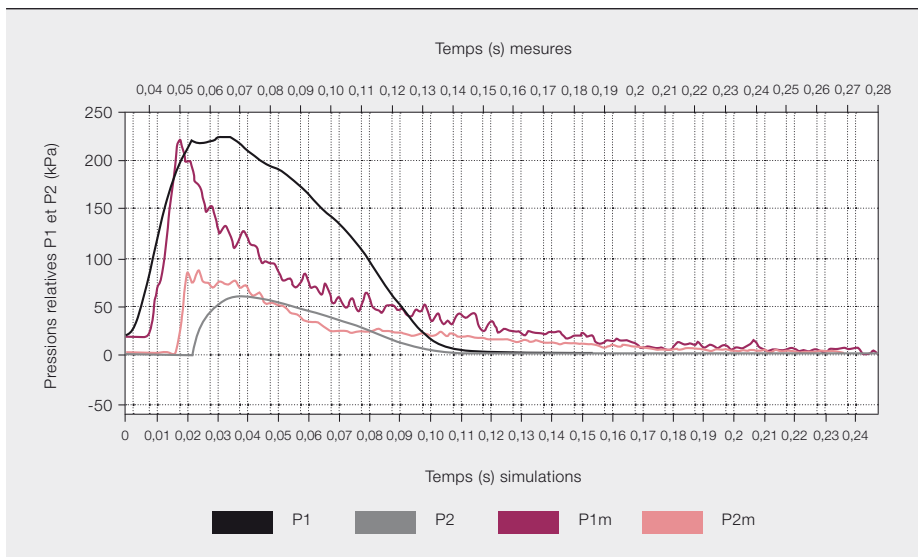


Les essais de type vérifient la tenue à la suppression de l'enveloppe mais aussi l'échappement des gaz chauds à distance du personnel.

3 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc interne dans un tableau ZX2 isolé dans l'air (38 kA)



4 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc interne dans un tableau ZX2 isolé dans le SF₆ (35 kA)



d'absorption. Lorsque le dispositif de décharge s'ouvre, la masse m_{12} s'échappe du volume à chaque pas de temps. ρ_{12} et w_{12} représentent la densité et la vitesse du gaz dans l'ouverture, suivant la loi de Bernoulli [3]. Cette approche mathématique permet de calculer l'élévation de pression dans tous les volumes impliqués.

La précision du calcul est limitée par les simplifications apportées : en supposant des chaleurs spécifiques constantes, on ne tient pas compte de la dissociation des molécules de gaz en fragments (à partir de 6000 K dans l'air et 2000 K dans le SF₆), ce qui n'empêche pas la concordance avec les résultats expéri-

mentaux, aussi pour des températures de gaz supérieures.

Si une grande quantité de gaz s'échappe de la cellule, de moins en moins de molécules de gaz y restent. Si la fraction d'échauffement k_p de l'énergie d'arc était constante dans le temps, la température de gaz augmenterait toujours, dépassant largement les valeurs connues de 20000 K. On évite ce cas irréaliste et source d'instabilités numériques en prenant une valeur k_p fonction de la densité [4]. Cela permet d'étendre le calcul à des durées de défaut plus longues et de déterminer l'élévation de pression dans l'installation.

Descriptif de l'outil IAT

La méthodologie proposée ici a été mise en œuvre avec succès dans le logiciel de simulation de défaut d'arc IAT du centre STC¹ (*Simulation Tools Center*) d'ABB.

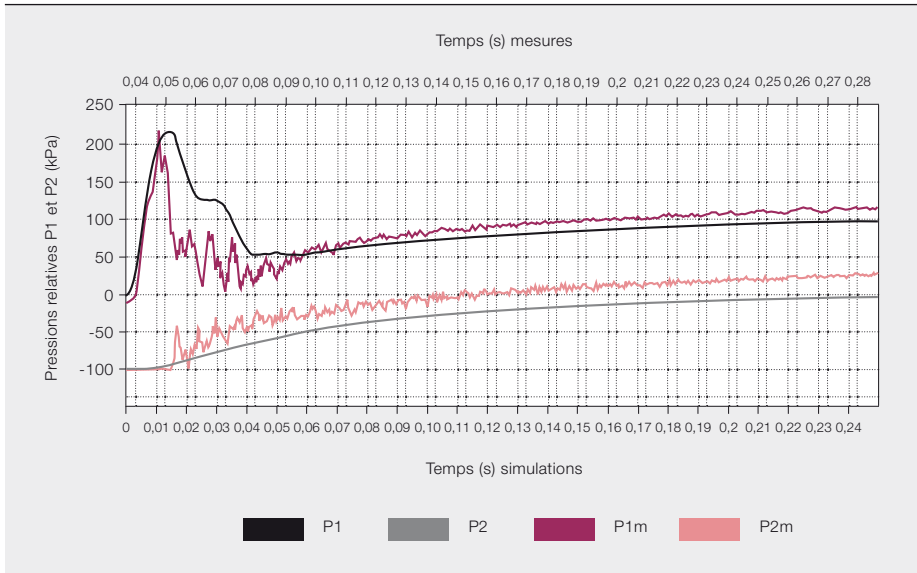
L'outil se compose d'un solveur sous Python et d'une interface graphique Java, aux fonctionnalités suivantes :

- 1) Paramétrage du modèle
- 2) Exécution du solveur
- 3) Affichage des résultats
- 4) Édition de rapport

Note

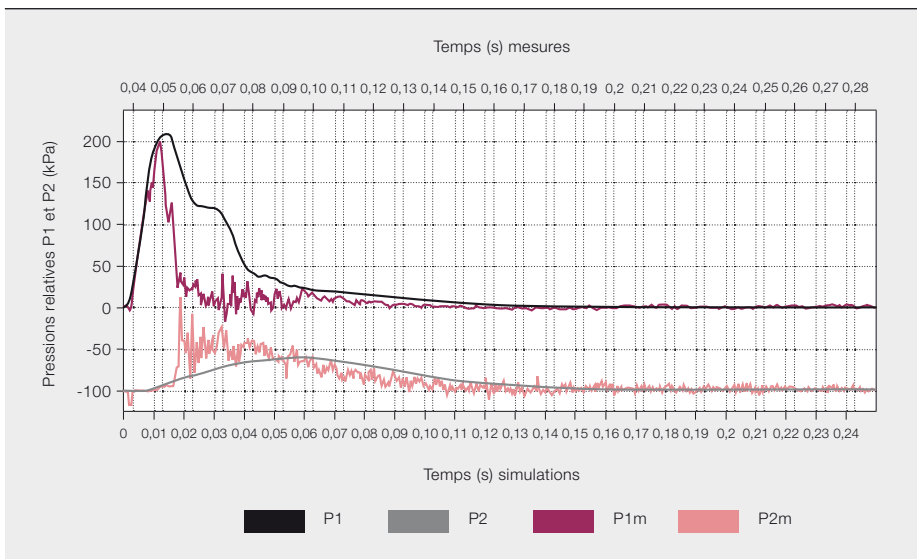
1 Voir encadré → 7, p. 71.

5 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc dans un montage d'essai à caisson fermé de 8 m³ (20 kA)



Pour une durée d'arc maxi de 1 s, la simulation sur portable prend moins de 10 s.

6 Évolution des pressions comme en → 5, mais avec une ouverture de détente de 0,3 m² (20 kA)



Les paramètres du modèle, saisis directement ou choisis dans une liste déroulante, sont validés un à un. Une fois le modèle prêt, l'utilisateur peut lancer la simulation, en étant tout du long guidé par un assistant logiciel. Pour une durée d'arc maximale de 1 s, la simulation sur portable prend moins de 10 s! Les calculs sont effectués avec un pas de temps de simulation constant de 0,05 ms. Aux fins de comparaison avec les essais, les données de mesure peuvent être importées au format de son choix.

On obtient ainsi les courbes caractéristiques suivantes (exemples → 3 à → 9) :

- 1) Pressions/temps
- 2) Courants de phase/temps

- 3) Tensions phase-terre/temps
- 4) Énergie d'arc interne/temps

Les tracés sont modifiables en dynamique et visualisables sans utiliser d'éditeur supplémentaire.

Des fichiers texte contenant les paramètres de simulation (choix des valeurs d'entrée/sortie) et les résultats sont également produits.

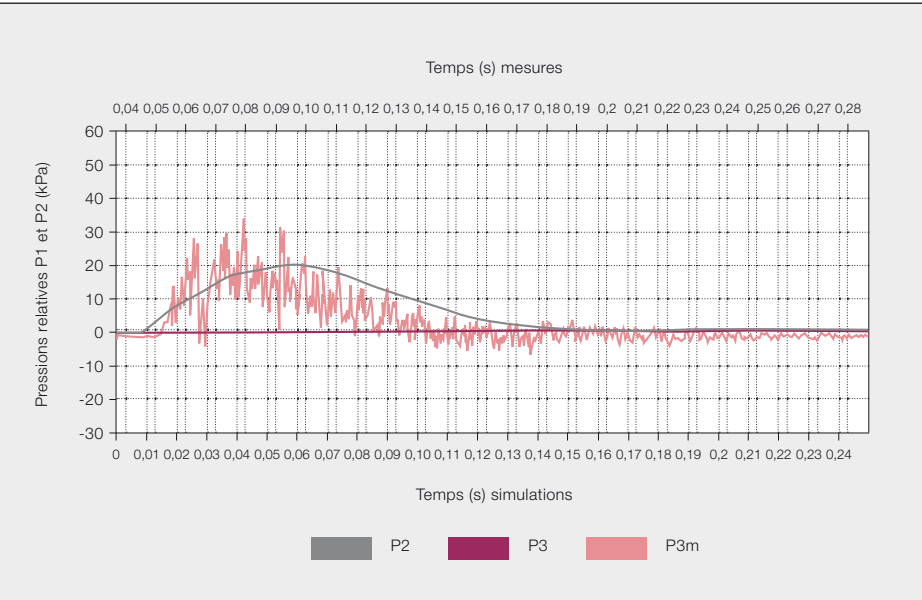
Comparaison des résultats

Les résultats de la simulation IAT furent comparés à ceux des essais obtenus sur l'appareillage ABB et des expérimentations spécialement conçues.

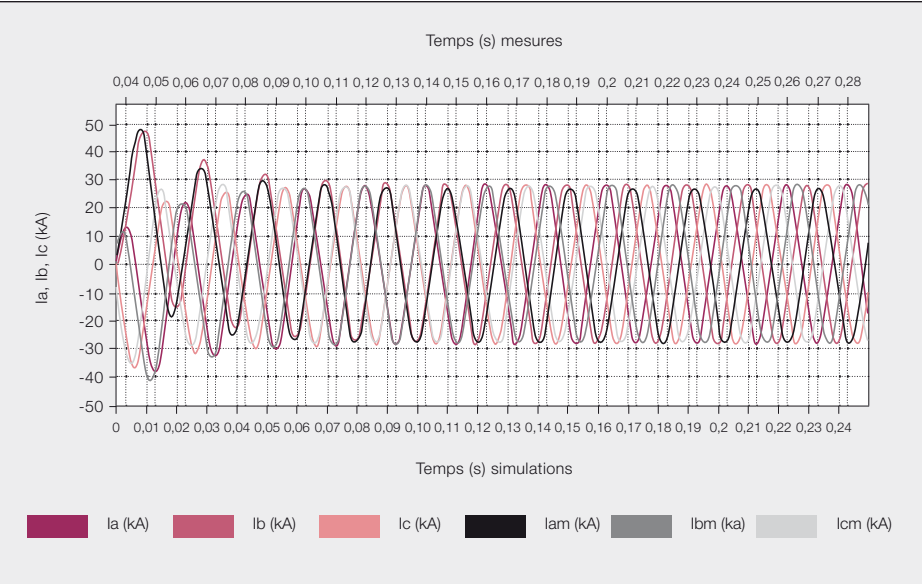
La première comparaison porte sur un appareillage à isolation gazeuse dans lequel on a remplacé le SF₆ par l'air. La figure → 2 est une vue en coupe du tableau moyenne tension ZX2 d'ABB avec un arc s'amorçant dans le compartiment jeu de barres. Le dispositif de décharge de pression est un mince disque d'éclatement de 0,049 m², qui ouvre dans le conduit supérieur à une surpression de 220 kPa. Un courant de défaut de 39 kA est appliqué pendant 1 s. Les oscillogrammes tracent les évolutions au cours du temps de la pression calculée dans le compartiment de l'arc (en rouge en → 2, pourpre sur les oscillogrammes) et le conduit d'évacuation (bleu en → 2, rose sur les courbes), ainsi

L'échappement des gaz chauds et l'élévation de pression qui l'accompagne, dans un volume fermé, ont fait l'objet d'expériences spécifiques.

7 Pression dans le caisson mesurée à un autre endroit qu'en → 6



8 Courants de phase appliqués et mesurés montrant l'asymétrie initiale



que les données mesurées (respectivement noir et gris), jusque dans les 250 ms qui suivent la naissance de l'arc.

En → 3, la concordance entre mesure et calcul de la montée en pression, du pic de pression et de sa décroissance rapide dans le compartiment rempli d'air est bonne. k_p est donné à 0,5, conformément aux données publiées, et la tension d'arc (phase-terre) de 300 V est tirée de l'essai. Le calcul de la pression dans le conduit d'échappement concorde moins bien avec les résultats d'essais, du fait des effets du temps d'écoulement des gaz dont IAT ne peut pas tenir compte.

Pour le tableau isolé au SF₆ → 4, la reproduction du pic de pression est là encore bonne, mais sa chute après ouverture du disque d'éclatement est moins satisfaisante. Le calcul fournit un temps de séjour du gaz plus long que celui observé en essai. K_p est donné à 0,75, conformément aux publications, et la tension d'arc est de 400 V, suivant les essais.

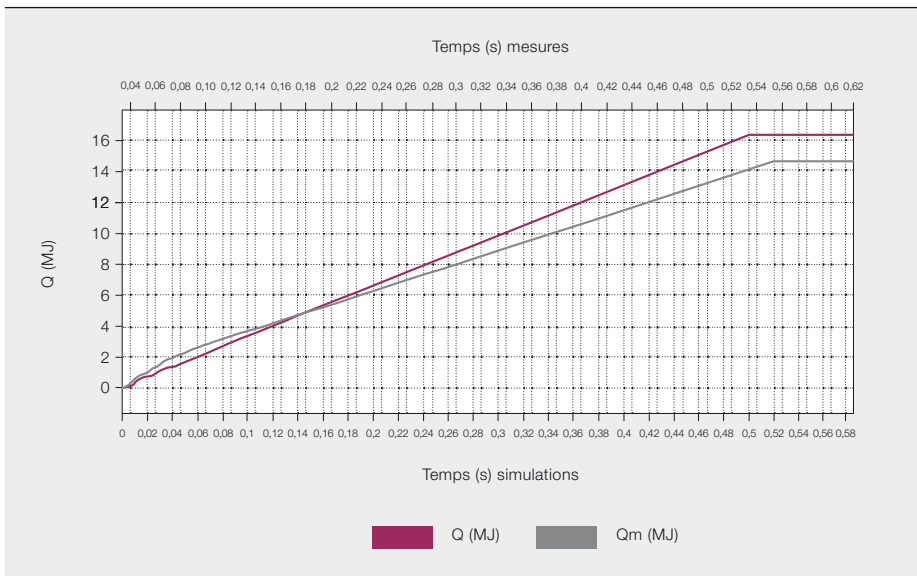
Beaucoup d'essais furent recalculés. L'imprécision du pic de pression dans le compartiment de l'arc, de l'ordre de ±20 %, est surtout fonction de l'incertitude de la pression de réponse du dispositif de décharge. La chute de pression après détente est simulée avec une erreur d'un facteur de 2. Cela est sans

importance pour l'évaluation de la tenue à la pression de l'appareillage puisque le facteur décisif est la pression maxi.

Le pic de pression dans les conduits d'échappement est aussi calculable, mais au prix d'une incertitude pouvant atteindre ±40 % sous l'effet des ondes de choc qui se propagent dans les conduits allongés.

L'échappement des gaz chauds et la montée en pression qui l'accompagne, dans un local électrique fermé, firent l'objet d'une simulation spécifique [4], à l'aide d'un caisson étanche au gaz de 8 m³. Le graphique → 5 montre les pressions déterminées par l'essai et le calcul.

9 Énergie d'arc tirée de la multiplication des tensions phase-terre et des courants (rouge = calcul IAT, gris = mesure)



La chute de pression dans le compartiment de l'arc, après intervention du dispositif de décharge, s'écarte de la mesure, mais la saturation de la montée en pression dans le caisson est simulée de façon satisfaisante.

Cela est dû à la décroissance de k_p mise en œuvre dans IAT, qui est liée à la diminution de la densité de gaz dans le compartiment clos de l'appareillage. Si l'énergie d'arc chauffait le volume total du caisson de façon uniforme dans le temps, comme c'est le cas pour un arc brûlant librement, la pression augmenterait linéairement pour atteindre 345 kPa, au lieu des 154 kPa de la mesure et des 114 kPa du calcul.

L'outil de calcul prend en compte cette dépendance à la densité de k_p , suivant la formule appliquée pour $p(t) < p_c$:

$$k_p(t) = k_p \cdot c_0 \cdot (p(t)/p_0)^{0,5}$$

c_0 est adapté pour garantir une transition continue depuis k_p initial ; p_c vaut 1 % de la densité de gaz normale p_0 à 100 kPa pour l'air, et 20 % pour le SF₆. Les résultats correspondants sont obtenus à partir des essais effectués dans le SF₆ et l'air, dans une configuration identique [4].

L'outil peut aussi calculer l'élévation de pression dans les locaux dotés d'ouvertures de détente des gaz (fenêtres ou clapets, par exemple).

La figure → 6 reproduit un résultat d'essai avec le même caisson de 8 m³ mais une surface de décharge de 0,3 m². La géométrie réelle du local et la position de l'ouverture et des capteurs ne peuvent pas être intégrées à IAT et entraînent des écarts par rapport à la réalité. On le voit en → 6 avec, par exemple, la pression initiale plus élevée, due à l'écoulement direct du gaz en direction du capteur. Un autre capteur, placé à côté, offre une meilleure concordance avec le calcul → 7. Seule une simulation d'écoulement des fluides CFD peut donner de meilleurs résultats.

Pression estimée

Les résultats d'essai et de simulation montrent que les pics de pression et les volumes d'échappement des gaz dans les compartiments de l'appareillage concordent dans des limites raisonnables. Les imprécisions sont dues aux simplifications apportées à l'outil IAT (hypothèse du gaz parfait et fonction d'écoulement générique). Ce dernier peut servir à simuler les effets de la pression des arcs de défaut dans l'appareillage électrique, avec une incertitude de prédiction du pic de pression d'environ ±20 % dans le compartiment de l'arc. Il faut une tension d'arc fiable, tirée des essais réalisés sur des matériels électriques similaires. L'outil permet également d'estimer la montée en pression dans un volume d'échappement ou un local équipé ou non d'ouvertures de détente, avec des marges de sécurité adéquates. Il a toute son utilité pour

Les imprécisions sont dues aux simplifications introduites dans l'outil IAT (hypothèse de gaz parfait et fonction d'écoulement générique).

améliorer l'efficacité de la conception et la sécurité, surtout quand les essais en conditions réelles sont impossibles ou irréalisables.

Edgar Dullni

ABB Power Products
Ratingen (Allemagne)
edgar.dullni@de.abb.com

Pawel Wojcik

Tomasz Bleszynski
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
pawel.wojcik@pl.abb.com
tomasz.bleszynski@pl.abb.com

Bibliographie

- [1] Appareillage à haute tension – Partie 200 : appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV, norme CEI 62271-200, 2011.
- [2] Installations électriques en courant alternatif de tension nominale supérieure à 1 kV – Partie 1 : règles communes, norme CEI 61936-1, 2010.
- [3] CE/GT A3.24, Tools for the Simulation of Pressure Rise Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear, brochure CIGRÉ (en anglais), à paraître en 2013.
- [4] Dullni, E., Schumacher, M., Pietsch, G., « Pressure rise in a switchroom due to internal arc in a switchboard », 6th Int. Symp. on Short-Circuit Currents in Power Systems, p. 4.5.1–4.5.7, Liège (Belgique), 1994.
- [5] Sulphur Hexafluoride, brochure Solvay Fluor und Derivate GmbH.



Du virtuel au réel

La robotique et l'automatisation industrielles à l'ère du prototypage et de la mise en service virtuels

RAMON CASANELLES, XIAOLONG FENG, THOMAS REISINGER, DIEGO VILACOPA, DANIEL WÄPPLING, PETER WEBER – Concevoir des applications et des équipements industriels a toujours été une activité multidisciplinaire conjuguant savoir-faire, expérience et créativité. Ce qui a changé aujourd'hui, c'est l'obligation de tester et de valider les solutions élaborées ou les méthodes utilisées pour garantir les meilleurs produits. Chez ABB, les méthodes empiriques du passé ont cédé la place à des techniques ultramodernes de prototypage et de mise en service virtuels afin d'optimiser les performances des systèmes robotisés et automatisés. Le prototypage virtuel simplifie la conception des produits tout en améliorant les études de détail et les essais fonctionnels d'un système, tandis que la mise en service virtuelle permet de valider les fonctionnalités applicatives des automatismes avant leur mise en service effective. Le logiciel *RobotStudio* d'ABB raccourcit les délais de mise en service, grâce à des simulations réalistes.

Photo p. 60

Les robots ABB, comme l'IRB 7600FX de l'atelier d'emboutissage Olofström de Volvo en Suède, sont simulés pour mieux répondre aux exigences de plus en plus contraignantes et complexes.

Les robots industriels, tout comme les systèmes d'automatisation qui les intègrent, font l'objet d'exigences toujours plus fortes et complexes. Les constructeurs de machines et les intégrateurs de systèmes sont mis au défi de fournir et d'installer des solutions plus fiables, plus performantes, de meilleure qualité et moins chères, dans des délais toujours plus serrés.

Les ingénieurs ABB relèvent ce défi de deux manières. D'une part, ils conçoivent les produits selon une approche mécatronique, en travaillant simultanément sur leurs aspects mécaniques, électriques et logiciels. D'autre part, ils exploitent les technologies de simulation les plus récentes, y compris les simulations dynamiques, la conception assistée par ordinateur (CAO) 3D, l'analyse par éléments finis, l'étude probabiliste et l'optimisation.

Conception virtuelle

Un robot industriel est un système mécatronique doté d'une structure multi-axe et piloté par une armoire de commande. Le bras articulé se compose de différentes liaisons mécaniques, de réducteurs de vitesse, de servomoteurs et de freins. Selon l'application programmée, le robot exécute des mouvements et accomplit des tâches de manière automatisée. Son armoire de commande renferme un automate de calcul des trajectoires et des servovariateurs pour le pilotage des moteurs électriques.

Concevoir un robot est un processus complexe et itératif, en quatre grandes étapes :

- Étude cinématique : choix du nombre d'axes, de la longueur du bras et de sa configuration ;
- Étude mécanique : choix de la structure poly-articulée, des moteurs, des freins et des réducteurs (y compris les paramètres de commande des axes), en fonction du temps de cycle et de la durée de vie requis ;
- Étude thermique : détermination du comportement thermique du bobinage des moteurs et de leurs arbres, sur la base des propriétés thermiques recherchées ;
- Étude de rigidité : évaluation des performances du robot par une analyse de la fréquence propre ou du suivi de trajectoire.

Le prototype virtuel et les simulations servent à évaluer et à spécifier avec précision la conception du robot en tenant compte simultanément d'une multitude de paramètres (masse, vitesse, accélération, précision, etc.).

Le prototype virtuel sert à évaluer avec précision la conception du robot en tenant compte simultanément d'une multitude de paramètres.

Optimiser le temps de cycle d'un robot de chargement/déchargement de presses au sein d'un atelier d'emboutissage, par exemple, nécessite de caractériser les réducteurs et de sélectionner les paramètres de commande de la cinématique avec un double objectif : minimiser à la



La mise en service virtuelle permet de tester le système de manière efficace et transparente.

fois les temps de cycle et le couple réducteur. Pour le prototypage virtuel, les ingénieurs ont recours à l'optimisation multi-objectif qui cherche le meilleur compromis entre temps de cycle et couple réducteur. Des milliers d'essais permettent ainsi de maximiser les performances de la ligne de presses tout en minimisant le couple.

C'est par cette démarche qu'ABB a mis au point sa solution innovante TRX¹ (*Twin Robot Xbar*) → 1 d'automatisation robotisée des lignes de presses. Cette optimisation retranscrit de manière quantitative l'impact des performances du robot sur la conception et le coût de la cinéma-

Le prototypage virtuel [1, 2] simplifie aussi considérablement les études de détail et les essais fonctionnels d'un système. Avant d'aller plus loin, une étude de conception réunit les ingénieurs mécaniciens, électriciens et logiciels. Un modèle 3D créé par les ingénieurs mécaniciens devient un prototype virtuel pour les ingénieurs roboticiens. Avec l'outil ABB de simulation et de programmation hors ligne RobotStudio, ils positionnent les robots virtuels dans le modèle, programment les tâches et les trajectoires, et vérifient leur volume de travail. La programmation et le débogage des applications robotisées se font dans le même environnement et s'appliquent immédiatement au prototype virtuel en utilisant des armoires de commande elles aussi virtuelles, ce qui accélère les cycles de développement et de validation. Si le modèle doit être retouché, par exemple, pour des raisons de volume de travail, les modifications nécessaires sont aisément renvoyées aux ingénieurs mécaniciens.

L'utilisation de prototypes virtuels en phase d'études de détail ne se limite pas aux applications robotiques. Les simulations peuvent couvrir un périmètre beaucoup plus large comme, par exemple, le développement d'applications complexes de commande d'axes ou de commande automate, procurant d'importants avantages en matière de développement et d'essais.

Un automate virtuel émule exactement le comportement d'un automate réel, mais sur un PC standard.

Mise en service virtuelle

La mise en service virtuelle est une méthode de simulation servant à valider les fonctionnalités d'un système d'automatisation avant sa mise en service réelle. Elle reproduit le comportement de l'équipement dans un environnement logiciel pour une transition aisée du virtuel au réel.

tique. Exemple: l'examen de deux valeurs extrêmes sur le front de Pareto révèle que la ligne de presses peut être plus performante de 5 % en augmentant de 7 % le coût de la cinématique du robot.

Intégration des systèmes

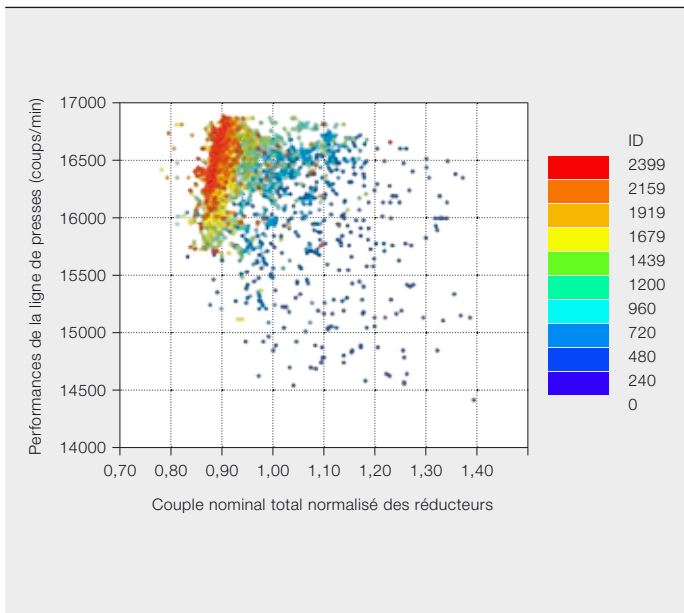
Une fois le robot industriel conçu, il doit être intégré à un système d'automatisation. Avec les autres éléments constitutifs (automates, moteurs et variateurs, périrobotique et logiciel), il devient partie intégrante d'une solution automatisée.

Pendant les essais et l'implémentation, des méthodes de mise en service virtuelle comme HIL (*Hardware-In-the-Loop*) et SIL (*Software-In-the-Loop*) sont utilisées pour intégrer et tester le système jusqu'à sa réception.

Note

1 Solution composée de deux robots 4 axes reliés par une barre transversale.

2 Solution robotisée TRX dont la cinématique a été conçue par optimisation multi-objectif → 5



3 Atelier d'emboutissage virtuel créé avec RobotStudio



4 Modèle d'atelier d'emboutissage virtuel



Selon la phase testée, l'architecture de mise en service virtuelle appliquée s'adapte au stade de développement du

La transition du virtuel au réel, simple et rapide !

procédé. Au début des essais, on a recours à une méthode SIL suivie d'une méthode HIL, plus adaptée. Si la première suppose l'utilisation d'automates virtuels, la seconde inclut à l'environnement d'essai les automates exécutant l'application à valider. Un automate virtuel émule exactement le comportement d'un automate réel, mais sur un PC standard.

Aujourd'hui, la méthode HIL est la plus pratiquée : elle relie, sur un bus de terrain, un automate dédié à un PC exécutant un modèle de simulation du système. Cette architecture permet l'exécution en temps réel des applications de contrôle-commande. Les systèmes complexes actuels imposent généralement l'interconnexion de plusieurs automates de différents types pour accomplir les tâches d'automatisation. En conséquence, simuler des parties plus importantes ou un système complet exige une infrastructure matérielle uniquement disponible dans les phases ultérieures du projet.

Pour l'efficacité des essais au tout début du projet – menés, dans l'idéal, parallèlement au développement de l'application –, il importe de disposer d'un moyen simple pour charger et transférer les programmes dans l'environnement d'essai virtuel tournant sur le PC de développement applicatif. Il est indispensable de détecter les problèmes le plus tôt possible et de les régler sans grand effort, d'autant que la composante logicielle d'un système d'automatisation s'est considérablement étoffée au fil du temps et continue de croître.

Pour simuler le système ou la machine cible, un modèle virtuel du système est nécessaire, et des capteurs et actionneurs doivent être modélisés. Le logiciel RobotStudio possède des composants intelligents qui imitent le comportement de capteurs/actionneurs réels et dispose d'une interface pour les relier à des automates réels ou virtuels, afin de simuler la totalité d'un système. Ces composants simplifient l'intégration des fonctionnalités de différents automatismes dans l'environnement de mise en service virtuelle.

Lignes de presses transfert

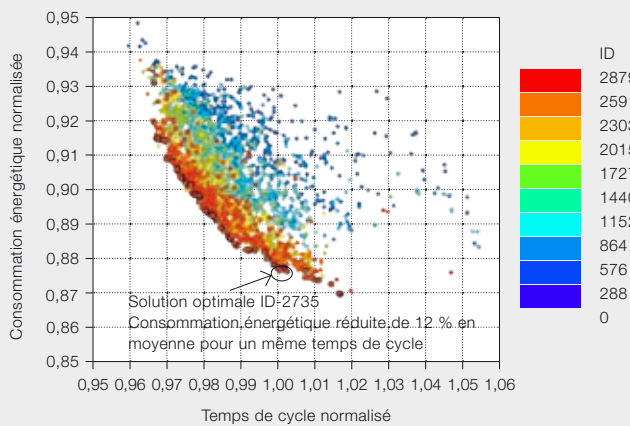
Une ligne de presses robotisée d'une gamme d'emboutissage automobile nous permet de démontrer l'utilité de la mise en service virtuelle. Si la taille et la puissance des presses empêchent les essais en vraie grandeur, la mise en service virtuelle permet de tester le système de manière efficace et transparente.

Dans une ligne de presses transfert, la tôle, appelée flan, est mise en forme par emboutissage et découpage. Les pièces obtenues sont ensuite assemblées par soudage pour en faire une carrosserie automobile. La première presse réalise l'emboutissage à proprement parler alors que les presses suivantes découpent et détournent le flan.

La ligne transfert pèse lourd dans le coût du système d'automatisation complet ; il convient donc d'en maximiser la productivité, par une coordination optimale des robots et des presses, afin d'améliorer le retour sur investissement.

Pour créer le modèle de simulation, tous les éléments constitutifs du système sont introduits dans RobotStudio → 3. Ils sont alors simulés par les composants intelligents, y compris toutes leurs propriétés logiques, cinématiques et dynamiques qui feront que le modèle se comportera exactement comme dans la réalité. Cette simulation concerne les dispositifs suivants :

- Presses avec leurs dimensions, commande, signaux d'entrée/sortie, course ;
- Robots et autres automatismes ;
- Différents composants mécaniques comme les tables de défilage, la machine de nettoyage des flans, la transitive et les sécurités.



La technique du prototypage virtuel permet d'évaluer l'efficacité énergétique d'un produit, critère de plus en plus décisif. L'objectif est de sélectionner les paramètres de commande de la cinématique (couples admissibles et vitesse, par exemple) qui minimiseront à la fois la consommation énergétique et le temps de cycle [3], deux objectifs a priori contradictoires.

On utilise la méthode du front de Pareto pour minimiser ces deux fonctions objectives distinctes et obtenir ainsi un ensemble de solutions de compro-

mis. L'algorithme d'optimisation MOGA-II [4], qui met en œuvre des méthodes sans gradient particulièrement bien adaptées à ce type de problème, est utilisé pour maximiser l'efficacité énergétique.

L'optimisation elle-même est un processus itératif. Les variables de conception (ici, les paramètres de commande de la cinématique) sont modifiées et le logiciel de simulation des axes du robot est exécuté avec la nouvelle série de variables pour calculer la consommation énergétique. Les résultats de la simulation servent à calculer à la fois la fonction objectif et les valeurs des contraintes. Cette boucle est arrêtée une fois atteint le nombre limite maximal d'évaluations de la fonction définie pour l'optimisation MOGA.

Dans le cas contraire, l'optimiseur analyse la fonction objectif et les valeurs des contraintes, et propose une nouvelle série d'essais des valeurs des variables de conception. La boucle d'optimisation se poursuit jusqu'à ce que le critère de convergence soit satisfait.

La figure ci-contre montre l'espace des objectifs, la frontière Pareto de ce type d'optimisation multi-objectif et le compromis entre temps de cycle et consommation énergétique. La solution retenue à partir de l'optimum de Pareto montre une baisse de l'ordre de 10 % de la consommation sans dégradation des performances du robot.

S'ils existent, ces composants sont récupérés de bibliothèques; dans le cas contraire, ils peuvent provenir d'autres sources ou être créés au vu du cahier des charges du client.

Une fois configuré virtuellement, l'environnement est prêt pour les simulations réalistes du système. Différents scénarios, correspondant à la réalité, peuvent être simulés. La figure → 4. reproduit un modèle d'atelier d'emboutissage virtuel avec la trajectoire programmée des robots. L'optimisation des performances de la ligne transfert peut obliger à reprogrammer des robots, à modifier la course des presses et leur logique ou encore à les reparamétrer. Connaître les performances du système avant installation sur site est un réel atout face aux risques économiques de contre-performances une fois installé.

Les simulations virtuelles ne se cantonnent pas aux phases de conception et de mise en service. L'introduction de nouveaux procédés de fabrication est également facilitée; d'éventuels défauts sont diagnostiqués ou des améliorations potentielles de la production analysées avant leur mise en œuvre dans le système réel.

Les prototypes virtuels développés en phases de conception du produit et d'étude du système d'automatisation servent également à la maintenance prédictive, à l'identification des composants à remplacer et, dans certains cas, à l'optimisation des programmes robot en matière d'usure, de temps de cycle ou de consommation énergétique.

Enfin, ces prototypes virtuels peuvent être exploités parallèlement au système d'automatisation réel pour tester les équipements ou programmes optimisés virtuellement avant leur intégration au système réel.

Diego Vilacoba

Ramon Casanelles

ABB Discrete Automation and Motion, Robotics
Barcelone (Espagne)
diego.vilacoba@es.abb.com
ramon.casanelles@es.abb.com

Xiaolong Feng

Daniel Wäppling

ABB Corporate Research, Mechatronics
Västerås (Suède)
xiaolong.feng@se.abb.com
daniel.x.wappling@se.abb.com

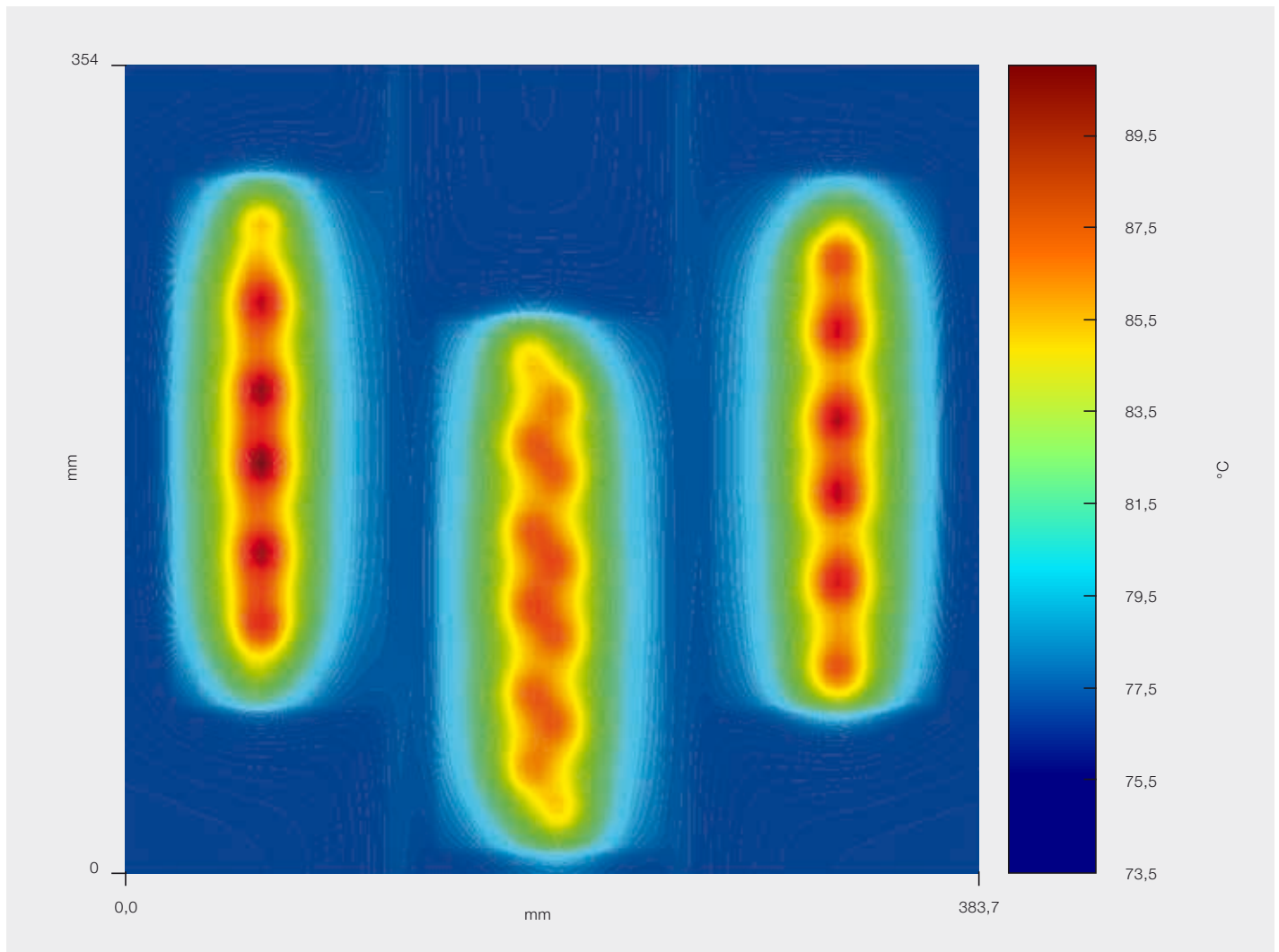
Peter Weber

Thomas Reisinger

ABB Corporate Research, Mechatronics
Ladenburg (Allemagne)
peter.weber@ch.abb.com
thomas.reisinger@de.abb.com

Bibliographie

- [1] Miegel, V., Winterhalter, Ch., « Comprehensive Use of Simulation Techniques to Support New Innovative Robot Applications », *International Symposium on Robotics/Robotik*, Munich (Allemagne) 2006.
- [2] Moorea, P. R., Pua, J., Ngb, H. C., Wonga, C. B., Chonga, S. K., Chena, X., Adolfssonb, J., Olofsgårdb, J., Lundgren, J. O., « Virtual Engineering: An Integrated Approach to Agile Manufacturing Machinery Design and Control », *Mechatronics* (ISR2012), Taipei (Taiwan), 2012.
- [3] Feng, X., Weström, J., Andersson, H., Wäppling, D., Lunderius, S., « Energy Efficient Design of Industrial Robots using Multi-Objective Optimization », *43rd Intl Symposium on Robotics (ISR2012)*, Taipei (Taiwan), 2012.
- [4] Konak, A., Coit, D. W., Smith, A. E., « Multi-objective Optimization using Genetic Algorithms: A Tutorial », *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, p. 992–1007, 2006.



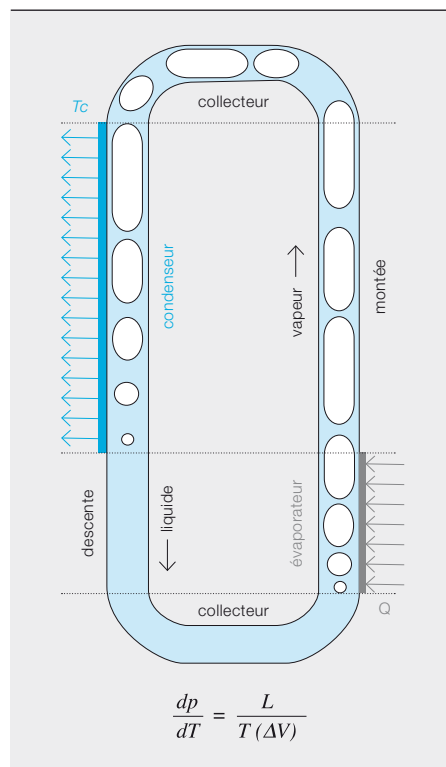
Génie intégré

De nouveaux algorithmes de simulation pour une intégration accrue des convertisseurs électroniques de fréquence

DIDIER COTTET, BRUNO AGOSTINI, STANISLAV SKIBIN, GERNOT RIEDEL, PAWEŁ WOJCIK – L'évocation de l'« électronique de puissance » renvoie sans doute nos lecteurs à une discipline traitant surtout de topologies de circuit et d'algorithmes. Si ces aspects restent primordiaux, l'importance grandissante de l'intégration pose aux concepteurs d'autres défis en matière de refroidissement, d'interconnexion et d'isolation électrique, obligeant par là-même à améliorer la densité de puissance, la compatibilité électromagnétique (CEM) et la fiabilité. Reste un obstacle : la complexité croissante de ces techniques ne permet plus d'optimiser la conception sans recourir à des outils de simulation pointus.

Si les dispositifs modernes à semi-conducteurs autorisent une commutation plus rapide, des pertes plus faibles et des températures de fonctionnement plus élevées, ils posent également des défis inédits en matière d'intégration.

1 Principe du thermosiphon diphasique



L'électronique de puissance joue un rôle catalyseur dans des filières technologiques comme les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique en automatisation industrielle, la gestion des transits de puissance dans les réseaux intelligents (*smart grids*) et les liaisons électriques en courant continu à faibles pertes. Toutes mettent en œuvre des convertisseurs à électronique de puissance dont les performances se mesurent en rendement de conversion, dynamique de commande, fiabilité (ou disponibilité), densité de puissance et coût.

Ce qui fait la différence dans la conception de ces convertisseurs, c'est le choix des techniques d'intégration comme, par exemple, le matériau des boîtiers, le mode de refroidissement, les interconnexions et l'isolant électrique qui permettront de résoudre les problèmes suivants :

- Pertes thermiques ;
- Conduction des courants forts ;
- Isolation haute tension ;
- Bruit électromagnétique ;
- Contraintes électro-thermomécaniques.

Dans ces domaines, les simulations sont aujourd'hui le *sumum* du développement. L'analyse par éléments finis 3D des semi-conducteurs de puissance aide à optimiser les procédés de fabrica-

tion et les propriétés de commutation. Au niveau système, les modes de commande du courant et les algorithmes de régulation des procédés sont simulés au moyen de simulateurs de circuits, souvent combinés à des méthodes d'optimisation multi-objectif.

Ces dernières années ont vu des progrès significatifs dans les semi-conducteurs de puissance à large bande interdite, avec l'arrivée sur le marché de nouveaux dispositifs, d'abord au carbure de silicium (SiC), puis au nitrure de gallium (GaN), autorisant une commutation plus rapide, des pertes plus faibles et des températures de fonctionnement plus élevées. S'ils multiplient les avantages sur le plan de l'efficacité énergétique, de la densité de puissance et des nouveaux champs d'application, ils posent également de nouveaux défis en matière d'intégration. Dans cet article, nous décrivons trois aspects ayant nécessité le développement de nouvelles méthodologies de simulation :

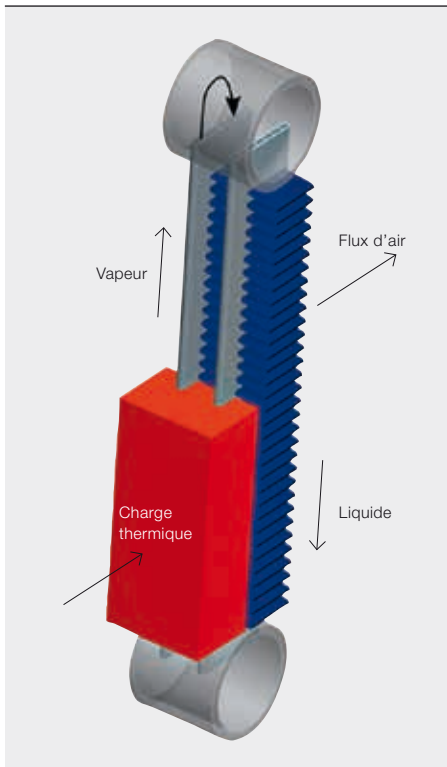
- Le refroidissement ;
- La compatibilité électromagnétique (CEM) ;
- La fiabilité et la durée de vie.

Refroidissement

Aujourd'hui, les deux fluides de refroidissement les plus utilisés en électronique sont l'eau et l'air ; l'un comme

Photo p. 65

Résultat de la simulation de distribution de température sur un échangeur COTHEX



l'autre disposent d'outils de simulation performants (ICEPAK et QFIN, par exemple).

En électronique de puissance, les thermosiphons diphasiques sont une alternative particulièrement intéressante aux méthodes de refroidissement actives [1]. Dans un thermosiphon, le fluide s'écoule par gravité du fait de la différence de densité entre le liquide et la vapeur → 1. Ainsi, l'utilisation de fluides diélectriques et l'absence de pompe avec de forts



La compacité, liée aux fortes densités de puissance, augmente les couplages électromagnétiques entre différentes parties de l'équipement.

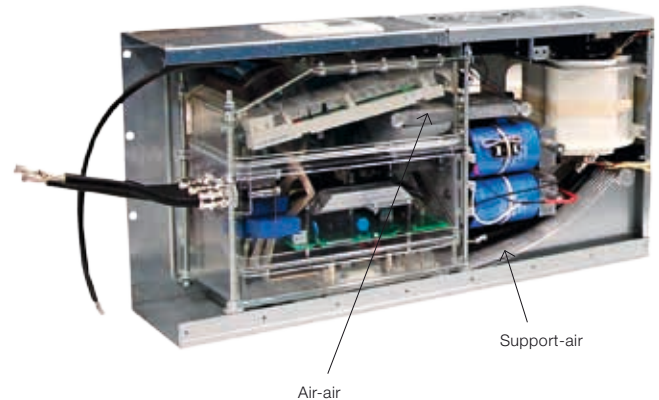
de tubes extrudés à orifices multiples et canaux à structure capillaire disposés en parallèle et brasés sur un support chauffé → 3 pour obtenir la compacité recherchée. La technologie nécessite toutefois de nouvelles méthodes de modélisation, à défaut d'outil du commerce. Les simulations des thermosiphons diphasiques doivent prédire la résistance thermique entre la source de chaleur et le radiateur (air ambiant, par exemple), mais également des paramètres essentiels comme le dessèchement (pour garantir une uni-

formité de température), le flux thermique critique (pour éviter l'emballement), les pertes de pression ou le remplissage optimal de fluide. Le modèle d'ABB est basé sur la réso-

Les thermosiphons diphasiques, une alternative particulièrement intéressante aux méthodes de refroidissement actives

coefficients de transfert de chaleur par ébullition constitue une solution attrayante pour refroidir les dispositifs aux densités de puissance plus élevées. La méthode affiche une fiabilité supérieure à celle d'une solution à eau pompée (ni pièce en mouvement, ni isolant électrique). Partant d'une technologie automobile, ABB a développé un échangeur de chaleur à thermosiphon compact (COTHEX) → 2 formé d'un grand nombre

de tubes extrudés à orifices multiples et canaux à structure capillaire disposés en parallèle et brasés sur un support chauffé → 3 pour obtenir la compacité recherchée. La technologie nécessite toutefois de nouvelles méthodes de modélisation, à défaut d'outil du commerce. Les simulations des thermosiphons diphasiques doivent prédire la résistance thermique entre la source de chaleur et le radiateur (air ambiant, par exemple), mais également des paramètres essentiels comme le dessèchement (pour garantir une uni-



Pour beaucoup de composants, il faut développer des méthodes de modélisation précises à haute fréquence.

minimisés avec un algorithme adapté (SIMPLEX). Ce modèle d'écoulement diphasique est ensuite couplé à un solveur d'équations différentielles partielles (EDP) par volumes finis pour déterminer la distribution de chaleur dans le support → photo p. 65. En l'absence de pompe dans le thermosiphon, le débit du fluide et, donc, les performances du refroidissement dépendent étroitement de nombreux paramètres comme la longueur et le diamètre des tubes, la distribution des flux thermiques, la pression, la nature et la quantité de fluide. Les simulations permettent d'optimiser la conception du produit en limitant considérablement le prototypage → 4.

CEM

Les convertisseurs modernes à électronique de puissance sont des dispositifs complexes dans lesquels des courants et des tensions élevés coexistent avec des signaux de commande et de communication sensibles aux perturbations. La compacité, découlant des fortes densités de puissance, augmente également les couplages électromagnétiques (EM) entre les différentes parties de l'équipement dont la fiabilité et la sécurité sont garanties par son comportement CEM. Ce dernier recouvre trois notions :

- Aptitude à fonctionner dans un environnement EM (*immunité*) ;
- Limitation des parasites EM émis dans l'environnement (*émission*) ;
- Interférences EM entre les différentes parties (*perturbations*).

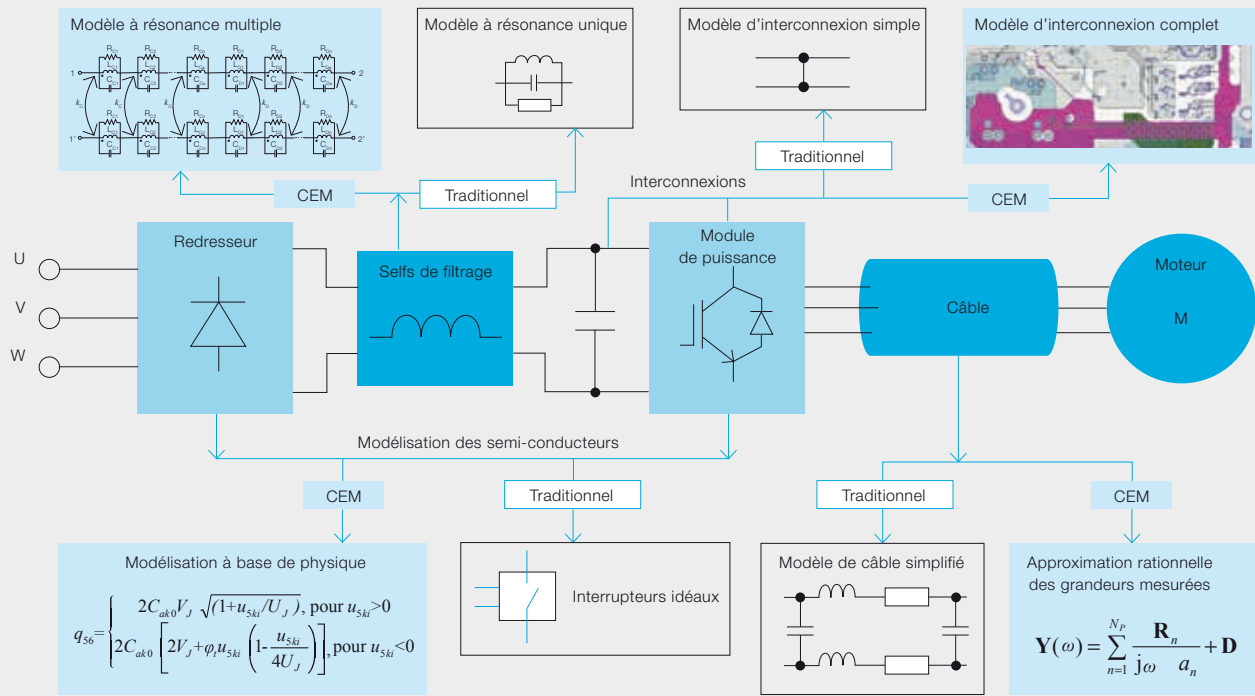
Les deux premières notions sont régies par des normes d'immunité et d'émission. La troisième définit la robustesse et la fiabilité internes d'un dispositif.

La recherche de compacité, de densité de puissance et de rapidité de commutation complique la conception CEM des équipements à électronique de puissance. Trop souvent, les problèmes de CEM sont résolus par des méthodes empiriques avec des mesures effectuées sur des prototypes finis dont les composants et plans de masse sont figés. Modifier le dispositif à ce stade est difficile et entraîne généralement des retards de diffusion du produit.

Une approche plus ingénieuse de la conception CEM débute par des simulations EM au niveau système :

- Les effets de l'environnement EM sur le convertisseur et ses composants sont pris en compte en amont de la conception ;
- Les simulations haute fréquence du convertisseur complet aident à comprendre et à prévenir les éventuelles perturbations EM ;
- Partant des simulations EM, les filtres et plans de masse sont optimisés au moyen d'algorithmes numériques.

Si les avantages de la méthode semblent évidents, préparer des modèles adéquats du convertisseur est compliqué. Pour être sûr d'obtenir des résultats exploitables, il convient de modéliser avec précision non seulement les composants discrets (condensateurs et



Les convertisseurs de puissance installés sur des sites isolés ou difficiles d'accès doivent fonctionner pendant des décennies.

semi-conducteurs, par exemple), mais également les structures mécaniques et interconnexions (radiateurs, circuits imprimés, câbles, etc.). Résultat : le modèle de circuit au niveau système peut facilement totaliser plus de 100 000 éléments !

En fait, les différents types de composants et d'interconnexions existants dans un convertisseur obligent à utiliser plusieurs outils et méthodes de modélisation → 5. Pour certains (circuits imprimés, radiateurs et condensateurs), les outils du commerce sont là, mais pour beaucoup d'autres (longs câbles de puissance triphasés, selfs de mode commun, etc.), il a fallu développer des méthodes de modélisation HF précises [2, 3]. Ainsi, les simulations CEM d'appli-

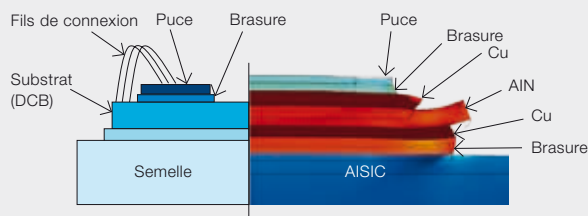
cations d'électronique de puissance ont débouché sur une architecture plus complexe nécessitant le développement et la mise en œuvre de nouveaux outils et techniques de modélisation des composants, en collaboration avec le groupe STC d'ABB → 7. Elles ont également requis des compétences pointues pour sélectionner et combiner des modèles de composants en un modèle de niveau système, et réaliser le post-traitement et l'analyse des grandeurs simulées.

Fiabilité et durée de vie

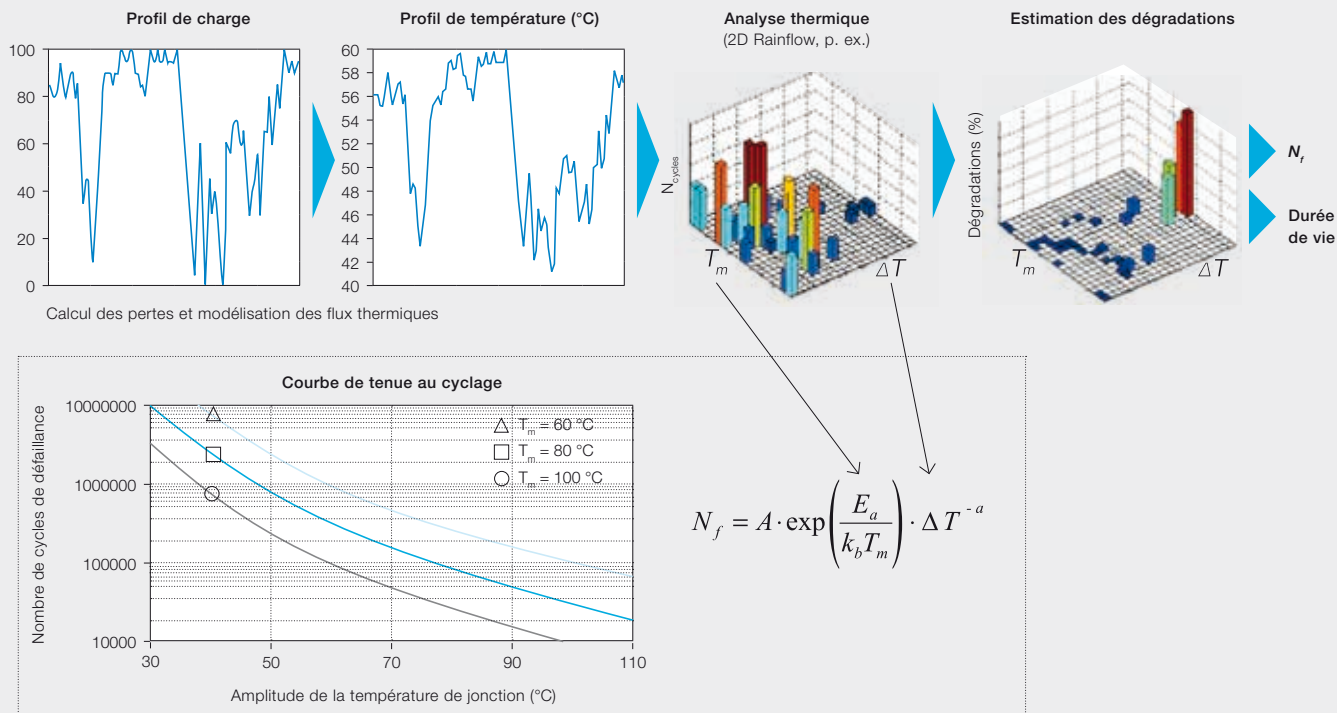
Les convertisseurs de puissance installés sur des sites isolés ou difficiles d'accès (éoliennes en mer, par exemple) doivent fonctionner pendant des décennies avec un minimum d'entretien et de maintenance. Leur fiabilité sur le long terme est donc primordiale.

Globalement, on peut dire que la fiabilité d'un système est le produit de la fiabilité de ses parties. La défaillance d'une partie, par fatigue ou surcharge, peut entraîner des dysfonctionnements de l'ensemble. Plus les contraintes (électriques, thermiques, hygrométriques, entre autres) subies par chacune des parties sont fortes, plus la probabilité d'une défaillance est élevée.

Matériau	CDT ppm/K Changement longueur Δl
Fil de connexion (Al)	23
Puce (IGBT) Si	3,5
Brasure puce (SnPb)	29
AlN-DCB	10,7
Brasure substrat (SAC)	17
Semelle (Cu)	17



Vue en coupe d'un module d'IGBT. À droite : simulation EF montrant la déformation due au cyclage thermique (100 x saturé) [Source : Samuel Hartmann]



Les interrupteurs semi-conducteurs sont au cœur de tout système à électronique de puissance. La plupart du temps, ils sont assemblés dans des modules qui assurent les fonctions d'isolation, de distribution interne du courant et de protection. Ces derniers associent des matériaux hétérogènes ayant chacun leur propre coefficient de dilatation thermique (CDT) → 6. Lorsqu'ils sont soumis à des variations de température (suite à des fluctuations de charge, par exemple), les différences de CDT provoquent une contrainte mécanique aux interfaces qui s'usent et finissent par lâcher. C'est le cas, par exemple, de la liaison puce de silicium-fils de connexion en aluminium dans les modules à IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

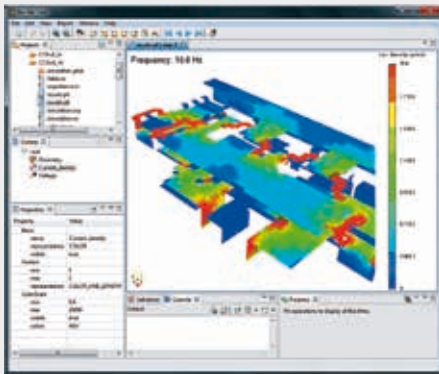
Ce mode de défaillance est bien connu des fabricants de modules IGBT, qui fournissent à leurs clients des courbes de tenue au cyclage pouvant servir aux simulations de durée de vie, selon la procédure suivante :

- Définition d'un profil de charge possible (mission) pour connaître le type de contraintes et d'environnement que les composants subiront au cours de leur vie ;
- Calcul des pertes dans les semi-conducteurs, à partir du profil de charge ;
- Calcul des profils de température en régime transitoire de chaque interrupteur semi-conducteur, en relation avec les modèles de flux thermiques ;
- Analyse du profil de température au vu des principaux paramètres de contraintes, à savoir les oscillations de température ΔT et la température médiane T_m ;
- Estimation des dégradations anticipées pour chaque ΔT et T_m correspondante, à partir des courbes de tenue au cyclage ;
- Estimation de la durée de vie du semi-conducteur sur la base du temps nécessaire au cumul des dégradations critiques.

La procédure vaut pour tous les autres modes de défaillance possibles. Dans les modules de puissance, par exemple, les brasures subissent un cyclage thermomécanique. Contrairement aux fils de connexion en aluminium, les matériaux brasés connaissent un glissement important. Il faut donc recourir à une modélisation par éléments finis ou à d'autres simulations numériques pour calculer les dégradations induites par le profil de charge appliqué qui, au final, donne la durée de vie attendue [4]. À partir de tous les modes de défaillance, la durée de vie la plus courte définit celle du composant (ici, le module IGBT) et, donc, du système qui l'exploite.

Perspectives

La taille et la complexité des simulations évolueront au rythme des progrès de l'informatique. Parallèlement, les outils avancés d'interface logiciel et de script permettront de coupler d'autres simulations dans différents domaines. Certes, la conception des produits et la



Créé en 2009 par le centre de recherche institutionnel ABB de Cracovie (Pologne), STC développe des logiciels de simulation en électronique de puissance pour différentes branches d'activités du Groupe. Les services proposés incluent :

- Le développement d'interfaces graphiques dédiées et conviviales pour les outils et algorithmes créés dans le cadre de projets au sein de différents centres de recherche ABB ;
- La programmation d'interfaces de données entre différents logiciels de simulation propres à ABB et du commerce pour permettre des simulations couplées ;
- La maintenance sur le long terme des outils « maison » ;
- L'assistance aux utilisateurs, y compris la formation sur les outils, généralement en collaboration avec les scientifiques qui ont développé les solveurs.

Les outils créés peuvent, par exemple, étayer les algorithmes de conception pour les nouvelles technologies d'intégration de puissance (nouveaux dispositifs de refroidissement, par exemple). La mise à disposition de ces outils accélère considérablement le transfert de la recherche aux produits.

D'autres outils proposent de nouvelles méthodologies de simulation et de nouveaux solveurs, qui n'existent pas dans le commerce. Ils comblent ainsi un vide important dans le domaine de la simulation comme, par exemple, en compatibilité électromagnétique (CEM). Étape importante vers les simulations couplées : les résultats d'une simulation (ou mesure) peuvent servir de modèles d'entrée à d'autres outils. Le logiciel BBT (*Bus Bar Tool*), dédié à la conception électromagnétique des jeux de barres en est l'exemple type. En plus d'établir les impédances, densités de courant et diagrammes d'intensité du champ, il réalise aussi le post-traitement des forces mécaniques et exporte les modèles macros des barres pour des simulations supplémentaires au niveau circuit (dans SPICE ou MATLAB Simulink, par exemple).

CMG (*Circuit Model Generator*) est un autre exemple d'outil de création de modèles de circuit équivalent haute fréquence des inductances, selfs de mode commun et machines à induction, en utilisant des impédances mesurées ou simulées.

Une modélisation par éléments finis ou d'autres simulations numériques permettent de calculer les dégradations induites par le profil de charge appliqué sur le produit pour en déduire la durée de vie attendue.

prédiction des performances en tireront bien des avantages, mais la manipulation des nombreux outils, modèles et résultats deviendra de plus en plus complexe pour les concepteurs souvent dispersés sur plusieurs sites. Il est donc capital de bâtir l'infrastructure indispensable à ces simulations et d'assurer la maintenance sur le long terme des différents outils et

modèles à la fois du commerce et « maison ». C'est la mission du groupe STC d'ABB → 7.

Le recours ciblé aux simulations avancées permettra aux techniques d'intégration de suivre le rythme des gains de performance des nouveaux dispositifs à semi-conducteurs et de relever leurs défis. L'augmentation permanente de la densité de puissance, l'amélioration de la fiabilité des produits et la baisse du coût par unité de puissance sont les clés de l'avenir de la filière.

Didier Cottet

Bruno Agostini

Stanislav Skibin

Gernot Riedel

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

didier.cottet@ch.abb.com

bruno.agostini@ch.abb.com

stanislav.skibin@ch.abb.com

gernot.riedel@ch.abb.com

Pawek Wojcik

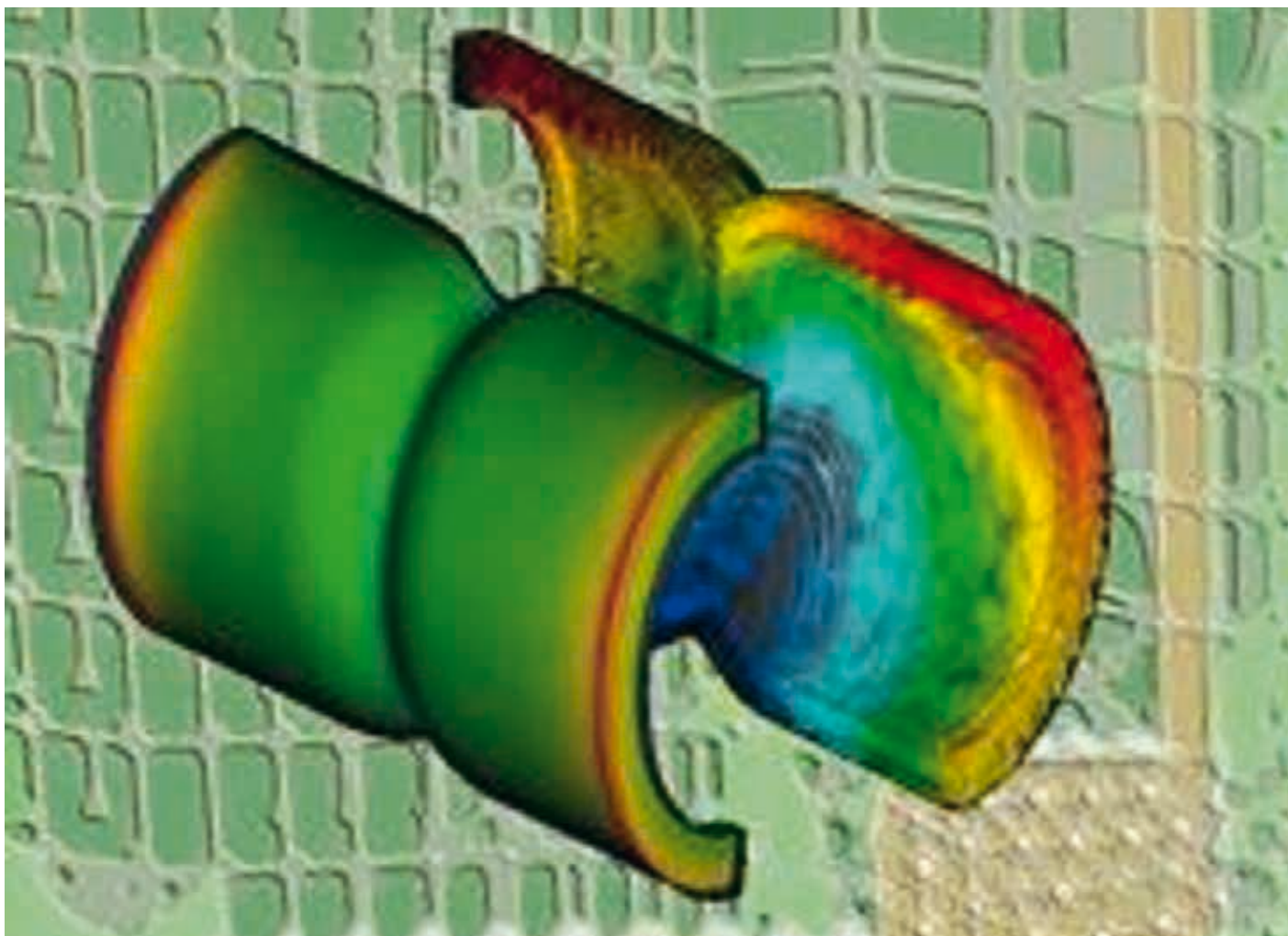
ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

pawel.wojcik@pl.abb.com

Bibliographie

- [1] Agostini, B., Habert, M., « Measurement, observation and modeling of the performances of a transparent gravity driven two-phase loop », *11th International Conference on Advanced Computational Methods and Experimental Measurements in Heat Transfer*, Tallinn (Estonie), 2010.
- [2] Stevanovic, I., Wunsch, B., Madonna, G.-L., Vancu, M.-F., Skibin, S., « Multiconductor cable modeling for EMI simulations in power electronics », *38th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Montréal (Canada)*, 25–28 octobre 2012.
- [3] Stevanovic, I., Skibin, S., Masti, M., Laitinen, M., « Behavioral modeling of chokes for EMI simulations in power electronics », *IEEE Transactions on Power electronics*, Vol. 28, n° 2, p. 625–705, février 2013.
- [4] Riedel, G. J., Schmidt, R., Liu, C., Beyer, H., Alapera, I., « Reliability of Large Area Solder Joint within IGBT Modules : Numerical Modeling and Experimental Results », *CIPS 2012*, p. 1–6, 6–8 mars 2012.



Forme progressive

Des polymères bien moulés grâce à la simulation numérique avancée

ROBERT SEKULA, KRZYSZTOF KASZA, LUKASZ MATYSIAK, LUKASZ MALINOWSKI, DARIUSZ BEDNAROWSKI, MICHAL MLOT, GERHARD SALGE – Avec leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques, les polymères sont les principaux matériaux isolants de nombreux appareillages ABB. Les pièces aux géométries complexes et les multiples paramètres de fabrication posent de véritables défis. Ainsi, la qualité des produits peut être dégradée par des poches d'air, un remplissage incomplet, une gélification prématurée, un mauvais avancement du front de matière, des températures excessives, des fissures et des déformations. Pour maintenir la qualité des produits et minimiser les temps de développement, les ingénieurs ABB utilisent des outils de simulation numérique avancée. Ils leur permettent d'évaluer rapidement des milliers de variantes, d'améliorer les performances et la qualité de conception des produits, et de raccourcir les délais de mise sur le marché.

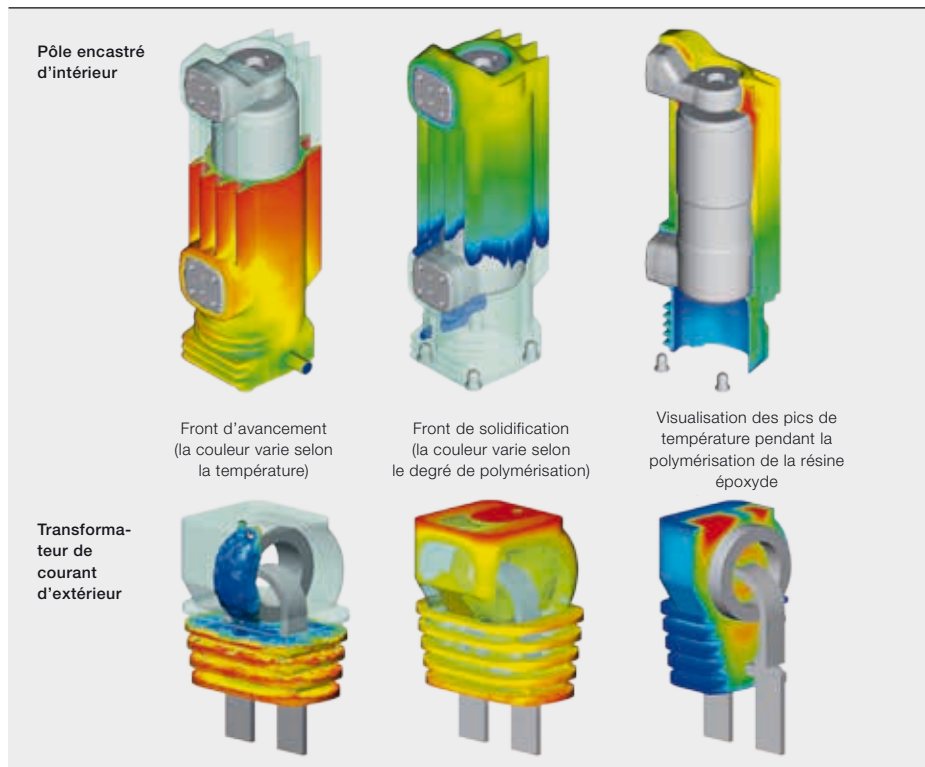


ABB utilise des outils de simulation numérique avancée pour tous ses procédés de transformation des polymères, y compris le moulage réactif, le moulage par injection et le moulage de silicones.

Résines époxydes

Ces résines sont le premier matériau isolant utilisé par ABB pour son appareillage moyenne et haute tension (MT/HT). Le moulage réactif est un procédé complexe avec des phases de coulage, de gélification (solidification) et de refroidissement. La simulation multiphysique, qui associe le calcul numérique avancé des écoulements, des échanges thermiques, des déformations et contraintes mécaniques, fournit aux ingénieurs des résultats plus précis ainsi qu'une meilleure compréhension et maîtrise du procédé de fabrication.

Ils peuvent visualiser le remplissage du moule de résine époxyde, son passage de l'état liquide à l'état solide, la distribution de température avec les pics provoqués par la réaction chimique exothermique, les déformations au cours du

refroidissement ainsi que l'accroissement des contraintes [1, 2] → 1. Une analyse détaillée des résultats les aide à sélectionner les meilleurs paramètres de fabrication. Une bonne thermorégulation en cours de fabrication et des contraintes résiduelles minimales sont des facteurs déterminants de la qualité finale du produit et de sa fiabilité.

Pour exploiter tout le potentiel des composites lors du développement de ses thermoplastiques, ABB a recours à la simulation avancée.

ABB a également développé un outil web automatisé de calcul et de simulation numérique du moulage des résines époxydes, directement utilisable par des ingénieurs d'études ou de production non spécialistes de la modélisation numérique [3]. Le maillage, le paramétrage de la simulation, les calculs et d'autres tâches sont automatiquement réalisés à partir de variables d'entrée comme la géométrie du modèle, les matériaux sélectionnés et les paramètres du procédé. Un rapport synthétique des résultats

permet d'analyser la qualité et l'efficacité du procédé.

Thermoplastiques

À la différence des résines époxydes et autres matériaux thermodurcissables, les polymères thermoplastiques, prédominants dans les produits basse tension (BT) d'ABB, peuvent être fondus et mou-

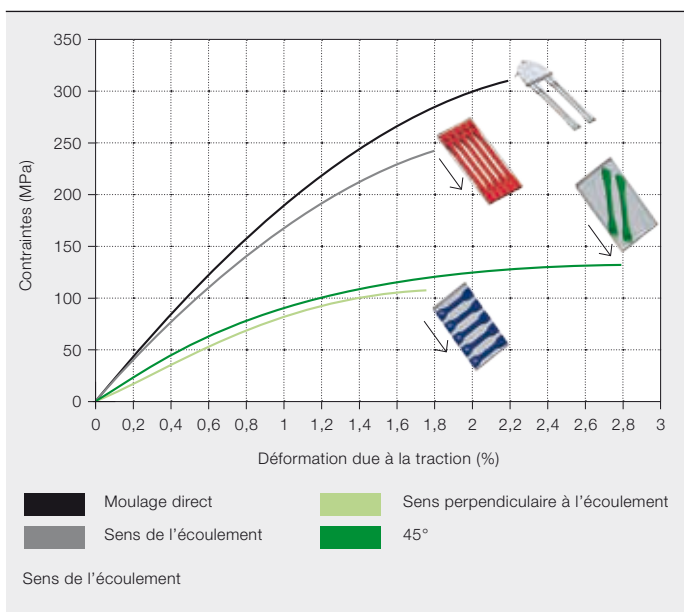
lés lorsqu'ils sont chauffés au-delà de certaines températures, retrouvant leur état solide en refroidissant. Le moulage par injection est le procédé de transformation le plus fréquent pour ces matériaux. Un polymère

chaud et fondu est injecté à grande vitesse (plusieurs centaines de cm³/s) et sous haute pression (jusqu'à 2000 bar) dans un moule froid. Pendant son refroidissement, la pression est maintenue par une unité d'injection pour compenser le retrait. Lorsque la température du polymère est inférieure de 20 à 30 °C à sa température de solidification, la pièce possède une résistance mécanique suffisante pour être éjectée. Le temps de cycle, de quelques secondes à une centaine de secondes, varie selon l'épais-

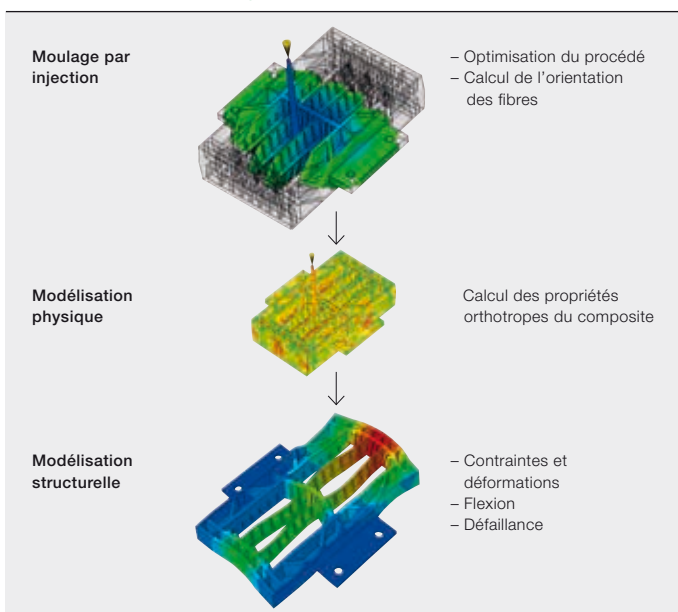
Photo p. 72

Optimisation d'un composant par simulation du moulage par injection

2 Essais de traction comparés du polyarylamide chargé de 50 % de fibres de verre courtes orientées différemment



3 Méthode de simulation du moulage par injection d'un thermoplastique chargé de fibres courtes



La simulation numérique avancée optimise la conception de chaque pièce et de chaque moule avant leur fabrication.

seur de la pièce (0,5 à 6 mm). La conception de celle-ci et du moule pose de multiples problèmes du fait des phénomènes complexes intervenant pendant la transformation du thermoplastique : cisaillement, échauffement visqueux, cristallisation, orientation, refroidissement et déformation (gauchissement).

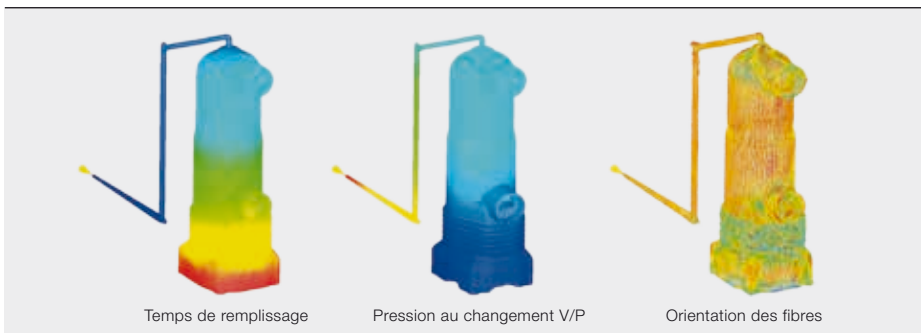
La simulation numérique avancée optimise la conception de chaque pièce et de chaque moule avant leur fabrication. Le logiciel de simulation analyse toutes les phases du procédé : injection, compactage et refroidissement (jusqu'au temps d'éjection et son impact sur la distribution de chaleur dans le moule). Le modèle de simulation prend en compte l'ensemble des aspects du moule d'injection : empreinte de la pièce, canaux froids ou chauds, inserts dans la pièce ou le moule, circuits de refroidissement et, au besoin, événements. Les simulations aident à évaluer la qualité de la phase d'injection en termes de profil de remplissage, de stagnation de matière, de gélification prématurée du polymère ou encore d'emplacement des lignes de soudure et des poches d'air. Pendant le compactage et le refroidissement, l'efficacité de la compensation du retrait est déterminée afin de bien sélectionner la section d'une entrée de fluide froid. La forme de la pièce finale est également modélisée en tenant compte du gauchissement provoqué par le retrait du polymère, un refroidissement irrégulier et l'orientation du matériau.

La base de données du logiciel de simulation du moulage par injection regroupe plus de 6000 thermoplastiques prédéfinis permettant de spécifier différentes caractéristiques : diagramme PVT (pression-volume-température), viscosité en fonction de la température et du taux de cisaillement, propriétés thermomécaniques. Le logiciel gère également d'autres procédés comme l'injection assistée par gaz, l'injection/compression, la co-injection et les matériaux chargés de fibres.

Les composites thermoplastiques chargés de fibres de verre courtes sont également souvent utilisés comme isolant pour leurs excellentes propriétés thermomécaniques. Les incorporer à un produit est une tâche ardue car les fibres courtes d'une matrice polymère sont orientées dans le sens de l'écoulement de matière pendant le moulage par injection, la rendant anisotrope. Les valeurs maximales de rigidité et de résistance sont obtenues dans ce sens de l'écoulement alors que les valeurs dans le sens perpendiculaire peuvent n'atteindre que 35 % de la spécification du matériau → 2.

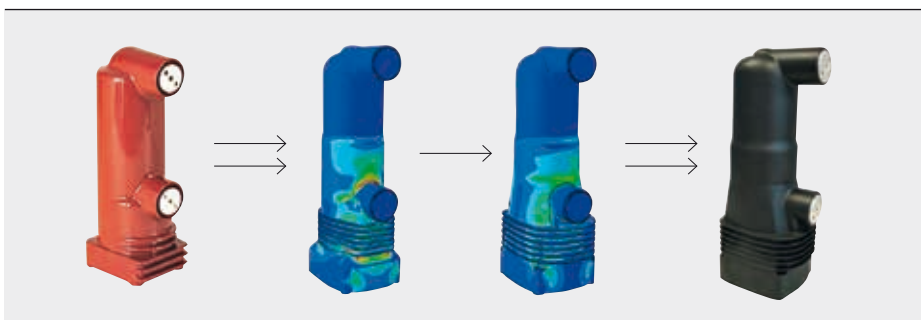
Pour exploiter tout le potentiel des composites lors du développement de ses thermoplastiques, ABB a recours à la simulation avancée → 3. Première étape : collecter des informations sur la répartition des fibres. Les propriétés physiques des matrices polymères et des fibres sont définies séparément dans le logiciel

4 Simulation du moulage par injection du pôle encastré thermoplastique



Le comportement diélectrique du produit est vérifié en simulant la distribution du champ électrique.

5 Optimisation mécanique de la structure du pôle encastré thermoplastique



de modélisation du matériau, qui calcule les propriétés mécaniques du composite. Les valeurs obtenues sont ensuite utilisées par un logiciel de simulation structurelle pour calculer la tenue du produit à la charge mécanique appliquée. Il devient alors possible de calculer la charge critique que peut supporter le composite

leues que celles des isolants époxydes et leur tenue diélectrique est également renforcée, toutes qualités permettant d'alléger significativement les produits et d'améliorer leur écobilan.

Le pôle encastré PT1 d'ABB est un exemple de produit MT dans lequel l'isolant époxyde a été remplacé par un thermoplastique. Cela a permis, d'une part, de réduire la masse d'un facteur supérieur à 3 tout en améliorant la performance mécanique et, d'autre part, de diminuer les émissions de CO₂ de plus de 50 % au cours du

concepts, la pièce de plastique est esquissée. Les outils de simulation servent ensuite à évaluer et à optimiser le concept retenu. Lors des calculs mécaniques, tous les régimes de charge que subira le produit en exploitation sont modélisés. Parallèlement, le moulage par injection de la pièce est validé par des simulations → 4. Le comportement diélectrique du produit est vérifié en simulant la distribution du champ électrique. Le produit est modifié et optimisé au fil des simulations successives. Au final, le prototype de la pièce est fabriqué et testé suivant toutes les exigences normatives.

Grâce à cette méthodologie, ABB a réduit de moitié les contraintes maximales subies par son pôle encastré à isolant thermoplastique → 5. La simulation du moulage par injection permet d'optimiser les paramètres du procédé et de limiter la pression de matière dans le moule, éléments importants dans cette application car la chambre de coupure sous vide surmoulée a été conçue pour être coulée à basse pression. Les simulations numériques ont ainsi permis d'optimiser à la fois la conception du pôle encastré en thermoplastique et son procédé de fabrication.

Les simulations numériques permettent aux ingénieurs d'observer le déroulement du moulage par injection et d'avoir une vision complète de la transformation du caoutchouc de silicone.

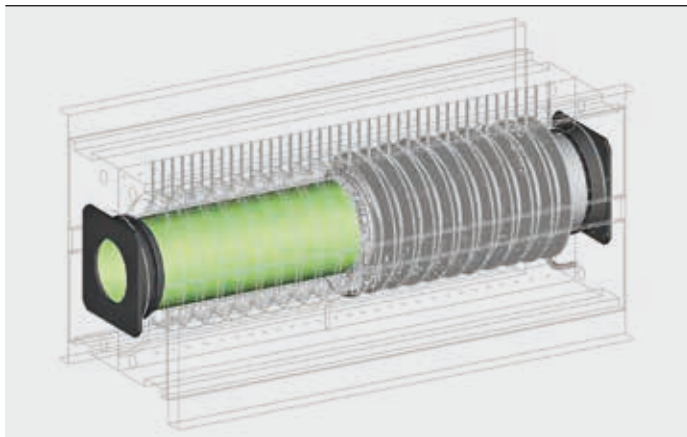
avec des indicateurs de défaillance de fatigue et de déformation [4, 5].

Des époxydes aux thermoplastiques

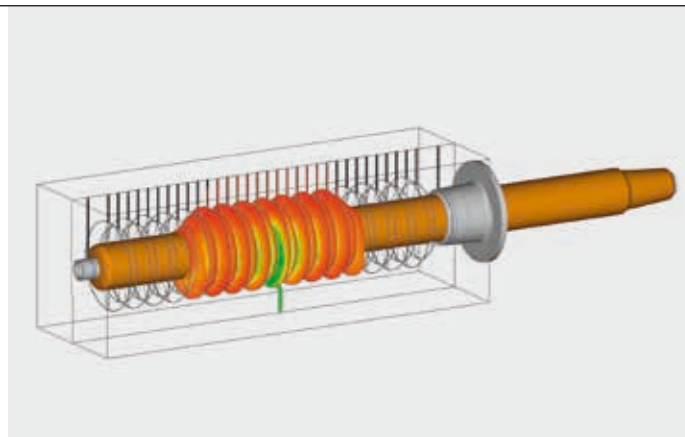
Les thermoplastiques sont largement utilisés dans les applications BT. Les nouveaux thermoplastiques techniques, plus performants, commencent à remplacer les isolants époxydes thermodurcissables dans des produits de tension plus élevée. Leurs propriétés mécaniques (rigidité et résistance) sont bien meil-

cycle de vie du produit [6]. Toutes ces améliorations sont le fruit de la simulation numérique avancée.

Le moulage par injection des thermoplastiques convient mieux aux pièces à parois minces, à la différence des résines époxydes plus adaptées aux pièces épaisses. Par conséquent, un changement d'isolant pour un appareil MT ou HT impose une remise à plat complète de sa conception. Après définition des



6a Profil d'écoulement pendant le remplissage du moule



6b Mode de durcissement du silicone

Caoutchouc de silicone liquide

Le moulage de silicone est une autre technologie très répandue de fabrication de l'isolant électrique de différents appareils MT et HT, comme les parafoudres, les traversées, les isolateurs et les extrémités de câbles. Les excellentes propriétés des caoutchoucs de silicone, notamment leur stabilité chimique et thermique élevée, expliquent leur qualité hydrophobe, leur tenue aux UV ainsi que leur bonne résistance au contournement et à l'érosion [7, 8].

Les propriétés des isolants siliconés peuvent toutefois être dégradées par le procédé de moulage lui-même, notamment des températures trop élevées. La thermorégulation est encore plus importante si l'on tient compte de la production de chaleur (exothermie) pendant le durcissement du silicone susceptible de donner lieu à des points chauds locaux. Qui plus est, des températures excessives peuvent provoquer une gélification prématurée du caoutchouc de silicone et, par là-même, un remplissage incomplet du moule. Enfin, des systèmes d'injection et de ventilation mal conçus peuvent créer des vides pendant le remplissage, à l'origine de décharges partielles lors de l'exploitation du produit.

Les simulations numériques permettent aux ingénieurs d'observer le déroulement du moulage et d'avoir une vision complète de la transformation du caoutchouc [9, 10]. Ainsi, le profil d'écoulement du silicone, l'augmentation de la pression, le champ thermique et le degré de durcissement peuvent être suivis dans le temps → 6. Ces éléments aident à anticiper les problèmes de conception ou de

fabrication. Enfin, la recherche d'optimisation des performances des produits et de leurs procédés de fabrication est plus rapide et moins coûteuse.

Dariusz Bednarowski

Krzysztof Kasza

Lukasz Malinowski

Lukasz Matysiak

Michał Mlot

Robert Sekula

ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

dariusz.bednarowski@pl.abb.com

krzysztof.kasza@pl.abb.com

lukasz.malinowski@pl.abb.com

lukasz.matysiak@pl.abb.com

michal.mlot@pl.abb.com

robert.sekula@pl.abb.com

Gerhard Salge

ABB Medium Voltage Products

Ratingen (Allemagne)

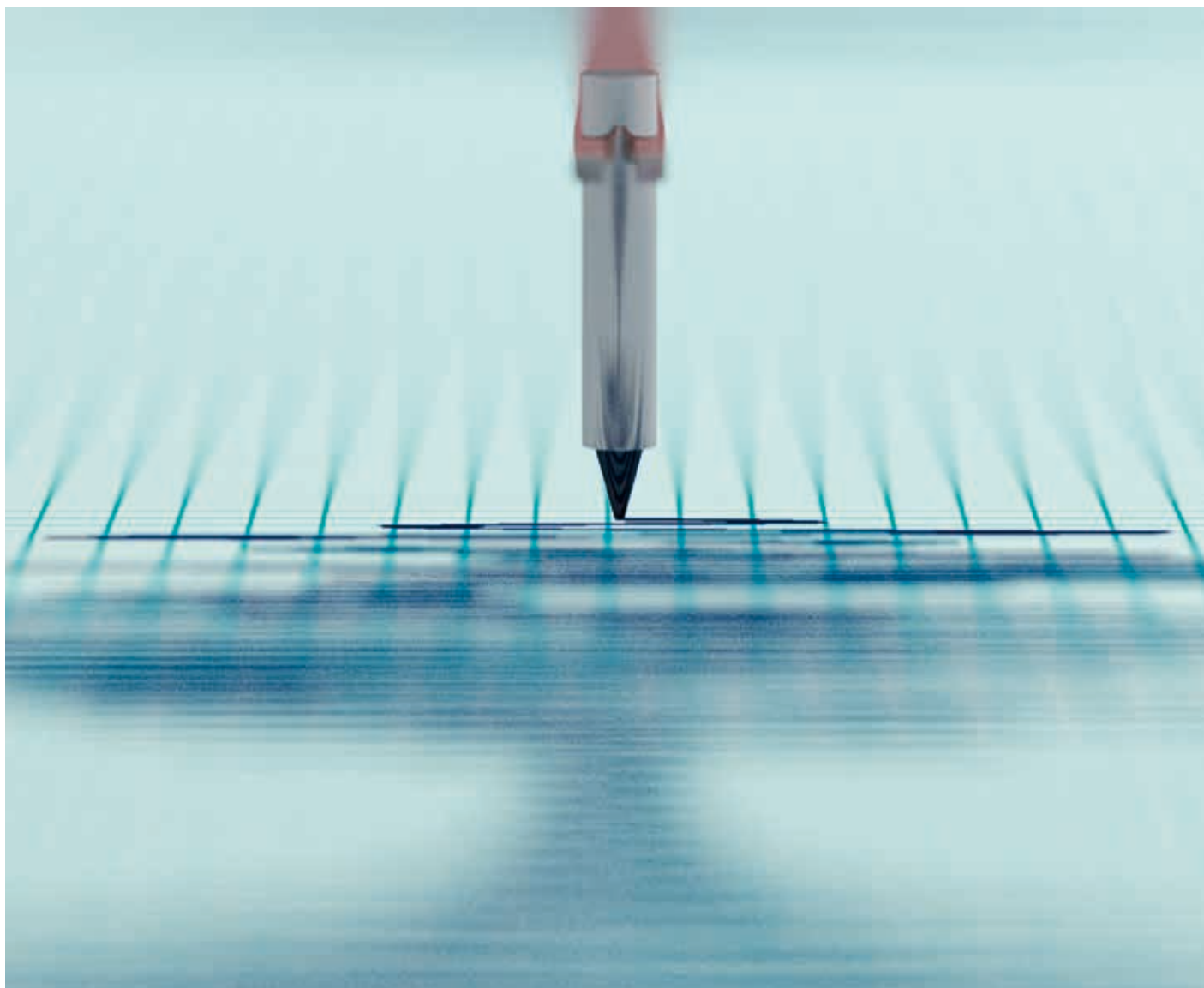
gerhard.salge@de.abb.com

Bibliographie

- [1] Sekula, R., Saj, P., Nowak, T., Kaczmarek, K., « 3-D Modeling of Reactive Moulding Processes: From Tool Development to Industrial Application », *Advances in Polymer Technology*, vol. 22, n° 1, p. 42–55, 2003.
- [2] Sekula, R., Nowak, T., Claus, O., « Sequential fluid dynamics and structural mechanics simulations of a reactive molding process », *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 40, n° 3/4, p. 250–263, 2011.
- [3] Matysiak, L., Platek, R., Banas, M., Sekula, R., « eRAMZES – Novel Approach for Simulation of Reactive Molding Process », *26th European Conference on Modelling and Simulation*, p. 128–135, Coblenz (Allemagne), 2012.
- [4] Bednarowski, D., Malinowski, L., Laskos, P., Kmita G., « Modeling of short fiber composites strength with use of failure indicators », *10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 2010.
- [5] Bednarowski, D., Malinowski, L., Laskos, P., « Modeling of Reinforced Thermoplastics' Mechanical Performance with Use of Failure Indicators », *DIGIMAT Users' Meeting*, 2010.
- [6] Fugel, T., Gentsch, D., Klaska, A., Meyer, C., « Pôle position », *Revue ABB*, 1/2010, p. 57–62.
- [7] Stenstrom, L., Gustavsson, D., Windmar, D., Gutman, I., Vosloo, W. L., *Optimized use of HV composite apparatus insulators : field experience from coastal and inland test stations*, 40^e session du CIGRÉ, 2004.
- [8] « Remote Plant Plays Key Role in ABB Insulator Business », *Insulator News & Market Report Quarterly Review*, vol. 13, p. 54–61, 2005.
- [9] Matysiak, L., Saj, P., Sekula, R., « First Industrial Application of the 3D silicone Molding Simulation Tool », *5th European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010*, Lisbonne (Portugal), juin 2010.
- [10] Matysiak, L., Kornmann, X., Saj, P., Sekula, R., « Analysis and Optimization of the Silicone Molding Process Based on Numerical Simulations and Experiments, *Advances in Polymer Technology* », vol. 32, n° S1, p. E258–E273, 2013.

Lecture complémentaire

Matysiak, L., Platek, R., Banas, M., Sekula, R., LE, H. D., Pernica, R., Michlicek, P., « Simulation avancée du moulage réactif », *Revue ABB*, 1/2013, p. 45–51.



Performances de pointe

La simulation numérique améliore les performances sismiques et vibroacoustiques des équipements électriques

ROBERT PŁATEK, GRZEGORZ JUSZKIEWICZ, MICHAŁ KOZUPA, GRZEGORZ KMITA, PER LINDHOLM, ROMAIN HAETTEL, MUSTAFA KAVASOGLU, ANDERS DANERYD, JOHAN EKH – Évaluer intégralement des matériels électriques complexes oblige aujourd'hui à mener une batterie de tests pour en optimiser la conception et les performances. Avant livraison, il faut examiner et contrôler ces équipements et systèmes sous tous les angles, dans une multitude de conditions d'exploitation et d'environ-

nement pour déterminer leurs limites. Deux facteurs sont déterminants dans leur conception : le bruit et les vibrations. Les produits ABB devant afficher de faibles niveaux sonores et une haute résilience au risque sismique, il est primordial de prouver la fiabilité et l'efficacité de leur exécution pour satisfaire aux exigences des clients et de la réglementation sur l'environnement.

La fiabilité et la sécurité des systèmes électriques, surtout dans les zones de forte sismicité, dépendent de la robustesse sismique de leurs composants.

On appelle « sollicitations sismiques » les forces dynamiques qui peuvent ébranler les édifices mais aussi les matériels électriques. L'échelle de Richter, qui mesure l'énergie libérée lors d'un tremblement de terre, ne renseigne guère sur le mouvement du sol, lequel dépend des fréquences de propagation des ondes de surface et de la nature du sous-sol, entre autres. Or la fiabilité et la sécurité des installations électriques, surtout dans les zones particulièrement exposées, sont fonction de la robustesse

pour en garantir la tenue sismique.

Mais réaliser des produits antisismiques n'est pas une tâche simple. Les nombreuses années d'expérience que compte ABB en génie parasismique sont de précieux atouts pour comprendre la nature des séismes.

Des analyses poussées des sollicitations sismiques, s'appuyant sur les normes industrielles, contribuent beaucoup au développement d'approches innovantes pour ces types de problèmes.

Normalisation et essai

Les deux grands référentiels internationaux dans ce domaine sont le standard IEEE 693-2005 [1] et la norme CEI 61463 [2]. Le premier porte sur les procédures de qualification des équipements de postes électriques pour différents niveaux de tenue sismique. Il recommande vivement de qualifier ces équipements sur le type de structure porteuse du poste à demeure. Les essais de traversées sur table vibrante ont prouvé la bonne performance de ces constituants (réponse globale conforme à l'IEEE 693 → 1). Même si ces tests sont fortement conseillés pour la qualification des composants critiques, l'analyse numérique s'avère très utile pour caractériser leur tenue sismique. A fortiori, quand les essais sont impossibles en raison de la masse importante de l'appareil (cas des transformateurs de puissance, par exemple), c'est le seul moyen de déterminer les propriétés dynamiques du système.

Quand les essais sont empêchés par la masse importante de l'appareil, l'analyse numérique est le seul moyen de déterminer les propriétés dynamiques du système.

Méthodes de modélisation

La vérification sismique d'un équipement électrique a recours à diverses méthodes d'analyse qui s'appuient habituellement sur des calculs statistiques pour estimer les forces engen-

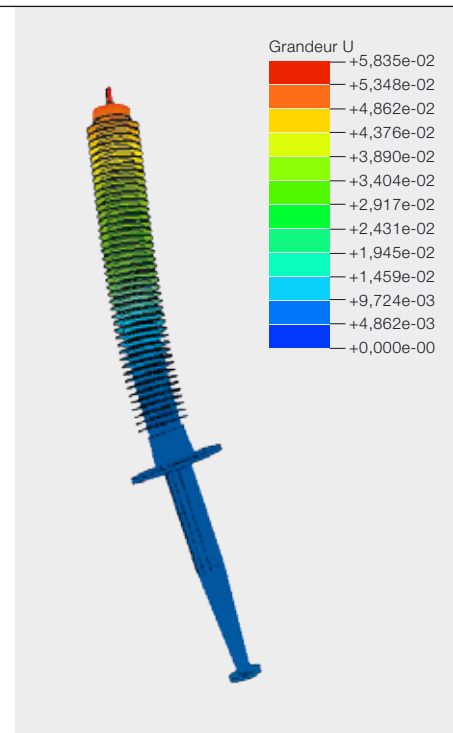
dées lors d'un événement sismique, à une accélération du sol donnée, et les comparer aux capacités parasismiques de l'équipement. Pour les structures rigides, dont les plus basses fréquences propres dépassent 30 Hz, il n'y a pas de coefficient d'amplification du mouve-

Photo p. 77

L'analyse numérique permet de réduire les niveaux sonores et d'améliorer la tenue sismique des équipements électriques.



1a Traversée soumise à un essai de tenue sismique

1b Calcul du 1^{er} mode de fréquence propre

ment sismique et la plus forte sollicitation est égale à l'accélération du sol ; on peut alors utiliser une évaluation statique. Toutefois, des structures plus massives ont couramment des fréquences propres inférieures à 30 Hz. La méthode de calcul de la charge sismique la plus répandue est l'analyse spectrale qui établit le spectre de réponse sismique de la structure, en partant d'une analyse modale de chacun de ses modes propres de vibrations et leurs périodes. Autre méthode très utilisée : la simulation par « sinusoïdes amorties » dans laquelle la structure est soumise à des ondes sinusoïdales de fréquence égale aux premières fréquences propres inférieures à 33 Hz. L'étape suivante de cette méthode temporelle est la simulation par accélérogramme dans laquelle la structure subit des accélérations aléatoires d'au moins 20 secondes, ce qui correspond à la définition du spectre. On en déduit les efforts, contraintes et déformations, ainsi que la tenue sismique. Cette méthode appliquée aux traversées parasismiques RIP (*Resin Impregnated Paper*) montre le potentiel de prédiction de l'accélération et du déplacement relatifs avec la précision satisfaisante des qualifications sismiques [3]. Mais pour aller plus loin, il est primordial de comprendre les interactions sismiques des équipements et des fluides dans le poste électrique.

Les défis de la modélisation

Si l'on en croit de nombreux spécialistes, la réponse sismique de traversées de transformateur est compliquée par les composants d'interconnexion [4, 5]. Qui plus est, l'installation peut aussi provoquer des dommages du fait de ses liai-

Dans le monde entier, la lutte contre la pollution sonore est un enjeu croissant.

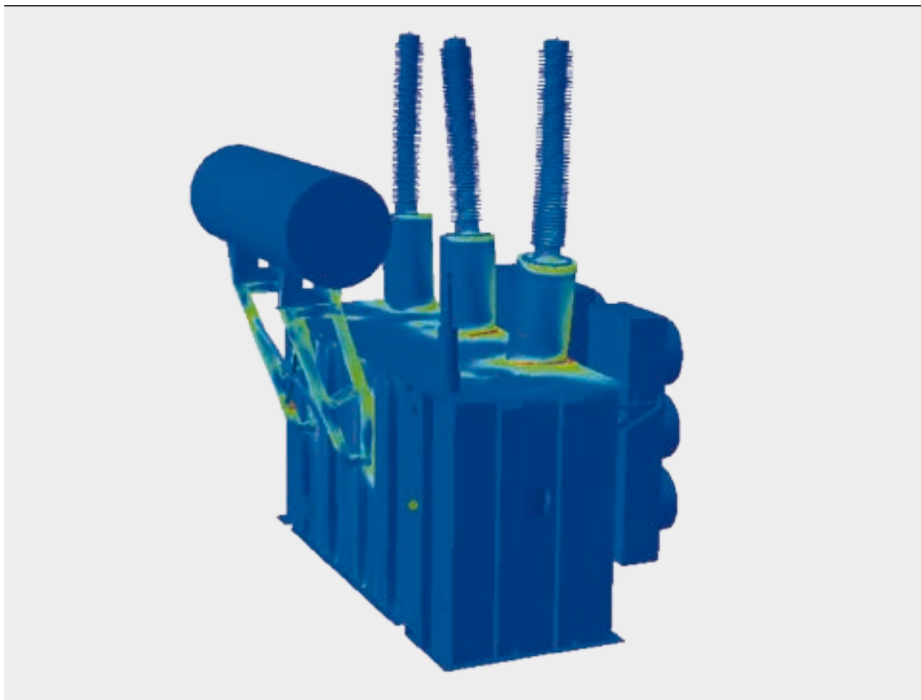
sons (boulonnages, rivetages, soudures). Si bien que les essais sismiques sur traversées à châssis rigide ne couvrent pas toutes les situations critiques et nécessitent des recherches complémentaires. Les simulations menées sur une cuve de transformateur et ses constituants démontrent qu'il n'y a pas d'analyse sismique exhaustive sans prise en compte de la totalité du système de traversées de l'appareil → 2. En outre, pour les matériels électriques immergés dans l'huile, il convient de vérifier l'influence du liquide sur les sollicitations sismiques. Avec l'amélioration de la puissance de calcul, les modèles de structures peuvent

comporter des géométries plus fines, plus complexes, ou multiplier les phénomènes physiques. Pour étudier l'influence du fluide sur les caractéristiques dynamiques, on utilise l'interaction fluide-structure (IFS) qui repose sur l'échange de données entre outils de simulation modélisant l'écoulement fluide et le comportement mécanique. En calcul numérique des écoulements CFD, c'est la cuve remplie qui est modélisée alors qu'en calcul de structure, seule cette dernière est considérée. Le code CFD calcule l'écoulement fluide et les forces agissant sur les parois de la structure sont transmises au code structural pour servir de charges et de conditions aux limites. La nouvelle forme de la structure est ensuite renvoyée au CFD, qui prépare la mise à jour du maillage pour le pas de temps suivant. Résultat : il est possible de visualiser les efforts, contraintes et déformations de la structure, en tenant compte de la dynamique des fluides.

Vibroacoustique

Dans le monde entier, la lutte contre la pollution sonore est un enjeu croissant. On comprend dès lors qu'il soit obligatoire de concevoir des matériels électriques à faibles niveaux de bruit et de vibration pour satisfaire aux exigences des donneurs d'ordre et de la réglemen-

Il faut prédire les niveaux de bruit du produit avec suffisamment de précision, en amont de sa conception, pour sélectionner la meilleure stratégie de réduction de la pollution sonore.



tation. Il est donc essentiel de prédire les performances acoustiques du produit avec suffisamment de précision, en amont de la conception, pour sélectionner la meilleure stratégie de réduction du bruit.

Genèse du bruit

Le mécanisme d'émission de sons et de vibrations dans de nombreux produits ABB trouve son origine dans la chaîne de conversion de l'énergie → 3, exemple type de phénomène multiphysique couplant électromagnétisme, mécanique et acoustique. En effet, l'interaction du

transformateurs ou les condensateurs. Leur relative complexité requiert le plus souvent des outils de prédiction avancés pour décrire exactement les interactions des différents paramètres de conception et le couplage de plusieurs physiques. L'analyse numérique s'avère indispensable pour aider à comprendre les problématiques du bruit et développer des parades efficaces.

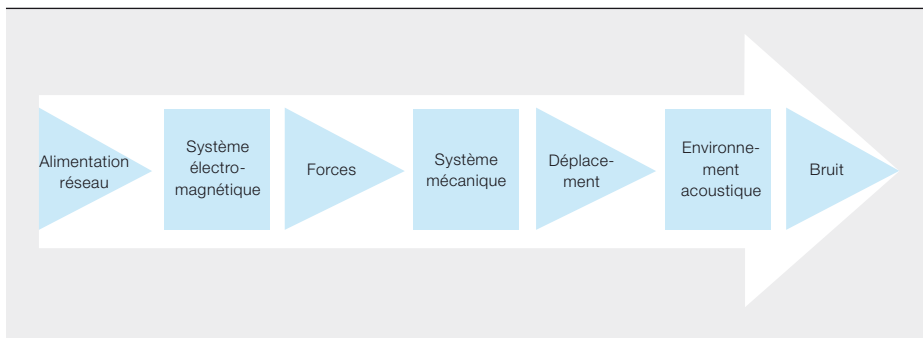
Exemples de simulation vibroacoustique

Les chercheurs ABB ont recours à la méthode des éléments finis et des éléments de frontière pour simuler les performances vibroacoustiques de différents produits ABB. Exemple-type de simulations multiphysiques et multi-échelles : les deux sources de bruit propres aux transformateurs de puissance immergés, à savoir le « bruit à vide » généré par le circuit magnétique et le « bruit en charge » émis par les enroulements.

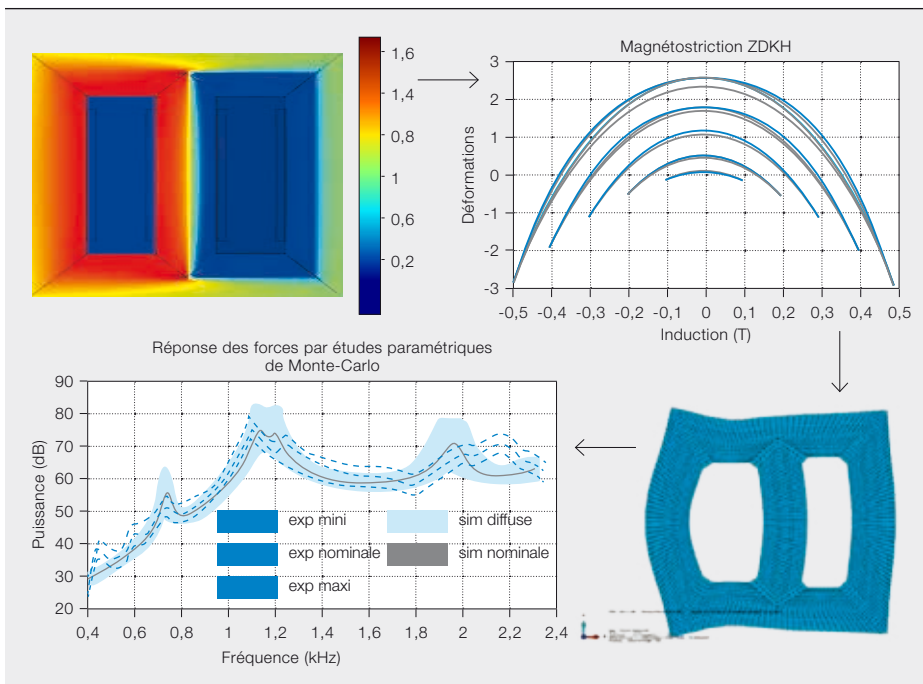
L'analyse numérique est indispensable pour comprendre les problématiques du bruit et développer des parades efficaces.

courant alternatif et des champs magnétiques associés engendre des forces fluctuantes qui font vibrer la structure et finissent en bruit rayonné. Ce phénomène multiphysique peut s'observer dans bien des matériels ABB, comme les

Dans le premier cas, la circulation du courant dans les enroulements crée un flux magnétique dans le circuit, dont le principal matériau (tôle électrique à grains orientés) présente des propriétés caractéristiques anisotropiques non linéaires, appelées « magnétostriction », qui modifient les dimensions des tôles pendant leur cycle de magnétisation et de démagnétisation [6]. Cette magnétostriction dépendante de la fréquence est à l'ori-



4 Prédiction du bruit dans le circuit magnétique et validation en laboratoire



gine des vibrations engendrant le bruit à vide. Les différents niveaux de densité de flux dans le circuit magnétique, la magnétostriction qui en découle, la déformation caractéristique de la structure du

des forces de Lorentz induisant des vibrations [7, 8].

Ces vibrations dans le circuit magnétique et les enroulements passent dans l'huile,

les structures mécaniques, supports et bridages pour atteindre les parois de la cuve où elles finissent en rayonnements acoustiques dans l'air environnant. La vibration de la cuve

peut être corrélée à la puissance acoustique émise en calculant l'intensité acoustique de la surface.

La figure → 4 présente les étapes classiques de la simulation d'un produit de type transformateur. La procédure commence par des calculs électromagné-

Un modèle simple prédit le bruit produit par les condensateurs sur site avec une exactitude de $\pm 1,5$ dB, bien avant la réalisation de tout composant.

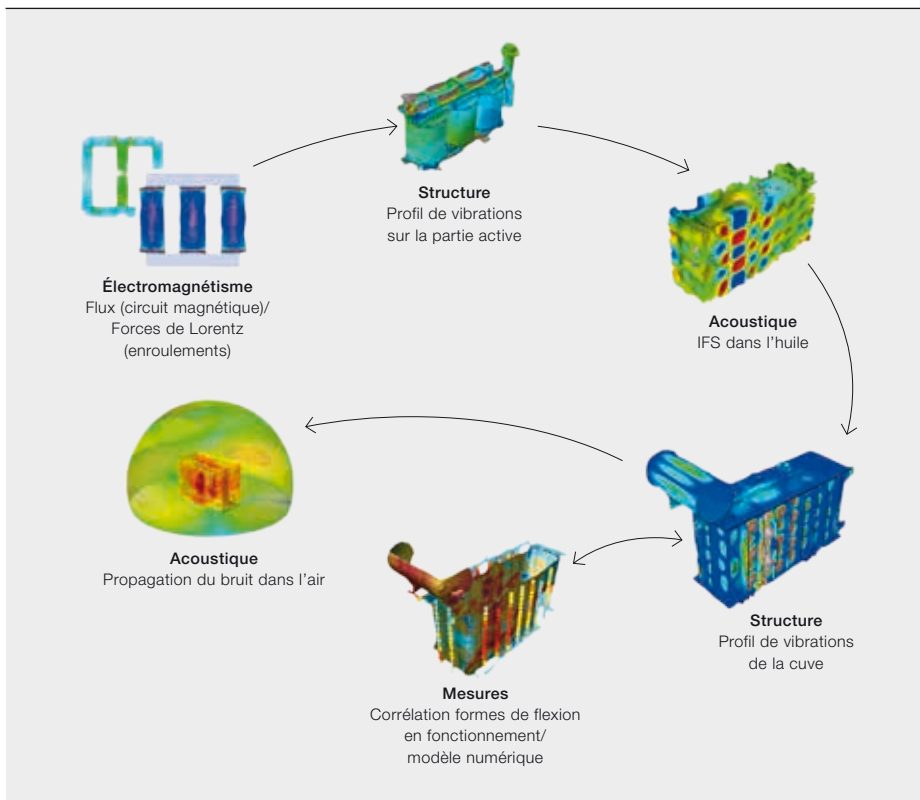
tiques qui donnent les forces mécaniques exercées sur la structure. Un point essentiel d'une bonne image des vibrations sur la cuve est le trajet structure-fluide-structure, avec le couplage et les phénomènes se produisant dans l'huile elle-même. Un modèle de vibration bien défini des surfaces les plus périphériques ne fournit pas seulement un bon profil du bruit rayonné mais aussi des informations sur les zones de forte amplitude offrant un potentiel d'amortissement.

Les condensateurs haute tension utilisés dans les installations de compensation statique de puissance réactive et de courant continu à haute tension (CCHT) sont également une importante source de bruit, qui a nécessité le développement d'un outil de prédiction acoustique *ad hoc*. La fonction de transfert entre la tension d'entrée et la puissance acoustique peut être calculée de manière analytique en décrivant le condensateur comme une poutre oscillant dans le sens longitudinal et soumise à des forces de Coulomb alternées. Ce modèle simple, associé aux spectres de courant de service estimés pour l'installation en projet, prédira le bruit produit par les condensateurs sur le site avec une exactitude de $\pm 1,5$ dB, bien avant la réalisation de tout composant.

Un modèle de vibration bien défini renseigne sur les zones de forte amplitude offrant un potentiel d'amortissement.

circuit et, au final, les niveaux de puissance sonore (dB), en concordance avec les niveaux mesurés, sont illustrés en → 4.

Le bruit en charge est dû à l'interaction du flux de fuite et du courant circulant dans l'enroulement, laquelle engendre



Validation expérimentale

Toute analyse complète de structure, dont la réponse acoustique est le résultat, doit commencer par une analyse modale en fonctionnement précise et une bonne corrélation avec les valeurs propres du système dérivées des données d'essais réelles. Des mesures effectuées dans un environnement contrôlé, sur des modèles d'échelle bien conçus et soumis à une excitation réaliste, sont nécessaires à une première validation détaillée. Une fois les essais en laboratoire terminés et assimilés, il convient de planifier et de réaliser avec soin des mesures complémentaires sur des produits en vraie grandeur pour parachever la validation. Des techniques de mesure avancées, comme la vibrométrie laser à effet Doppler, ont leur utilité. Le vibromètre laser est en effet capable de fournir des profils vibratoires 3D du transformateur en charge ou à vide, créant des formes de flexion en fonctionnement ou *ODS (Operational Deflection Shapes)* → 5 [9], qui sont directement comparables à l'analyse numérique ; au besoin, le modèle est perfectible.

Un horizon serein

Les outils de prédiction modernes, tels les logiciels d'études multiphysiques bien pourvus en puissance de calcul et en finesse de détail, montrent les inte-

ractions complexes des paramètres de conception et l'impact des propriétés des matériaux sur les niveaux de puissance acoustique. Une bonne corrélation des modèles numériques constitue la base du « prototypage virtuel » qui permet de tester et d'améliorer les produits et systèmes en s'affranchissant des prototypes en dur. Ces simulations numériques sont souvent la partie invisible mais essentielle de la chasse au bruit et de la garantie de continuité du service électrique, même si la Terre tremble. Travaillez et dormez en paix, braves gens...

Robert Platek

Grzegorz Juszkiewicz

Michał Kozupa

Grzegorz Kmita

ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

robert.platek@pl.abb.com

grzegorz.juszkiewicz@pl.abb.com

michal.kozupa@pl.abb.com

grzegorz.kmita@pl.abb.com

Per Lindholm

Romain Haettel

Mustafa Kavasoglu

Anders Daneryd

Johan Ekh

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

per.o.lindholm@se.abb.com

romain.haettel@se.abb.com

mustafa.kavasoglu@se.abb.com

anders.daneryd@se.abb.com

johan.ekh@se.abb.com

Frank Cornelius

ABB Dry Transformer Development Center

Brilon (Allemagne)

frank.cornelius@de.abb.com

Bibliographie

- [1] Standard IEEE 693-2005, *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, 2005.
- [2] Spécification technique CEI TS 61463, *Traversées – Qualifications sismiques*, 1996.
- [3] Rocks, J., et al., « Seismic Response of RIP-Transformer Bushing », *Insulator News & Market Report (INMR) World Congress on Insulators, Arresters and Bushings*, Brésil, 2007.
- [4] Filiatrault, A., et al., « Experimental Seismic Response of High-voltage Transformer-Bushing Systems », *Earthquake Spectra*, vol. 21, p. 1009–1025, novembre 2005.
- [5] Ersoy, S., Saadeghvaziri, M. A., « Seismic Response of Transformer-Bushing Systems », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, p. 131–137, 2004.
- [6] Timár, P. L., *Noise and Vibration of Electrical Machines*, Elsevier, 1989.
- [7] Kavasoglu, M., et al., « Prediction of Transformer Load Noise », *COMSOL Conference*, Paris, 2010.
- [8] Girgis, R. S., et al., « Comprehensive analysis of load noise of power transformers », *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, p. 1–7, 2009.
- [9] Hrkac, M., et al., « Vibroacoustic behavior of SPT transformer », *International Colloquium Transformer Research and Asset Management*, CIGRÉ, 2012.

Rédaction

Claes Ryttoft

Chief Technology Officer and
Group Senior Vice President

Clarissa Haller

Head of Corporate Communications

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Eero Jaaskela

Head of Group Account Management

Andreas Moglestue

Chief Editor
andreas.moglestue@ch.abb.com

Édition

ABB Review est publiée par la direction R&D and
Technology du Groupe ABB.

ABB Technology Ltd.

ABB Review/REV

Affolternstrasse 44

CH-8050 Zurich (Suisse)

ABB Review paraît quatre fois par an en anglais,
français, allemand, espagnol et chinois.

La revue est diffusée gratuitement à tous ceux et
celles qui s'intéressent à la technologie et à la
stratégie d'ABB. Pour vous abonner, contactez
votre correspondant ABB ou directement la
Rédaction.

La reproduction partielle d'articles est autorisée
sous réserve d'en indiquer l'origine.

La reproduction d'articles complets requiert
l'autorisation écrite de l'éditeur.

Édition et droits d'auteur ©2013

ABB Technology Ltd.

CH- Zurich (Suisse)

Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

Maquette

DAVILLA AG
Zurich (Suisse)

Traduction française

Dominique Helies
dhelies@wanadoo.fr

Avertissement

Les avis exprimés dans la présente publication
n'engagent que leurs auteurs et sont donnés
uniquement pour information. Le lecteur ne devra
en aucun cas agir sur la base de ces écrits sans
consulter un professionnel. Il est entendu que les
auteurs ne fournissent aucun conseil ou point de
vue technique ou professionnel sur aucun fait ni
sujet spécifique, et déclinent toute responsabilité
sur leur utilisation. Les entreprises du Groupe ABB
n'apportent aucune caution ou garantie, ni ne
prennent aucun engagement, formel ou implicite,
concernant le contenu ou l'exactitude des opinions
exprimées dans la présente publication.

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview



Dans le numéro 4|13

En Toile de fond

L'informatique et l'Internet poursuivent leur croissance fulgurante, bousculant les modes de travail, mondialisant les échanges et explorant de nouvelles applications qui révolutionnent l'existant. Si les progrès des ordinateurs se mesuraient hier à l'aune de statistiques, comme celles de la loi de Moore, ils prennent aujourd'hui un tour plus tangible avec l'exploitation des services temps réel comme les réseaux sociaux, la banque et le commerce en ligne. Pour le consommateur, ces usages se résument surtout à des interfaces jugées pour leur confort d'utilisation et leur efficacité. Mais ce n'est là que la partie visible de l'édifice! Les centres de calcul ou *datacenters* qui brassent en continu des milliards de données, en sont l'infrastructure vitale.

Notre édition 4/2013 leur sera consacrée et montrera comment ABB participe à ces fabuleux développements.

À vos tablettes!

ABB Review a désormais sa version nomade et tactile, accessible sur <http://www.abb.com/abbreview>.

Une de perdue...

Il vous manque un numéro de la revue?
Pour être informé de chaque parution (ou dossier
spécial), abonnez-vous à la liste de diffusion sur
<http://www.abb.com/abbreview>.





Accroître l'efficacité énergétique de 25 % ?

Une solution complète d'ABB en matière d'énergie et d'automatisation a permis à la plus importante raffinerie d'Europe d'accroître son efficacité énergétique de 25 %, rehaussant du même coup sa productivité. Grâce à ses activités de recherche et développement axées sur l'amélioration de la performance et la préservation des ressources, ABB travaille sans relâche en vue d'économiser énergie et argent, et de protéger l'environnement.

www.abb.com/energyefficiency

Absolument.