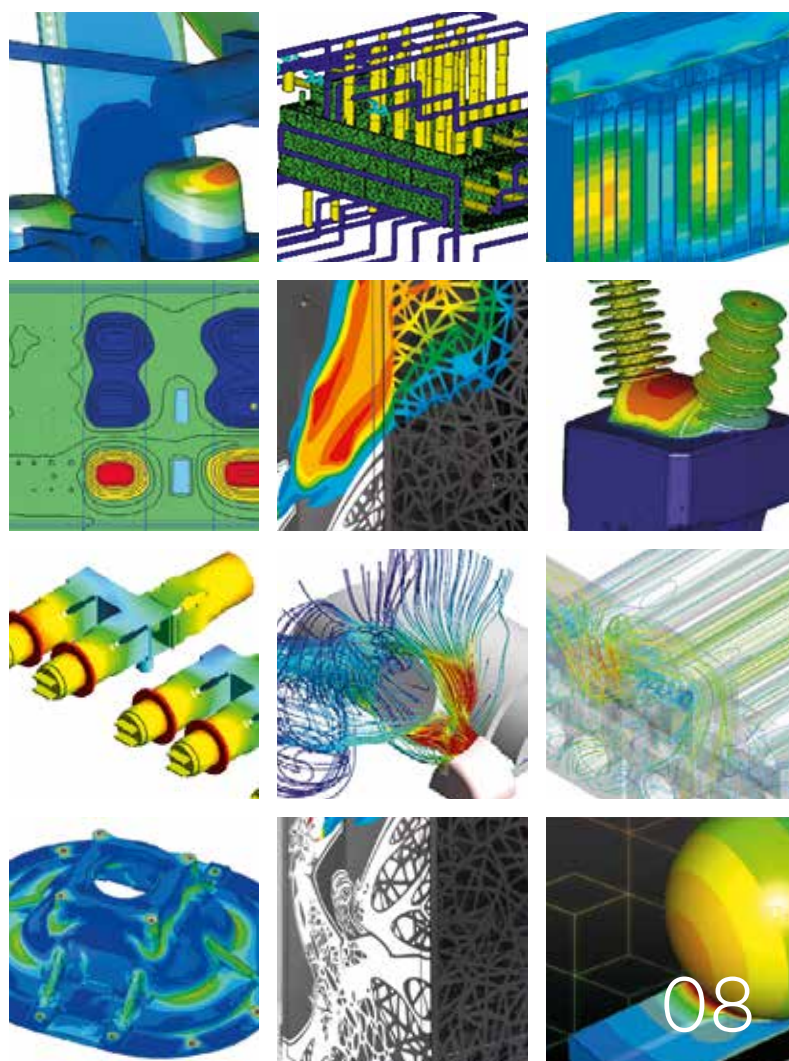


review

02|2019 fr

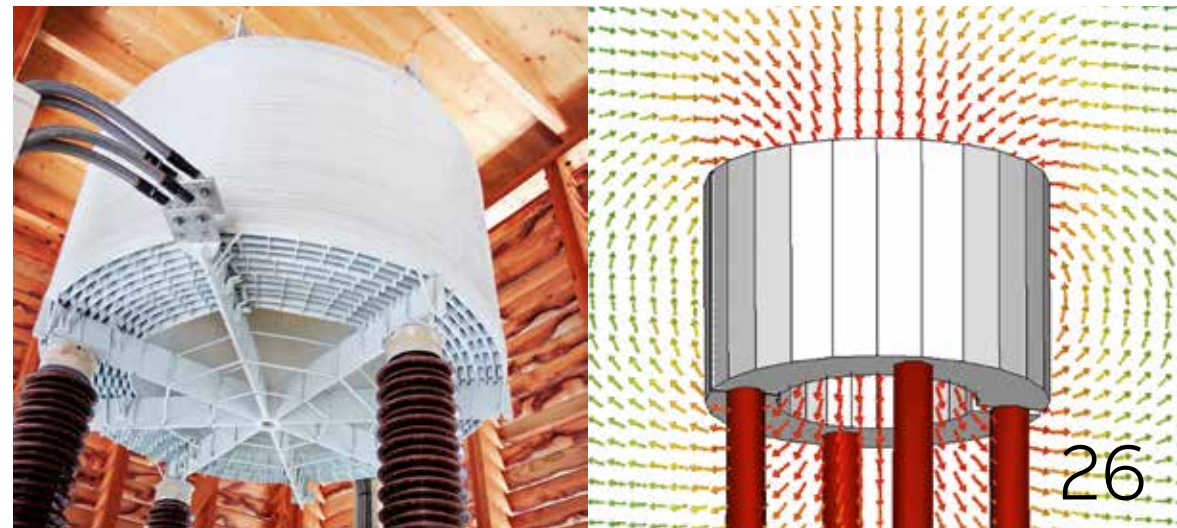
Jumeaux numériques et simulations



42

06 – 69 Jumeaux numériques et simulations
70 – 77 Productivité

08



Jumeaux numériques HVDC Light®



Automatisation modulaire

Analytique connectée



Atténuer l'impact d'un arc interne

05 Éditorial

Jumeaux numériques et simulations

- 08 Un nouvel univers des possibles
- 14 Synergie entre périphérie et cloud
- 20 Simulation électrothermique
- 26 Jumeaux numériques HVDC Light®
- 34 Analytique connectée
- 42 Simulation simplifiée
- 47 Conception optimisée
- 52 Entraînements de puissance numériques
- 58 Suivi d'état des machines tournantes
- 64 Atténuer l'impact d'un arc interne

Productivité

- 72 Automatisation modulaire

Le mot du moment

- 78 *Cloud, edge et fog*

- 79 Publication ABB

—

Et si vous disposiez d'un double virtuel vous permettant de tester chaque décision, d'anticiper tous les aléas et ainsi de vous créer une existence des plus épanouies ? Telle est la promesse du jumeau numérique, auquel s'intéresse le présent numéro. Découvrez comment ABB met à profit la modélisation pour concevoir, bâtir, exploiter et entretenir des équipements critiques et des fonctions support au plus près de la réalité industrielle.

ÉDITORIAL

Simulations et jumeaux numériques



Chers lecteurs,

Quand on évoque les atouts du numérique dans l'industrie, on songe d'abord à l'exploitation des actifs, mais c'est ignorer que la numérisation et l'intelligence artificielle entrent en jeu dès les phases de spécification, de conception, de fabrication et de configuration d'un produit.

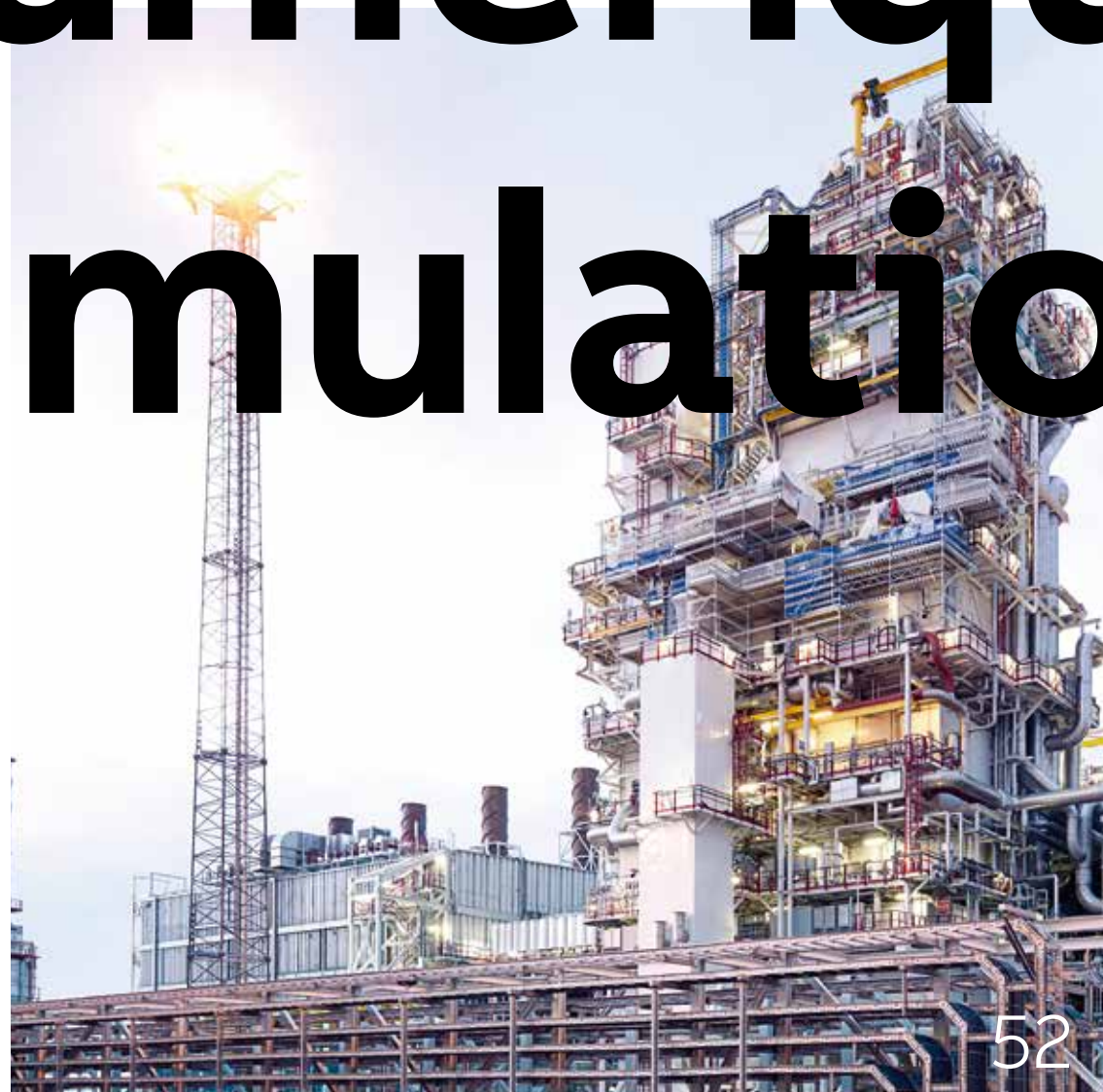
La simulation, en accélérant l'analyse et la conception, démultiplie le nombre de variantes à l'étude et rapproche le résultat final de l'optimum visé. L'intelligence artificielle est un outil précieux pour créer des modèles et identifier les tendances. Les résultats de simulation ne sont plus confinés dans des silos mais se partagent facilement d'une application à l'autre, tout au long du cycle de vie de l'appareil. Le jumeau numérique, réplique virtuelle des données et du comportement d'un système réel, apporte une aide précieuse dans de nombreux domaines, de la configuration à la prédiction en passant par le suivi d'état. Il est même possible d'accéder dans l'atelier aux informations de ce double virtuel depuis son smartphone ou sa tablette, et de les enrichir de réalité augmentée pour éclairer la décision.

Découvrez dans ce numéro d'*ABB Review* les dernières avancées de ce domaine en perpétuelle évolution.

Bonne lecture,

Bazmi Husain
Directeur des technologies

Jumeaux numériques et simulations



Que peut-on accomplir dans un environnement variable à l'infini ? Concevoir un produit jusque dans ses moindres détails, le perfectionner par itérations successives s'appuyant sur des cas d'usage, simuler ses comportements les plus insensés... Les exemples de tâches se conjuguent au pluriel. L'intelligence artificielle (IA) s'invite dans ce monde d'algorithmes pour capter en temps réel toute la puissance du « jumeau numérique », notamment en périphérie de réseau, et permettre ainsi d'apprendre mieux et plus vite, de repousser les frontières du réel et de trouver de meilleures solutions.

- 08 Un nouvel univers des possibles
- 14 Des jumeaux numériques en périphérie de réseau pour une IA temps réel
- 20 La simulation améliore la conception thermique de l'appareillage électrique
- 26 Jumeaux numériques HVDC Light® et compatibilité électromagnétique
- 34 Gérer la performance des actifs solaires avec l'analytique connectée
- 42 La simulation numérique à portée de main
- 47 L'impression 3D s'invite en production
- 52 Entraînements de puissance numériques : du jumeau à l'avatar
- 58 L'apprentissage automatique bouleverse le suivi d'état
- 64 Atténuer l'impact d'un arc interne

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

Un nouvel univers des possibles

Simulations et jumeaux numériques révolutionnent la conception et le déploiement des produits.

— **Marek Florkowski**
Daniel Szary
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

marek.florkowski@
pl.abb.com
daniel.szary@pl.abb.com

Andreas Moglestue
ABB Review
Baden-Dättwil
(Suisse)

andreas.moglestue@
ch.abb.com

« *Tout est nombre* » : l'approche pythagoricienne du monde est plus que jamais d'actualité. Les nombres nous permettent en effet d'appréhender et de traiter toutes sortes de grandeurs physiques (position, température, débit, force, etc.). C'est pourquoi il existe une multitude de méthodes de mesure, qui sont autant de façons de caractériser le monde physique à l'aide de nombres. L'informatique apporte une nouvelle pierre à l'édifice : la simulation.

Cette nouvelle technique, très polyvalente, donne accès à des données qui ne sont pas directement mesurables. Ainsi peut-on calculer la température « à cœur » d'un objet en combinant les mesures relevées en surface et les phénomènes physiques internes, bien connus des ingénieurs. Cette approche ne contourne pas seulement les obstacles purement spatiaux à l'obtention d'un point de mesure ; elle permet de prendre en compte des données d'intérêt appartenant au futur, voire à un système qui n'a pas encore de réalité physique.

La simulation ouvre le champ des possibles pour innover, étudier et tester de nombreuses variantes, les combiner et explorer des méthodes de développement produit originales.

Énormes économies de temps, d'argent et de matières premières, suppression des situations potentiellement dangereuses... autant d'avantages de la simulation sur les essais physiques en laboratoire, qui allongent les délais (temps de préparation et de réalisation des échantillons) et ajoutent leur lot de contraintes de capacité et de

domaines de compétence, en plus de faire preuve de rigidité face aux développements de dernière minute. Dans un processus très itératif, qui oblige à attendre les résultats d'un essai pour passer à l'étape suivante, ces délais peuvent s'étirer à l'infini.

Au-delà des gains de temps et d'argent, les simulations étendent le champ des possibles et offrent une grande liberté pour innover, étudier et tester de nombreuses variantes, les combiner et explorer des méthodes de développement produit originales. Résultat : une solution parfaitement optimisée.

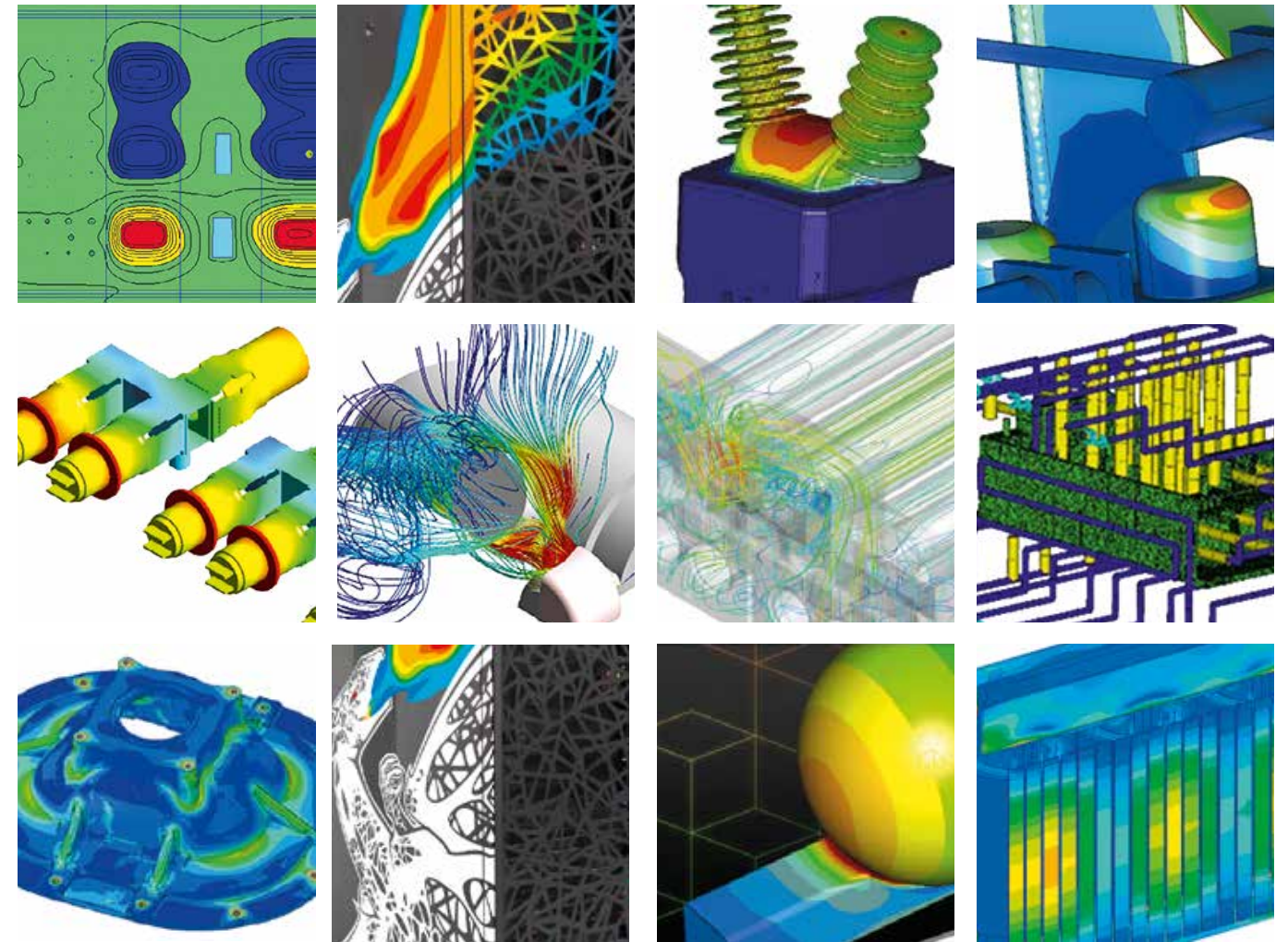
Elles sont aussi indispensables pour remplacer certains essais physiques irréalisables, comme les tests sismiques à grande échelle.

De nos jours, presque toutes les composantes du cycle de vie d'un produit se prêtent à la simulation : fabrication, prototypage, transport, service continu, vieillissement, exploitation en conditions difficiles, voire extrêmes (séismes, arcs électriques, chocs de foudre, surcharges, etc.).

Simuler pour mieux développer

Chez ABB, la simulation accompagne les développements produit dans de nombreux domaines (électromagnétisme, thermodynamique, dynamique des fluides, mécanique et science des matériaux, etc.), qui sont de plus en plus couplés. La simulation ne se contente pas d'additionner ces différents phénomènes, elle en étudie les interactions : c'est la « simulation multiphysique ».

Que de chemin parcouru depuis 2013 et le numéro d'ABB Review consacré à la simulation →1 ! Ce qui semblait alors futuriste est aujourd'hui une réalité quotidienne pour tous les professionnels du domaine. La présente édition met le tableau à jour et se tourne vers l'avenir.



Progrès

L'explosion des puissances et vitesses de calcul, à un coût désormais abordable, dope les performances de la simulation, qui s'est en outre grandement simplifiée. L'exécution d'une tâche très gourmande en ressources il y a un quart de siècle prend aujourd'hui moins d'une demi-heure (hors préparation du modèle). Le processus a donc beaucoup gagné en rapidité, mais aussi en précision, avec la prise en compte d'une multitude de variables.

Au-delà des facteurs coût et matériel, notons aussi l'évolution du métier. L'époque où les ingénieurs les plus expérimentés consacraient beaucoup de temps à la création des modèles et au paramétrage des simulations est aujourd'hui révolue. Les progrès de l'informatique et des connaissances de la discipline, mais aussi l'amélioration des outils eux-mêmes font que ces tâches sont aujourd'hui aisément confiées à des débutants et à des stagiaires, tandis que les

L'explosion des puissances et vitesses de calcul à un coût abordable dope les performances de la simulation, qui gagne en simplicité.

experts se concentrent sur l'interprétation des résultats et la prise de décision →2.

La simulation se démocratise au fil des années, conquérant toujours plus de domaines.

En prise avec le réel

La plus pointue des simulations n'apporte rien si ses résultats sont déconnectés de la réalité. C'est en comparant les valeurs issues de la simulation avec les essais en laboratoire et sur le terrain qu'on peut évaluer la justesse de celle-ci : une bonne simulation est en accord avec l'expérimentation physique →3.

— Une bonne simulation concorde avec l'expérimentation.

Simulations multiphysiques

La simulation est un miroir numérique de la réalité physique. Le double virtuel d'un système ou objet réel subit donc la même diversité de phénomènes et d'interactions. Envisageons un appareil sous l'angle purement électrique : de prime abord, il paraît assez facile d'en déterminer la section de câble optimale, par exemple. Mais la présence d'autres phénomènes, notamment thermiques ou mécaniques (vibrations), peut jouer sur cet optimum. La simulation doit donc coupler les effets de diverses physiques (électrique, mécanique, thermique).



01

Ce couplage impose de tenir compte des interactions entre les différents effets. Ainsi, la simulation d'un arc électrique fait appel à la physique des plasmas ainsi qu'à l'électromagnétisme et à la thermodynamique (échauffement et refroidissement). Ces phénomènes sont liés entre eux ; la conductivité locale du plasma a un impact sur la chaleur générée, et la hausse de la température joue à son tour sur la conductivité. La chaleur affecte également le déplacement et la redistribution du plasma, donc la conductivité locale, et ainsi de suite. Cette étroite imbrication implique que les différents calculs spécifiques à chaque domaine se déroulent en même temps et échangent leurs données.

Avant l'avènement de la simulation, les choix de conception découlaient souvent de l'expérience,



02

— 01 Le numéro d'ABB Review 3/2013 sur la simulation a été salué pour sa contribution à la connaissance de la discipline.

— 02 L'interprétation des résultats, étape clé de la simulation

Note

1) Lire également « Jumeau numérique : la réalité dédoublée », ABB Review, 2/2018, p. 94-95.

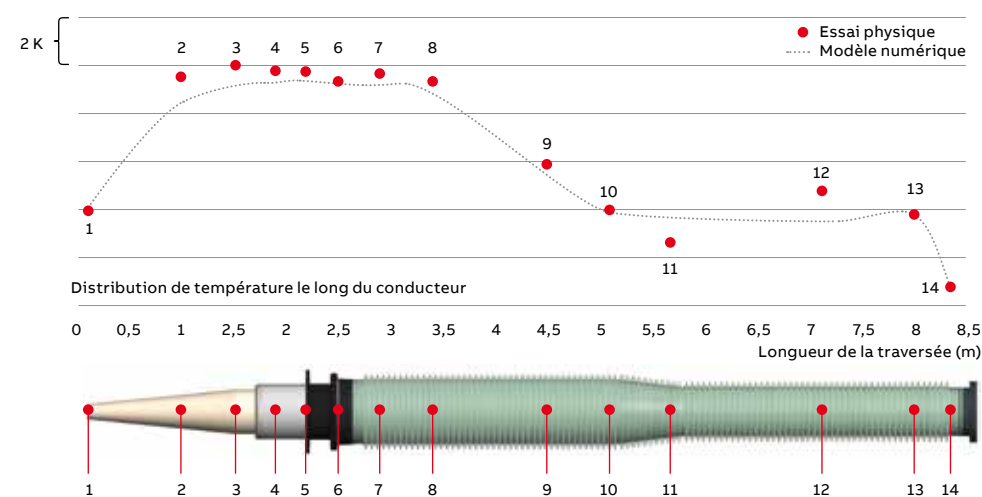
appuyée par l'observation. La simulation offre désormais une compréhension bien plus fine du déroulement d'un phénomène aussi complexe qu'un arc électrique.

Jumeaux numériques

La simulation doit être nourrie des caractéristiques de l'appareil ou du système à l'étude. Quand plusieurs simulations concernent un même équipement, elles peuvent se partager les informations pertinentes plutôt que puiser chacune dans des silos de données incompatibles, saisies à la main : c'est autant de puissance de calcul économisée. Ces données servent également bien d'autres fins au cours du cycle de vie produit, notamment l'intégration système, le diagnostic, la prédiction et les services avancés. La création d'une image virtuelle de l'équipement ou du système simulé facilite l'accès aux données et leur

— La simulation permet d'affiner la compréhension d'un phénomène aussi complexe qu'un arc électrique.

vérification. Cet agrégat structuré de données et d'algorithmes forme le « jumeau numérique »¹.



03

Un jumeau numérique centralise toutes les informations et caractéristiques d'un appareil : données de CAO, durée de vie, historique de maintenance, temps de marche, pour n'en citer que quelques-unes. Il peut aussi intégrer des algorithmes de simulation, qui vont notamment avertir l'opérateur ou le régleur lorsqu'une opération planifiée risque de surcharger l'appareil ou de le faire sortir de sa plage de fonctionnement assignée. Par exemple, laisser la température franchir un seuil critique peut raccourcir la durée de vie d'un appareil ou l'intervalle de maintenance, mais se justifier d'un point de vue opérationnel ; le responsable de production dispose alors de toutes les données pertinentes à portée de clic. La réalité augmentée contribue à l'efficacité et au confort d'utilisation : un technicien peut ainsi regarder un objet à travers la caméra de son smartphone et voir s'afficher automatiquement des informations interactives, annotées ou superposées au monde réel.

Ces outils de requête, qui équipent déjà les postes de travail et appareils portables, pourront être intégrés à la nouvelle génération d'interfaces de contrôle-commande, rendant ainsi superflu tout transfert manuel de données.

Si chaque appareil a son jumeau, les systèmes ou procédés complexes (ligne de machines collaborant au sein d'une usine par exemple) peuvent aussi disposer de doubles numériques qui répliquent leurs composants et données de configuration et d'interaction. Le jumeau numérique reflétant aussi les interfaces entre appareils, il contribue

à la configuration du système, aux essais et au diagnostic de panne.

Outils et méthodes

ABB utilise pour ses simulations des logiciels très divers (libres, commerciaux ou sur mesure), choisis au cas par cas en fonction de la problématique. Le choix du bon outil est un critère déterminant pour la réussite d'une simulation.

Le modèle est préparé à partir des informations de conception (données CAO par exemple) et des facteurs à prendre en compte (conditions aux limites, charges, etc.). Le processus est déjà en partie automatisé. De plus en plus faciles d'emploi, ces outils ont démocratisé la simulation.

Le type de simulation détermine les besoins en puissance de calcul. L'analyse électrothermique d'un appareillage moyenne tension complet, représenté par un maillage en volumes finis de

Un jumeau numérique centralise toutes les informations et caractéristiques d'un appareil.

quelque 50 millions de cellules, nécessite 24 heures de traitement sur un ordinateur haute performance de 160 cœurs → 4. Pour d'autres modèles ou applications plus simples, un bon ordinateur portable fait l'affaire : deux heures ont

03 Comparaison des températures simulées et mesurées le long d'un conducteur

04 La simulation numérique met en œuvre des outils de calcul haute performance.

ainsi suffi pour calculer les champs électriques émis autour d'une centrale longue de 150 m et large de 90 m, à l'aide de mailles élémentaires d'environ 2 cm couvrant les zones d'intérêt. Pour les calculs en réseau, une seule passe de quelques secondes donne un résultat de qualité satisfaisante.

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle grandissant dans ce domaine, notamment pour créer les modèles ainsi que reconnaître et

La simulation fait bien plus que suppléer l'expérimentation en laboratoire ou accélérer le développement produit.

interpréter les phénomènes en jeu. Parmi ses points forts figure l'optimisation des corrélations de données, qui permet d'identifier par exemple les paramètres les plus influents et de suggérer des variantes de conception s'approchant de l'optimum théorique.

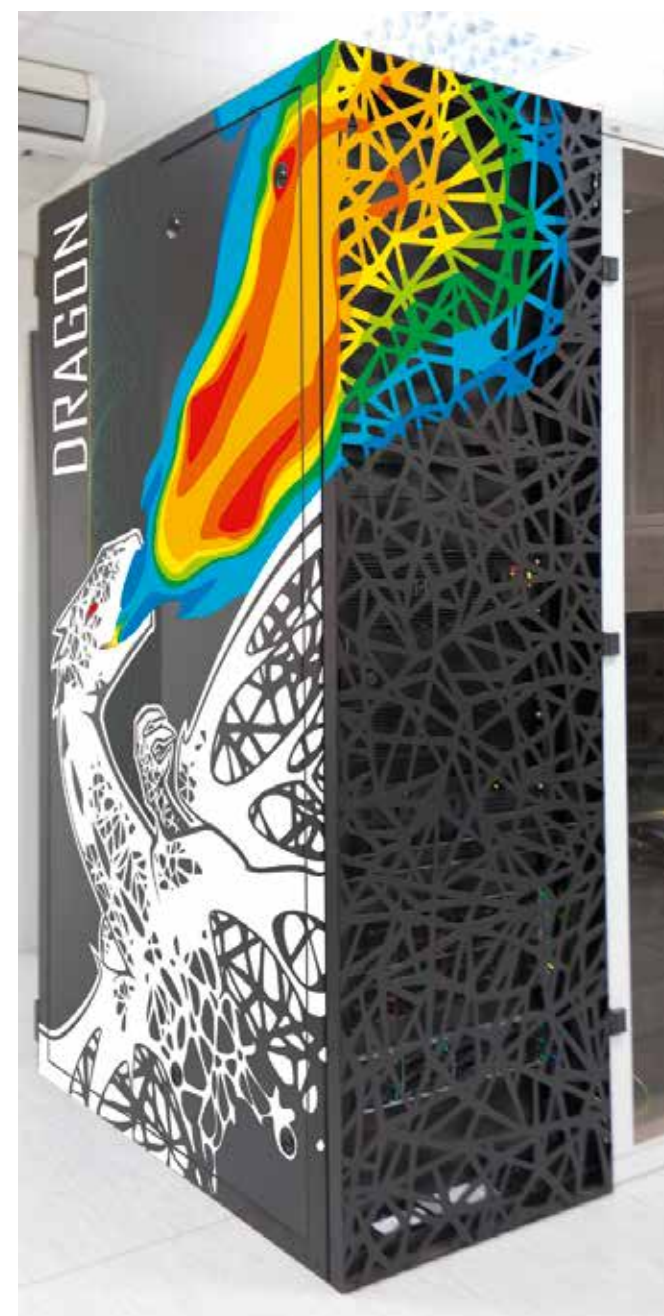
Au service de l'impression 3D et 4D

Réalisées bien en amont ou indépendamment de la fabrication ou de l'application, les simulations décrites jusqu'ici ne sont pas à proprement parler « temps réel ». Avec l'impression 3D et 4D – cette dernière incluant les fonctionnalités complémentaires d'un objet 3D – la simulation doit s'exécuter en même temps que le procédé pour en corriger certains paramètres en production (gradients thermiques temporaires, par exemple).

À la recherche de l'optimum

La simulation n'a pas seulement vocation à remplacer l'expérimentation en laboratoire ou à accélérer le développement produit. Bien plus simple à réaliser qu'un essai physique, elle permet de multiplier les itérations et, par là-même, d'explorer davantage de variantes, d'hypothèses et d'idées originales. Elle ouvre de nouvelles voies en matière de conception, mais aussi de processus de fabrication, de politique commerciale, d'essai et de vérification. Jongler avec les formes et les idées, affiner les paramètres et transcender ainsi les limites de la solution imaginée au départ : la simulation libère la créativité.

Ce numéro d'ABB Review présente un florilège des simulations réalisées par les ingénieurs du Groupe. •



04

JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

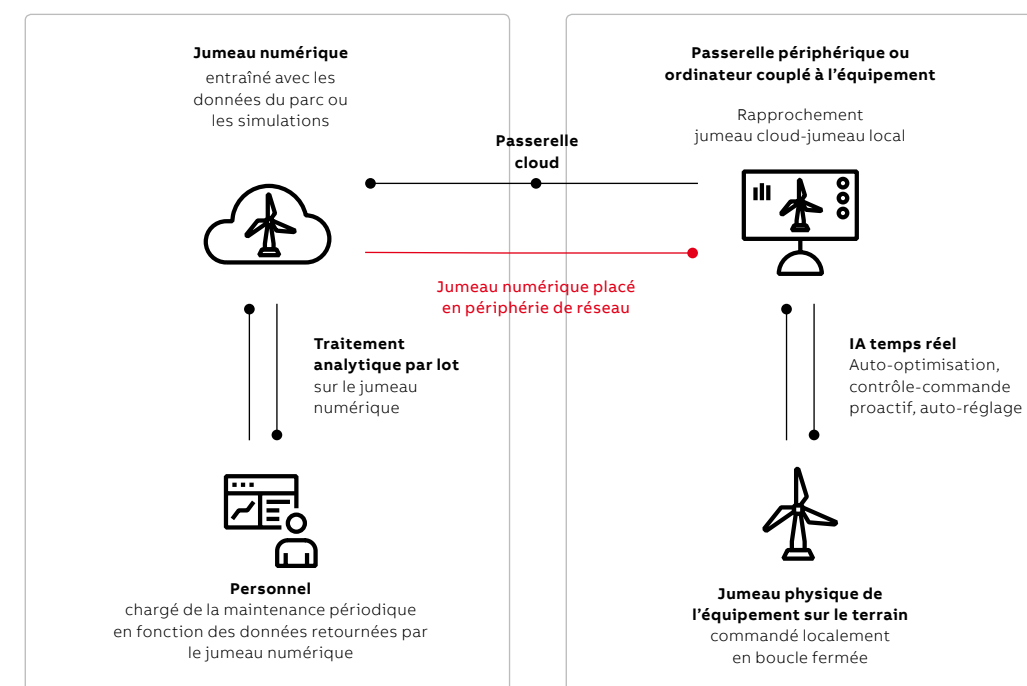
Des jumeaux numériques en périphérie de réseau pour une IA temps réel

Si les jumeaux numériques dans le cloud offrent des avantages substantiels, leur mise en œuvre en bordure de réseau ouvre la voie à des systèmes autonomes prometteurs, comme des applications d'intelligence artificielle (IA) temps réel basées sur l'auto-apprentissage.



Photo : un jumeau numérique en périphérie de réseau évolue en continu par auto-apprentissage tout en assurant la synchronisation et la mise à jour de son homologue dans le cloud. Rapprocher le jumeau virtuel de l'équipement réel offre de nouveaux avantages et perspectives dans l'industrie et l'énergie, comme ici au cœur d'une centrale au charbon « propre ».

01 Le jumeau numérique s'installe en périphérie de réseau, à proximité de l'équipement physique, voire sur ce dernier.



01



Mithun P. Acharya
ABB Corporate Research
Raleigh (Caroline du Nord,
États-Unis)

mithun.acharya@
us.abb.com

Mirrasoul J. Mousavi
Ancien collaborateur ABB

Un jumeau numérique reproduit virtuellement le comportement d'un actif physique à des fins multiples, telle la simulation. Dans le cas d'un onduleur solaire, par exemple, il peut prendre la forme d'une maquette numérique caractérisant les performances de l'appareil.

Rapprocher le jumeau numérique de l'équipement physique permet de nouvelles applications d'IA temps réel.

Un même équipement, procédé ou système peut, selon le cas, avoir plusieurs de ces doubles virtuels. Cette souplesse de combinaison physique/numérique permet de concevoir, d'améliorer, de construire et d'exploiter ce potentiel pour des applications temps réel basées sur l'Internet des objets, comme le calcul et l'analytique en périphérie de réseau, ou *edge*. Ce dernier terme désigne les matériels ou logiciels implantés sur le site client : passerelles, logiciels d'historisation, équipements de production, automatismes, etc.

Des jumeaux « périphériques »

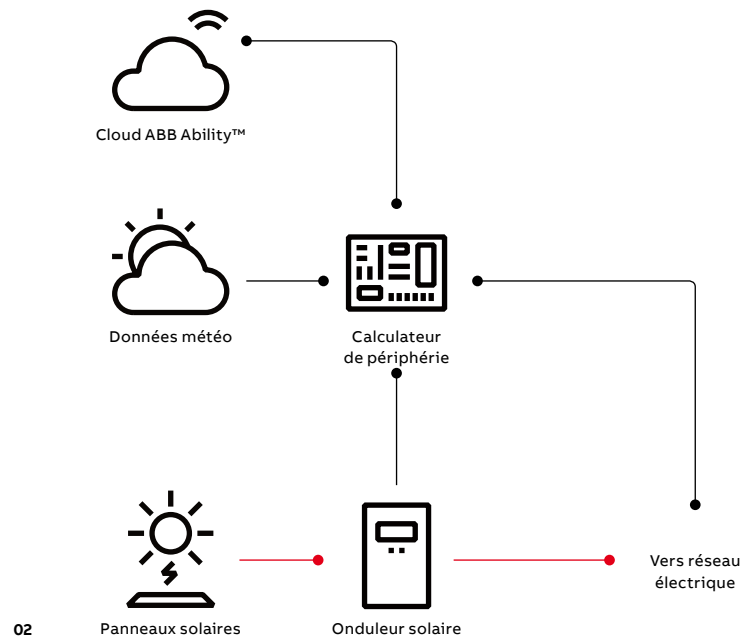
Habituellement, le jumeau numérique est hébergé et maintenu dans le cloud, et alimenté en données par des appareils de terrain ou des simulations. Il permet de comprendre le fonctionnement passé de l'actif simulé, mais aussi de prédire le futur grâce

à des capacités d'apprentissage automatique appliquées au suivi d'état, à la détection d'anomalies et à la prévision de défaillances. La maintenance prédictive de l'équipement réel en est un exemple.

Quelles perspectives ouvre alors un rapprochement, en bordure de réseau, entre ce double virtuel entraîné dans le cloud et l'actif physique ?

Jusqu'ici cantonnées à l'acquisition de données et aux calculs simples, les ressources informatiques en périphérie s'acquittent désormais de traitements complexes et d'analyses secondées par le cloud, qui accélèrent la prise de décision tout en la rapprochant du terrain →1. De nouvelles applications fondées sur l'IA temps réel émergent à la faveur de cette architecture :

- Réduction des contraintes de latence analytique : les allers-retours avec le cloud sont parfois d'une durée inacceptable. En exécutant les traitements en local, cette latence est ramenée à moins d'une seconde, gage de réactivité pour les fonctions de protection des équipements : si le jumeau détecte ou anticipe une anomalie, il peut immédiatement ordonner l'arrêt de l'appareil ;
- Intégration de l'analytique et du contrôle-commande local : jumeau numérique et commande de procédé peuvent interagir en boucle fermée, autorisant des applications de régulation proactives et autonomes. De quoi par exemple remédier à une anomalie grave anticipée par le jumeau, sans intervention humaine ;



02

Régulation temps réel d'une centrale solaire

Les onduleurs solaires évolués sont capables de fournir des services système au réseau électrique (réglage de tension et de fréquence, correction du facteur de puissance et régulation de puissance réactive) qui permettent d'amortir les fluctuations dues à l'intermittence des énergies renouvelables et à l'élasticité de la charge. Ces fonctions imposent toutefois d'abaisser la puissance de sortie de la centrale photovoltaïque (PV) d'environ 10 %.

Pour rester dans cette plage de régulation par effacement, il faut calculer et transmettre la puissance crête disponible (PCD) à chaque cycle de rafraîchissement du contrôle-commande (moins de 4 secondes généralement). L'algorithme de calcul prend pour cela en compte le rayonnement solaire, les courbes caractéristiques de courant et de tension des modules PV, la température des panneaux et les rendements de conversion des onduleurs. De la précision du résultat dépend la finesse de la régulation, en particulier lorsqu'il s'agit d'augmenter la puissance.

La modélisation de la PCD passe par des outils physiques et d'apprentissage machine créés dans le cloud, à partir des historiques de données rapatriés du parc d'onduleurs. Le jumeau numérique déduit de ces modèles peut être replacé dans des onduleurs solaires ABB pour exécuter en local des traitements analytiques à la demande ou en temps réel, en synergie avec le cloud.

Pour en valider le principe, ABB a réalisé un démonstrateur en environnement Python →2, qui a permis d'évaluer en temps réel la puissance débitée par l'onduleur, à partir des données fournies en continu par ce dernier. Les données de terrain issues d'une centrale PV ont été traitées par un calculateur de périphérie de type Raspberry Pi. L'appareil testé était un onduleur monophasé de 2,5 kW équipant un établissement scolaire aux États-Unis. Un programme a injecté en continu les trames de données dans le calculateur et les résultats ont été représentés sous forme graphique.

Les avantages d'un traitement local sont aussi d'ordre pratique et financier.

Dans cet exemple →3, la sortie de l'onduleur est réglée en permanence à 90 % de la PCD pour permettre une éventuelle régulation à la hausse. À chaque instant, la puissance attendue, considérée par l'algorithme comme la PCD instantanée, sert de consigne au cycle suivant de répartition ou de

- Apprentissage rapide : le recours à l'apprentissage automatique en ligne, à partir d'un flux continu de données, ainsi qu'à l'apprentissage par renforcement en temps réel permet au jumeau numérique d'apprendre par lui-même et de progresser sans arrêt. Résultats : un fonctionnement du système optimisé et des équipements qui s'adaptent automatiquement aux évolutions. Par exemple, une source d'énergie raccordée au réseau électrique peut tirer parti des connaissances accumulées par son jumeau numérique et le faire évoluer pour optimiser les paramètres de fonctionnement ou de commande, et ainsi fournir une puissance maximale sans compromettre la stabilité du réseau.

Les avantages sont aussi d'ordre pratique et financier :

- Le transfert, le stockage et l'analyse de toutes les données dans le nuage coûtent cher ; ramener ces traitements en périphérie de réseau permet d'alléger la facture ;
- Le prétraitement des données réduit la volumétrie des transferts vers le cloud ;
- Les données sensibles ne quittent pas le périmètre de l'entreprise ;
- L'analyse peut s'exécuter hors connexion avec le jumeau numérique, ce qui accroît la résilience.

Voyons trois scénarios applicatifs pour illustrer les possibilités de cette technologie.

— 02 Calcul en périphérie pour la modélisation et le suivi de performance d'onduleurs solaires

— 03 Sortie d'un onduleur fournissant des services système au réseau électrique ; la valeur négative de réserve de capacité autour du point d'abscisse 96 est un artefact.

commande. Ainsi la PCD varie-t-elle au gré des données d'entrée PV pour garantir une marge satisfaisante de manœuvre de l'onduleur.

Sécurisation temps réel des transformateurs

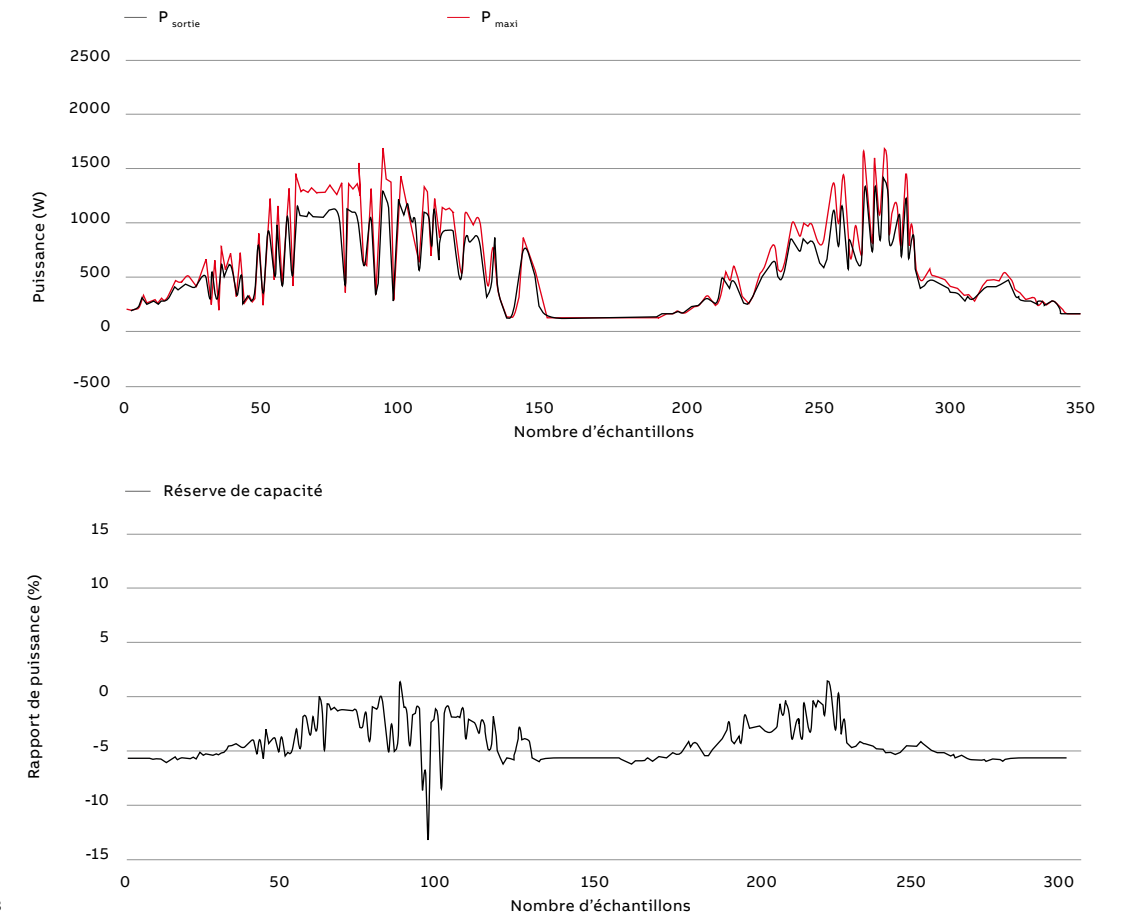
La sécurité des postes et des transformateurs de puissance est un paramètre clé de la fiabilité du réseau électrique. Pour accroître leur résilience, ABB a mis au point une infrastructure organisée en couches de détection et d'évaluation des impacts en temps réel : un jumeau virtuel répliquant dans le cloud la sécurité physique d'un gros transformateur se double, en local, d'un système de surveillance temps réel de l'appareil.

Tout d'abord, des modèles d'apprentissage automatique, nourris d'expérimentations en conditions maîtrisées et de mesures vibratoires et acoustiques sur le transformateur, ont été conçus et entraînés dans le cloud pour classer les impacts en « bénins » ou « critiques » selon leur gravité. Puis ces modèles, qui constituent

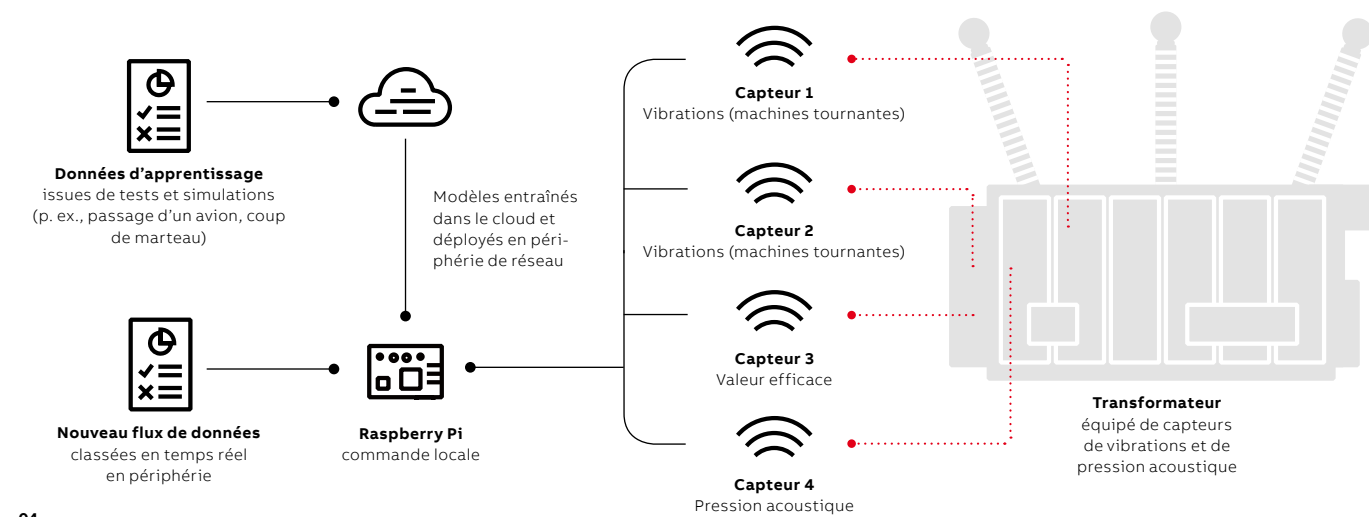
L'expérimentation a permis de trouver le bon équilibre entre performances analytiques et exigences applicatives.

le jumeau numérique de la sécurité physique du transformateur, ont été déployés en périphérie de réseau de façon à signaler les impacts relevés par les capteurs et à y réagir en temps réel. L'apprentissage automatique et les autres traitements de données ont ensuite été réalisés en continu, contrairement aux processus analytiques traditionnels où les données sont stockées avant d'être analysées. L'avantage de la procédure est double : une réactivité instantanée et une volumétrie des données réduite.

La performance du traitement dépend surtout de la vitesse à laquelle le processeur local absorbe le flux de données entrant et lui applique un modèle d'apprentissage automatique pour aboutir au résultat visé (classement ou régression). En l'occurrence, 52 000 échantillons de données capteurs à la seconde ont permis de quantifier cette caractéristique. Loin d'être simple, l'injection d'un tel flux dans un moteur cloud n'en est pas moins un excellent moyen de déterminer le débit minimal acceptable et de localiser les goulets d'étranglement susceptibles de dégrader la performance temps réel →4. Cette expérience a permis de documenter la stratégie de réglage garantissant l'équilibre entre performance analytique et exigences applicatives.



03



04

Les modèles ont été développés sous Python avec la méthode de partitionnement en k-moyennes et de classification par arbre de décision, puis implantés dans un Raspberry Pi faisant office d'ordinateur monocarte local. L'objectif était de confronter le modèle d'apprentissage automatique au flux de données entrant, le résultat devant donner la classe de l'impact, à savoir « bénin » (vibrations au passage d'un avion) ou « critique » (coup de marteau).

Ces scénarios très représentatifs de la réalité ont montré de gros écarts de performance entre une machine virtuelle Linux huit cœurs cadencée à 2,1 GHz, servant de passerelle périphérique haut de gamme, et un Raspberry Pi 3 modèle B quadricœur à 1,2 GHz. La performance a également beaucoup varié entre l'ingestion de données et l'évaluation du modèle. S'il est possible d'améliorer la performance en optimisant le code, les différences entre le mode surveillance et le mode évaluation resteront sans doute importantes pour les applications à temps critique.

Évaluation de l'installation électrique d'une usine
Dans ce cas, la sécurité d'une usine agroalimentaire a été répliquée dans le cloud avec la reconnaissance d'images. Des réseaux neuronaux profonds à convolution y ont été entraînés à reconnaître automatiquement les dangers électriques à partir d'images de l'usine tirées des précédents audits de sécurité et représentant des situations classées « dangereuses » ou « sans danger ». Ces réseaux ont ensuite été déployés sur le smartphone des opérateurs ou les

caméras vidéo du site afin de détecter ces dangers en temps réel →5.

Dernière brique technologique ajoutée à la panoplie d'outils IA, l'apprentissage profond gagne ses lettres de noblesse en 2017, à la suite des remarquables progrès accomplis dans l'entraînement d'algorithmes et le calcul de taux d'erreur. Il peut dans notre cas s'appliquer à un jumeau numérique placé en périphérie de réseau pour détecter les dangers électriques et les risques sanitaires.

Bien que l'apprentissage profond soit connu de longue date et très utilisé dans des applications cloud comme le traitement d'images, le traitement du langage naturel et la reconnaissance vocale, sa mise en œuvre en local est somme toute une nouveauté, du fait des besoins en puissance de calcul.

Un modèle entraîné déployé à moindres frais en périphérie de réseau illustre la synergie cloud-edge, au bénéfice de l'analytique et de l'apprentissage automatique.

La catégorie de danger retenue ici est la corrosion, bête noire de l'industrie agroalimentaire, pour

- 04 Analyse en continu de mesures vibroacoustiques afin d'assurer la sécurité d'un transformateur de puissance
- 05 Plate-forme d'apprentissage profond par reconnaissance d'images pour la détection de risques d'accident

laquelle ABB dispose d'un volume suffisant de données d'apprentissage constituées de centaines de milliers de variables. Plusieurs réseaux d'apprentissage profond ont ainsi été entraînés avec des bibliothèques Google TensorFlow et Keras. Comme c'est souvent le cas dans le développement analytique, la quantité et la qualité des données d'apprentissage conditionnent l'exactitude des résultats. Dans le scénario le plus favorable, 90 % des images ont été bien classées, ce qui confirme le potentiel des algorithmes d'IA. À titre de comparaison, le taux de reconnaissance d'images par un humain est de 95 %.

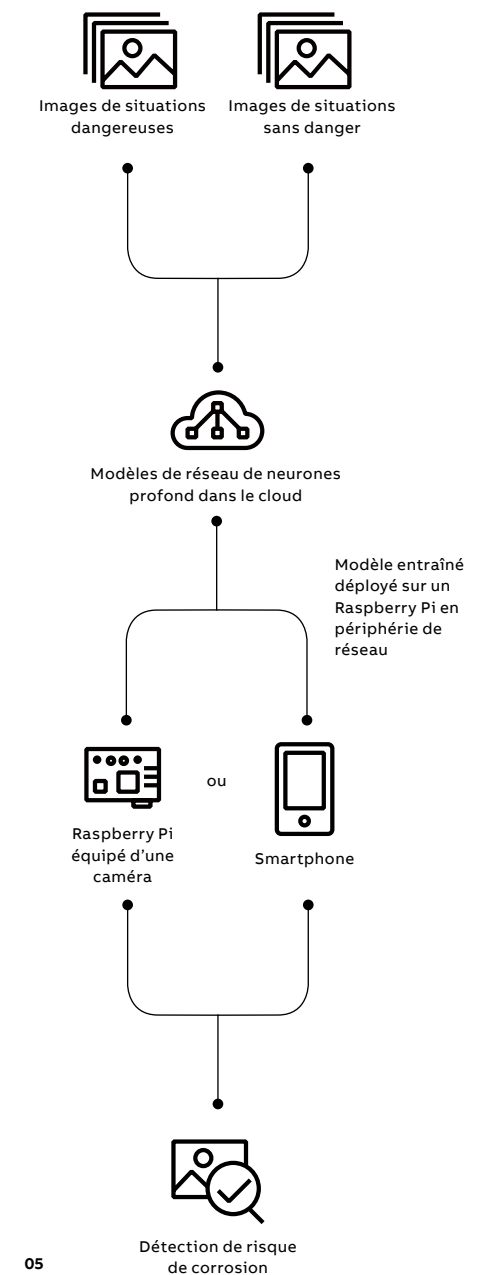
Un démonstrateur matériel a été élaboré à partir d'un ordinateur monocarte de type Raspberry Pi modèle B, pour quelques dizaines d'euros. Les modèles d'apprentissage profond, développés sur une grappe de processeurs graphiques, ont été implantés sur le Raspberry Pi pour l'évaluation temps réel. Les bibliothèques Python ont largement contribué à l'exercice. L'expérience a montré que l'apprentissage profond n'était pas forcément une technique coûteuse ni l'apanage des traitements dans le cloud. Sa mise en œuvre en périphérie est tout à fait possible pour de nombreuses applications, comme le traitement d'images ou d'autres données de grande dimension mathématique. C'est enfin la preuve qu'un modèle

Avec les progrès de l'informatique de périphérie, les jumeaux numériques implantés en local sont porteurs de promesses dans une vaste palette de domaines.

entraîné peut être déployé en périphérie à moindres frais : une nouvelle illustration de la synergie cloud-edge, au bénéfice de l'analytique et de l'apprentissage machine.

Technologie d'avenir

Même si l'accent est mis ici sur le déploiement de jumeaux numériques en périphérie de réseau, il ne s'agit pas pour autant de suppléer le cloud, mais bien de le compléter et le seconder. Avec les progrès de l'informatique de périphérie, les jumeaux numériques implantés en local sont porteurs de promesses dans de multiples domaines, comme les réseaux électriques, villes, usines ou transports intelligents, la robotique et l'Internet des objets. •



05

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

La simulation améliore la conception thermique de l'appareillage électrique

Les matériels qui équipent les réseaux électriques modernes doivent non seulement être compacts et puissants, mais aussi capables d'encaisser de très fortes contraintes thermiques. C'est pourquoi leur conception fait appel à des outils numériques comme la simulation électrothermique, une des dernières grandes innovations de la discipline.

—
Jörg Ostrowski
Andreas Blaszczyk
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)

joerg.ostrowski@ch.abb.com
andreas.blaszczyk@ch.abb.com

—
Bogusław Samul
Remigiusz Nowak
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

boguslaw.samul@pl.abb.com
remigiusz.nowak@pl.abb.com

—
Michael Gatzsche
ABB High Voltage Products
Zurich (Suisse)

michael.gatzsche@ch.abb.com

—
Valeri L. Oganezov
ABB Electrification
Products
Saint-Laurent
(Québec, Canada)

valeri.l.oganezov@ca.abb.com

Les exigences de compacité, de performance et d'adaptabilité à un paysage énergétique aussi complexe que changeant font des contraintes thermiques un critère de conception décisif pour les équipements de réseau électrique. A priori, calculer le comportement électromagnétique et les échanges thermiques au sein d'un appareillage ou d'un système électrique devrait suffire à prédire ces sollicitations.

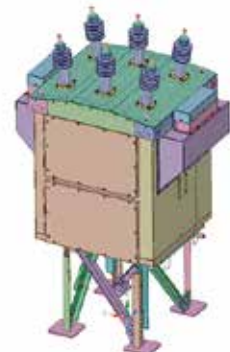
—
De nouveaux outils prédisent les contraintes thermiques des équipements de réseau électrique avec une haute précision, sans grand effort.

Or un calcul abouti et complet oblige à prendre en compte et à simuler une multitude de phénomènes physiques : une démarche beaucoup plus exigeante que les traditionnelles méthodes de conception heuristique. La solution ? Passer au numérique.

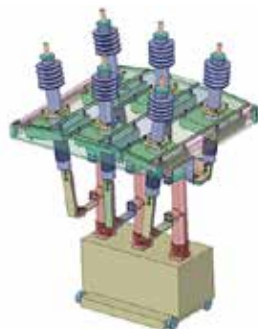
De nouveaux outils à la rescousse

Si l'on sait calculer depuis des années les pertes ohmiques et inductives ainsi que les phénomènes de conduction thermique, ce n'est que récemment

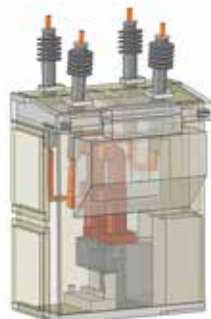
01a



01b



01c



—
01 Disjoncteur
d'extérieur MT

01a Extérieur

01b Intérieur

01c Sous-modèle
thermique simplifié

—
02 Le matériel
électrique des grands
réseaux, comme
ce transformateur
de puissance ABB,
doit endurer de très
fortes contraintes
électrodynamiques
et thermiques dont
il faut tenir compte
en conception. La
simulation est à cette
fin un précieux outil.



que la simulation conjointe, ou « co-simulation », électromagnétique et fluide permet de prédire avec précision les importantes pertes observées au niveau des contacts électriques ou les échanges de chaleur convectifs-turbulents-rayonnants à la surface d'appareils réalistes. Ces simulations s'accompagnent d'outils numériques tels que des algorithmes perfectionnés de mappage, un maillage automatique très fin et des techniques poussées de contrôle d'erreur. Elles assurent, sans grand effort, une prédiction extrêmement précise des contraintes thermiques subies par les équipements de réseau électrique.

L'intégration de larges pans de ces simulations dans un outil de CAO, solution retenue par ABB pour sa plate-forme Simulation Toolbox, permet d'exécuter assez facilement des simulations pointues. Des modèles de simulation paramétrés dans une CAO garantissent une analyse rapide et précise d'une myriade de variantes produits sous différents régimes de charge. ABB a été un précurseur de ces jumeaux de simulation sur CAO, appelés à devenir les « briques technologiques » de l'usine du futur [1].

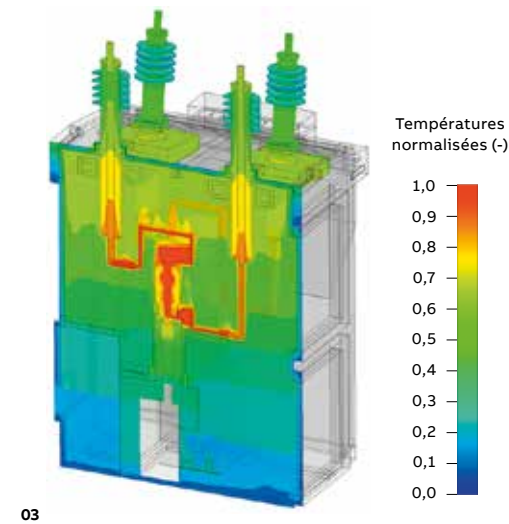
Le Groupe a notamment été le premier à mettre au point des méthodes évoluées de calcul global des contraintes électrothermiques, déterminantes pour parfaire la conception des matériels électriques

—
ABB a été le premier à mettre au point des méthodes évoluées de calcul global des contraintes électrothermiques, déterminantes pour la conception des matériels électriques modernes.

modernes. Certaines sont d'ores et déjà utilisées en interne. Chaque tâche de simulation dictant sa méthode, voici trois exemples qui donnent un avant-goût de la puissance et de la souplesse de l'approche ABB.

Co-simulation Maxwell-CFD d'un disjoncteur d'extérieur moyenne tension (MT)

L'une des méthodes de calcul électrothermique les plus fines et précises repose sur la co-simulation par couplage bidirectionnel d'un solveur d'équations de Maxwell à éléments finis, pour les pertes électromagnétiques, et d'un solveur de mécanique des fluides numérique (CFD), pour le transfert de chaleur. Tous deux échangent des informations en cours de calcul afin de prendre en compte tous les effets électrothermiques d'intérêt. L'emploi de mailles distinctes pour les deux physiques en jeu permet de résoudre des



03

phénomènes localisés, impossibles à simuler sinon. Dans le cas du refroidissement convectif, ce sont par exemple les effets de peau, qui concentrent les pertes à la périphérie des conducteurs, et les fines couches limites turbulentes à la surface externe des éléments solides, qui conditionnent l'échange de chaleur avec l'environnement.

Les chercheurs ABB ont mis au point de puissants outils de calcul pour réaliser des simulations d'une telle complexité. Citons par exemple l'analyse électrothermique en 3D d'un disjoncteur d'extérieur MT capable de résister aux arcs électriques internes →1.

Les disjoncteurs sont des éléments cruciaux de la distribution électrique : au-delà de leur fonction de commutation, ils protègent les réseaux en amont et les charges en aval, notamment les gros appareillages comme les transformateurs de puissance.

Le fonctionnement d'un disjoncteur est tributaire de son comportement thermique : un échauffement excessif en régime normal a pour

effet de raccourcir la durée de vie de l'appareil et de détériorer ses principaux constituants. De même, les hausses de température dues aux surcharges peuvent endommager l'isolant et aboutir au claquage électrique.

Alors même que la ventilation forcée n'est pas autorisée en cas de surcharge du disjoncteur, ce dernier doit faire preuve d'une grande fiabilité dans une large plage de températures (entre -50 et +40 °C) et, par exemple, supporter 60 % de surcharge à des températures extrêmement basses. L'enveloppe à isolation thermique, qui garantit une protection IP43, comporte des grilles de ventilation limitant la circulation de l'air et donc l'efficacité du refroidissement par convection. Cette contrainte supplémentaire complique la tâche des concepteurs et peut entraîner plusieurs itérations et essais répétés.

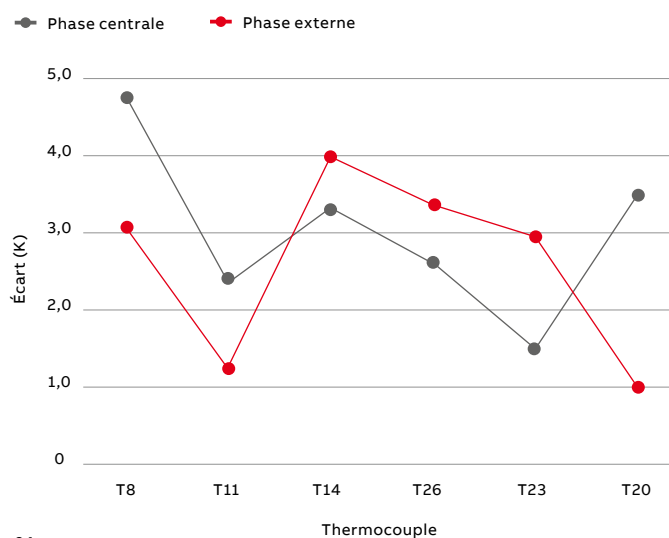
Le comportement thermique des disjoncteurs est contrôlé par des essais d'échauffement assortis de plusieurs prérequis : des conditions ambiantes maîtrisées, un modèle physique de l'appareil, une alimentation adéquate et une installation d'essai (thermocouples, etc.). Sans compter les nombreuses heures parfois nécessaires pour atteindre une température stable. Si cette procédure s'impose évidemment pour les ultimes essais de type d'un appareil, elle s'avère coûteuse quand il s'agit de tester les premières ébauches de conception, dont certaines resteront peut-être dans les cartons.

— La simulation complète englobe tous les phénomènes physiques se produisant au cours d'un essai d'échauffement normalisé.

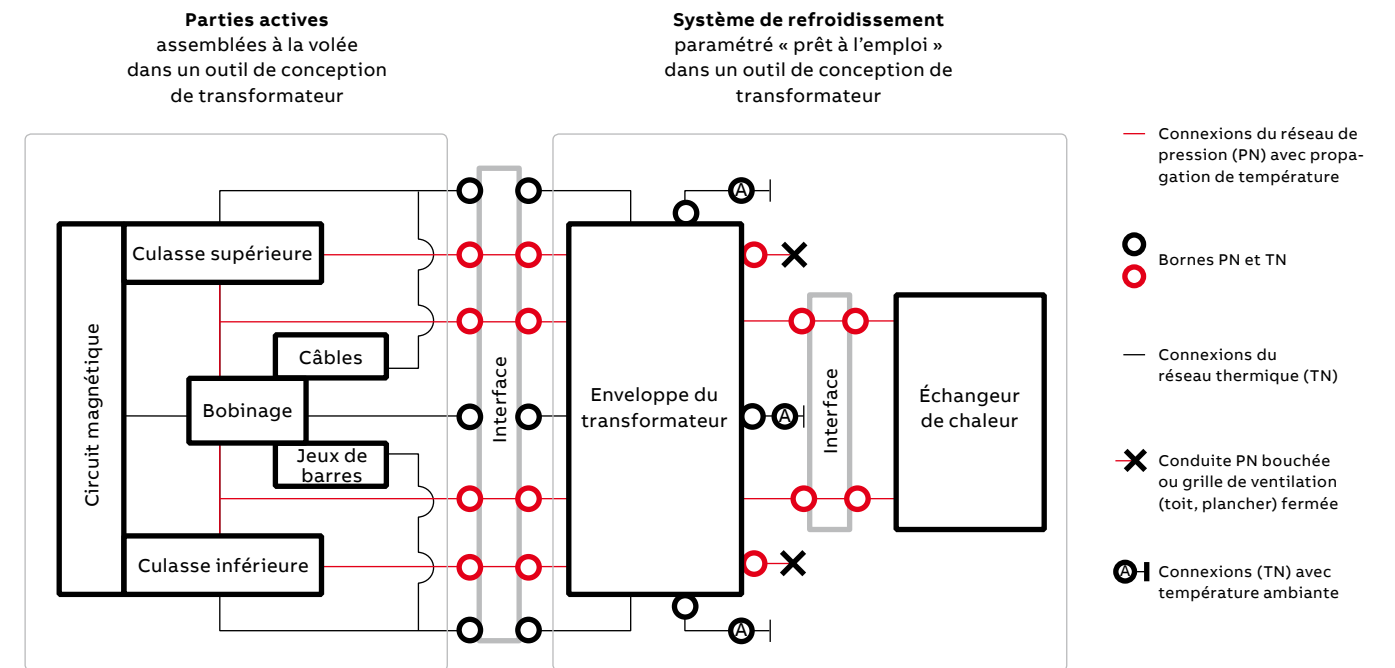
En revanche, des essais d'échauffement virtuels, sur ordinateur, accélèrent à moindres frais la validation des différentes conceptions d'un disjoncteur soumis à quantité de charges et de conditions ambiantes.

Le modèle de simulation ABB inclut des sous-modèles électromagnétiques et thermiques qui échangent leurs données. Le modèle électromagnétique, malgré sa symétrie géométrique, prend en compte les trajets du courant dans les trois phases, en raison des charges de courant asymétriques et des effets de proximité. La simulation thermo-fluidique, de son côté, ne porte que sur la moitié de l'appareil, compte tenu de sa symétrie géométrique planaire.

La simulation complète englobe tous les phénomènes physiques se produisant au cours d'un essai d'échauffement normalisé, à savoir : l'influence de la température sur la résistivité du matériau



04



05

— 03 Distribution de température à l'intérieur d'un disjoncteur d'extérieur MT

— 04 Précision de la simulation par rapport aux mesures physiques

— 05 Modèle de réseau reliant les parties actives du transformateur aux composants du système de refroidissement

— 06 Tracé de vitesse dans l'enveloppe d'un transformateur sec et principaux écoulements d'air (flèches blanches). Cette simulation CFD axisymétrique 2D a été réalisée dans Fluent sur un appareil équipé d'un ventilateur interne et de grilles de ventilation au niveau des parois et du toit.

ainsi que les résistances de contact électrique, pour ce qui est des pertes électriques, des effets de peau et de proximité ; les turbulences dans un flux soumis à une poussée hydrostatique ainsi que le rayonnement thermique, pour les calculs thermiques ; d'autres détails, comme l'incidence des grilles de ventilation sur l'échange d'air entre l'intérieur de l'appareil et le milieu ambiant.

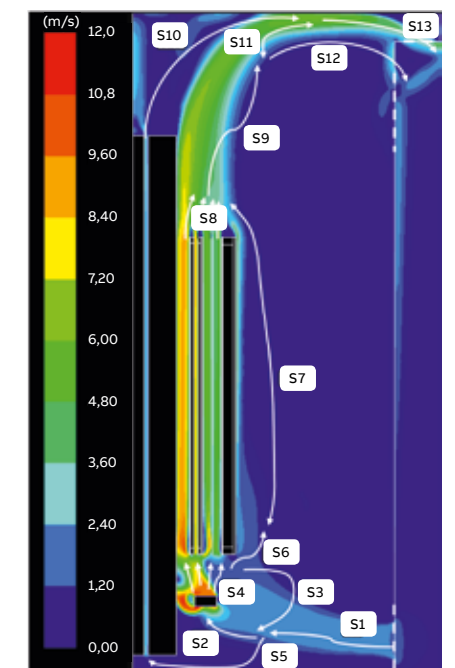
La simulation couplée est un processus itératif : les deux solveurs échangent des données jusqu'à obtention d'une température stable ($\pm 5\%$), ce qui a nécessité quatre itérations ici. Moyennant un écart maximal de 5 K, les résultats de la simulation ont presque coïncidé avec l'essai d'échauffement réel →3,4. De quoi illustrer la fiabilité de l'outil virtuel et sa capacité à diminuer le nombre d'itérations nécessaires aux essais physiques.

Modèle de réseau d'un transformateur de type sec

La co-simulation Maxwell-CFD, très gourmande en ressources informatiques, ne convient pas toujours à la simulation de gros appareils complexes ou à l'automatisation de la conception ; les descriptions analytiques simplifiées s'y prêtent mieux. Par exemple, les équivalents thermiques des circuits électriques, ou « réseaux thermiques », à défaut d'être précis, s'avèrent bien plus efficaces.

— Moyennant un écart maximal de 5 K, les résultats de la simulation ont presque coïncidé avec l'essai d'échauffement réel.

Cette méthode sert d'habitude à évaluer l'échauffement des enroulements de transformateur [1] →2. Les développeurs de l'outil de conception de transformateurs ABB ont récemment étendu le modèle de réseau et les calculs à l'ensemble du système de refroidissement [3] →5. Les sources de chaleur que constituent les parties actives sont reliées au circuit de refroidissement par une première interface prédéfinie qui autorise les échanges fluidiques-thermiques entre ces éléments. Le système de refroidissement comporte une enveloppe ainsi qu'un échangeur de chaleur externe, une seconde interface séparant ces deux éléments. Les interfaces permettent de combiner tous les



06

composants de réseau à l'œuvre et de définir une configuration arbitraire en fonction des spécifications du concepteur. Les architectures transformateur sans enveloppe et ventilation ouverte (à la place de l'échangeur de chaleur) sont proposées en option.

Un modèle de réseau de pression d'une enveloppe de transformateur sec illustre cette implantation →7. Les écoulements d'air identifiés par calcul CFD →6 ont servi à créer la topologie du réseau. Le résultat de la simulation a permis de valider la précision du modèle, dans la plage de paramètres requise. Parmi ces caractéristiques, citons les dimensions de l'enveloppe, les données du ventilateur interne et la résistance à l'écoulement des grilles de ventilation. Le modèle de réseau est aussi capable de reproduire les écoulements circulaires à l'intérieur de l'enveloppe.

Le modèle complet peut calculer en quelques secondes l'échauffement des enroulements avec tous les détails du bobinage, du circuit magnétique et du système de refroidissement.

Quelques secondes suffisent au modèle complet pour calculer l'échauffement des enroulements en tenant compte de tous les détails du bobinage, du circuit magnétique et du système de

refroidissement. Les concepteurs sont ainsi en mesure de rester en-deçà des seuils de température prescrits et de minimiser les coûts matières.

Simulation d'essai de courant de courte durée sur sectionneur de mise à la terre (MALT)

Les essais obligatoires de courant de courte durée (quelques secondes) visent à reproduire un court-circuit dans un appareil afin de caractériser sa tenue thermique et mécanique au défaut. Vu la complexité et le coût de ces essais, des simulations capables de prédire avec fiabilité l'échauffement de l'appareil constituent un indéniable atout.

Inutile d'engager pour cela toute la puissance de la co-simulation Maxwell-CFD car le flux thermique entre l'appareil et son environnement est minime. En fait, la totalité du processus CFD peut être vue comme un simple transfert de chaleur par conduction transitoire dans les parties solides. Bien plus significative est ici la modélisation électromagnétique, qui doit prendre en compte trois grands effets :

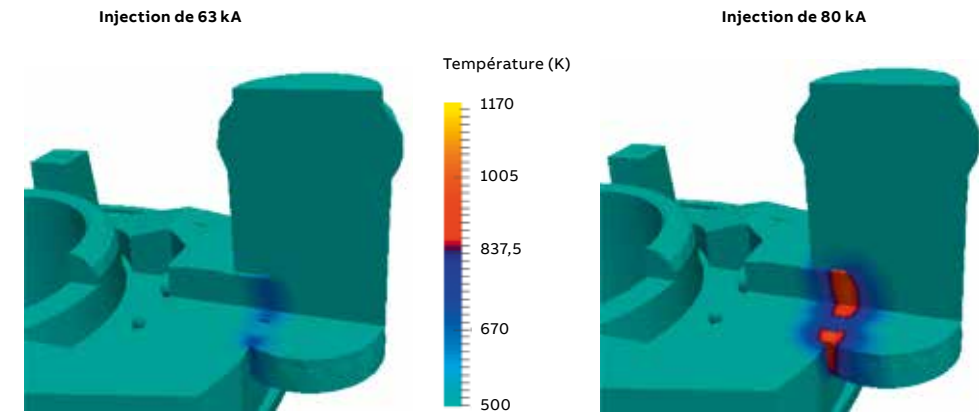
- Les pertes ohmiques dans le volume de l'appareil ;
- La dépendance en température de la résistivité électrique ;
- Les pertes ohmiques dues aux résistances de contact électrique (RCE) à l'interface des conducteurs.

Impossible de passer outre ces dernières, qui sont à la fois les plus compliquées et les plus importantes puisqu'elles peuvent représenter jusqu'à 50 % des pertes totales. Sans compter que dans les

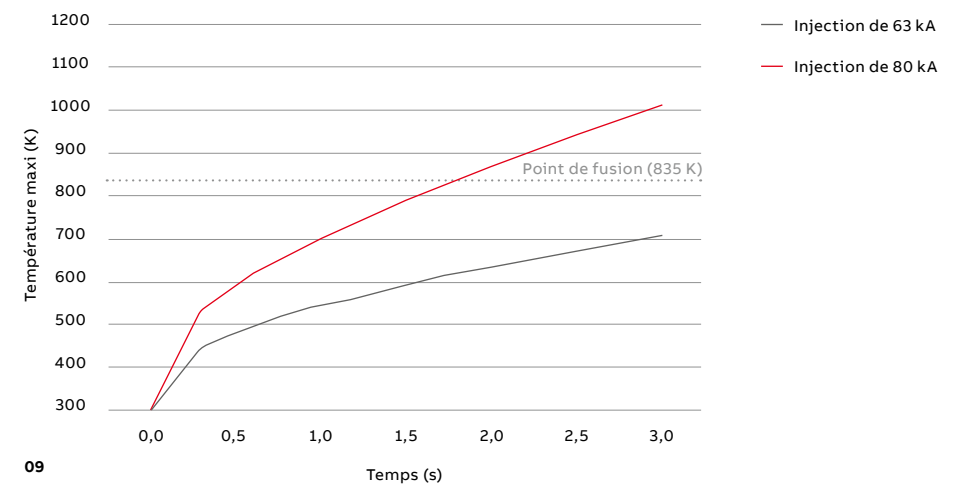
— 07 Réseau de pression avec écoulements d'air (flèches noires) coïncidant avec les résultats de la CFD →6. Ne figure ici que le couplage réseau de pression-réseau thermique.

— 08 Coupe de la partie la plus chaude du sectionneur après 3 s : la température des zones bleues/vertes est inférieure au point de fusion (835 K), et celle des zones rouges/jaunes, supérieure.

— 09 Température maximale relevée lors des deux essais simulés de courant de courte durée : à 63 kA, la température reste en-dessous du point de fusion ; à 80 kA, elle dépasse ce seuil après 1,8 s.



08



09

Bibliographie

[1] Blaszczyk, A., et al., « Couplages multiples : Simulation Toolbox optimise les propriétés diélectriques et thermiques du matériel électrique », *ABB Review*, 3/2013, p. 16–21.

[2] Nowak, R., et al., « A 3D electro-thermal simulation of the outdoor medium voltage circuit breaker », *IEEE Transactions on Power Delivery* (en révision).

[3] Cremasco, A., et al., « Network modelling of dry-type transformer cooling systems », *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 37, n° 3, 2018.

[4] Ostrowski, J., et al., « Simulation of short time current tests of industrial devices », *International Conference on Scientific Computing in Electrical Engineering (SCEE 2018)*, Springer, collection Mathematics in Industry.

sectionneurs, ces pertes ne se répartissent pas dans la totalité du volume, comme c'est le cas des pertes ohmiques du matériau, mais se produisent localement, à la surface des contacts électriques ; les zones les plus chaudes et les plus vulnérables se concentrent donc au voisinage des contacts. La modélisation des RCE est une question multiphysique amplement étudiée dans le monde entier.

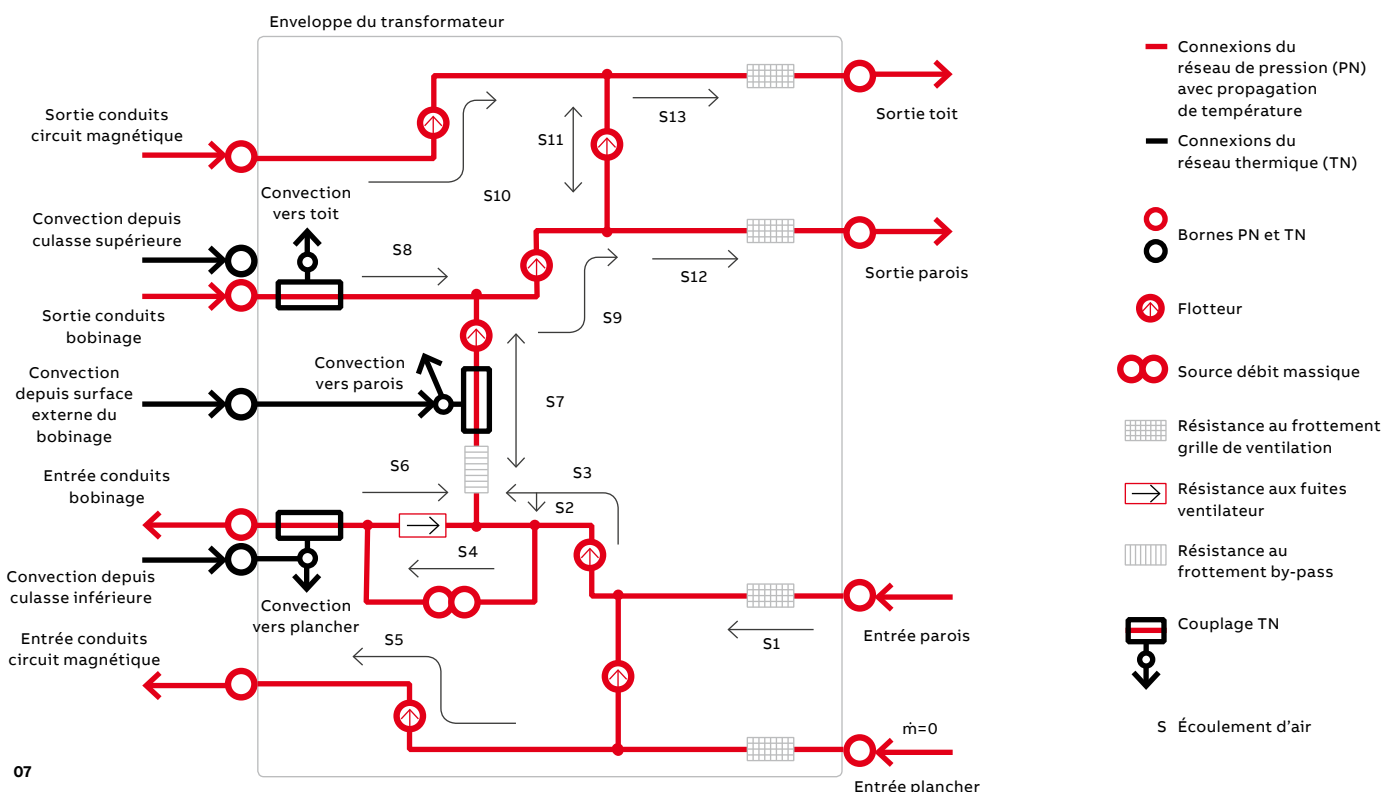
Pour simuler le sectionneur de MALT d'un appareillage à isolation gazeuse, on a supposé constante (c'est-à-dire indépendante de la température) la résistance de contact [4]. C'est là la plus simple représentation d'un contact dont la résistivité électrique croissante (matériau) durant la montée en température est compensée par une diminution de la résistance de contact, du fait d'un agrandissement de la zone de contact causé par l'adoucissement du matériau. Deux essais de courant de courte durée, avec injection de 63 et 80 kA_{eff} pendant 3 s, ont été simulés et pratiqués en laboratoire →8,9.

Le prototype testé en conditions réelles a réussi l'essai à 63 kA, mais a échoué à 80 kA, au bout d'environ 2 s ; un résultat conforme au verdict de la simulation, qui a justifié le développement d'un nouvel appareil à 80 kA.

Le prototype testé en conditions réelles a réussi l'essai à 63 kA, mais a échoué à 80 kA au bout d'environ 2 s ; un résultat conforme au verdict de la simulation.

Modéliser le futur

Les progrès de la simulation électrothermique ainsi que la simplification et la montée en puissance de la co-simulation permettront d'affiner la résolution des modèles et de reproduire encore plus fidèlement les conditions réelles d'expérimentation des appareils. Le matériel électrique connaît une période de mutation portée par les nouveaux enjeux de la filière : numérisation du système, décentralisation de la production, déploiement des interconnexions transfrontalières et insertion des énergies renouvelables intermittentes, entre autres. Autant de champs d'action pour des outils de simulation et de co-simulation toujours plus élaborés et puissants. •



JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

Jumeaux numériques HVDC Light® et compatibilité électromagnétique

Des modèles de simulation ABB capables de reproduire fidèlement un poste HVDC Light® et son câblage garantissent des études de compatibilité électromagnétique fiables, dès la conception comme en phases de mise en service et d'exploitation.

Didier Cottet
Bernhard Wunsch
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)

didier.cottet@ch.abb.com
bernhard.wunsch@ch.abb.com

Göran Eriksson
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

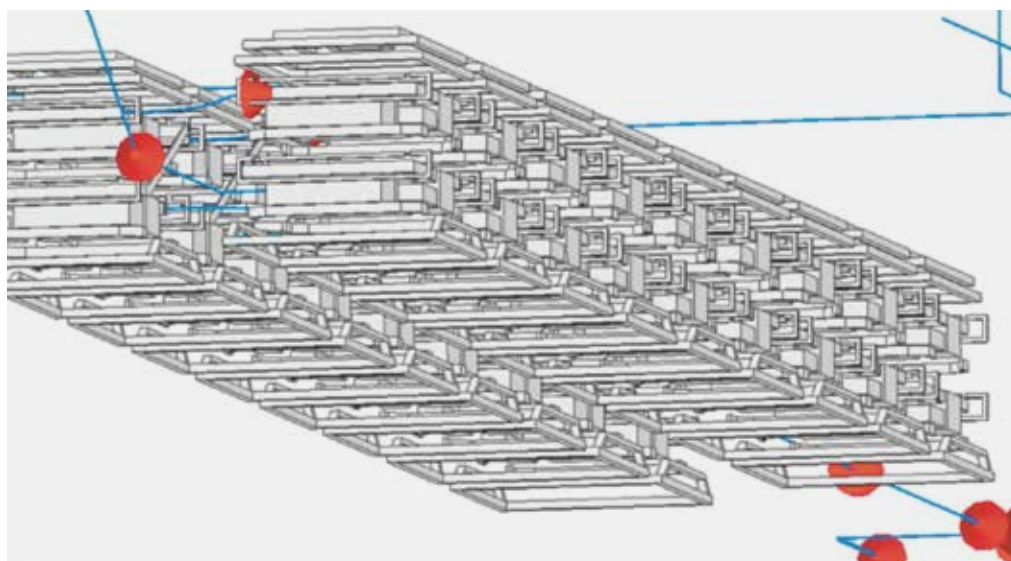
goran.z.eriksson@se.abb.com

Wojciech Piasecki
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

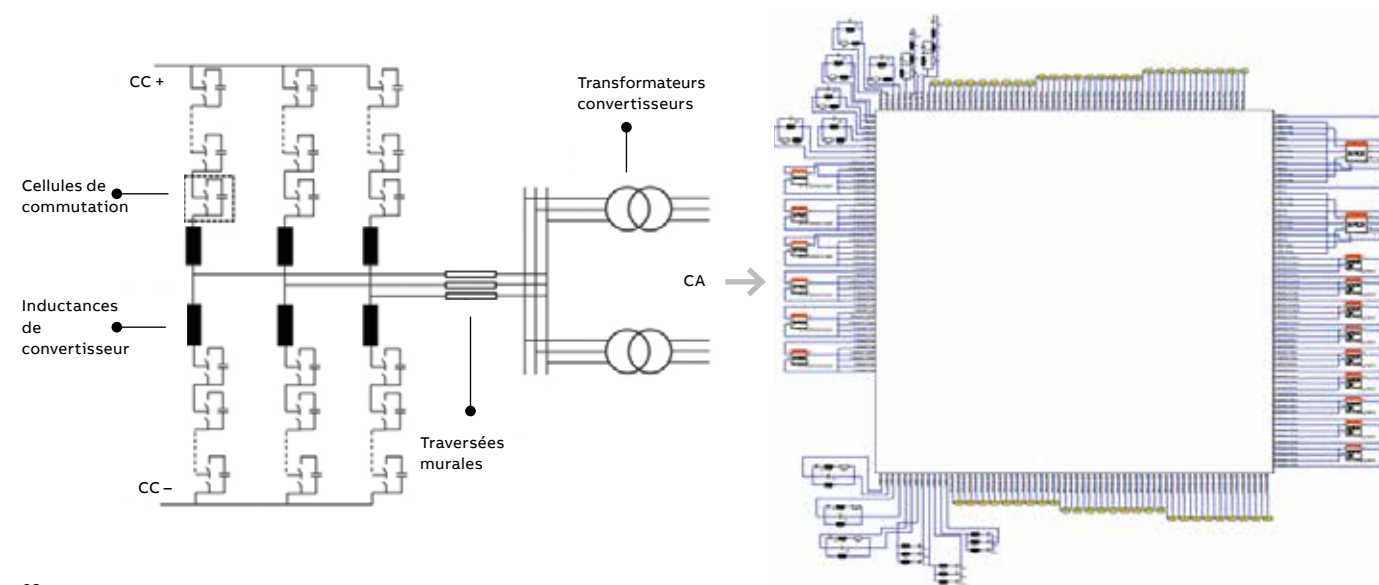
wojciech.piasecki@pl.abb.com

Gustaf Sandberg
Jenny Skansens
ABB Grid Systems, HVDC
Ludvika (Suède)

gustaf.sandberg@se.abb.com
jenny.skansens@se.abb.com



01



02

01 Bâtiment des valves HVDC Light et sa maquette numérique 3D réalisée dans le logiciel CST Microwave Studio

02 Topologie de convertisseur HVDC Light et circuit de son double numérique dans CST

La « compatibilité électromagnétique » (CEM) désigne l'aptitude d'un équipement (électronique sensible, par exemple) à fonctionner dans son environnement électromagnétique sans être perturbé ni parasiter à son tour tout autre équipement électrotechnique ou service radioélectrique situé à proximité ou à une distance donnée. Elle est gage de disponibilité accrue et de coût réduit. Pour évaluer les propriétés d'« immunité » et de « brouillage » électromagnétiques d'un nouveau produit, l'usage est de réaliser un prototype et d'en mesurer le

ABB met les progrès du numérique au service de la conception CEM le plus en amont possible d'un projet de station de conversion HVDC Light®.

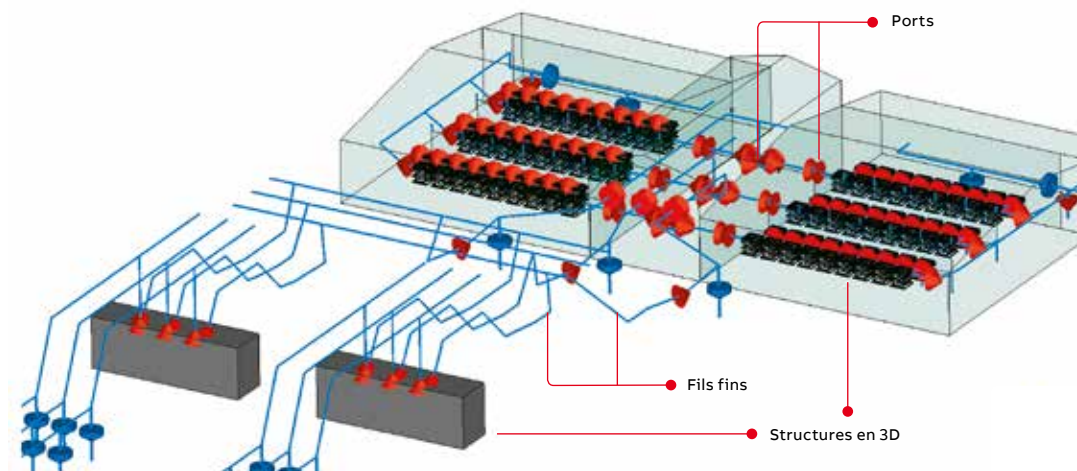
rayonnement dans une chambre anéchoïque ou réverbérante spécialement conçue à cet effet. S'il existe d'immenses installations d'essai CEM capables d'accueillir tout un aéronef, rien de tel n'est prévu pour les stations de conversion HVDC Light ou les appareillages moyenne et haute tension qu'il faut encore tester *in situ*, après mise en service. Une procédure tardive, longue et coûteuse, qui restreint considérablement les possibilités de modifier la conception de l'appareillage si des problèmes CEM surgissent durant la mise en conformité. Qui plus est, le site lui-même n'est pas exempt de perturbations électromagnétiques provenant d'autres sources, qui risquent de fausser les résultats.

Pionnier du transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT) il y a plus de 60 ans, ABB a lancé la technologie HVDC Light en 1997. Aujourd'hui, les liaisons HVDC Light participent à l'essor des énergies renouvelables, avec une capacité de transport atteignant 3000 MW. Toujours en avance sur son temps, ABB met les progrès du numérique au service de la conception CEM le plus en amont possible d'un projet de conversion HVDC Light. Ses modèles de simulation avancée, ou « jumeaux numériques », reproduisent à cette fin tous les équipements de la station : valves, bâtiment des valves, inductances de convertisseur, traversées murales, transformateurs convertisseurs, filtres haute fréquence (HF), câblage des travées CA et CC. Ces doubles électromagnétiques permettent d'effectuer et de fiabiliser un large éventail d'analyses CEM en phases de conception, de mise en service et d'exploitation :

- Impact de la commutation de semi-conducteurs sur les caractéristiques des perturbations HF ;
- Algorithmes de commande et dimensionnement du système (valeurs assignées de courant et de tension de cellule) ;
- Optimisation et positionnement des filtres HF ;
- Variantes de conception et placement des composants, implantation des jeux de barres et des câbles ;
- Efficacité du blindage de la construction.

Maquette numérique 3D

En 2014, ABB a lancé un projet de modélisation de poste CCHT à l'aide du logiciel électromagnétique CST Microwave Studio®. Rompu à l'analyse rapide et précise des composants HF, cet outil numérique du commerce se charge de modéliser en 3D les systèmes, sous-systèmes et composants du poste, y compris les bâtiments et jeux de



03

barres haute tension (HT) →1. Transformateurs de mesure, disjoncteurs et convertisseurs de puissance, topologie des convertisseurs, cellules de commutation, etc. sont ainsi reliés à la maquette 3D dans un schéma dédié qui permet de visualiser en un clin d'œil le détail de modèles complexes →2.

Méthodologie

L'environnement de simulation CST s'inscrit dans un flux de travail systématique, constitué de procédures et outils autorisant la création de modèles de composants (phase de pré-traitement) et l'analyse du résultat de la simulation (post-traitement). Tous les modèles et sous-modèles peuvent ainsi être créés très en amont de la conception, c'est-à-dire bien avant de disposer de

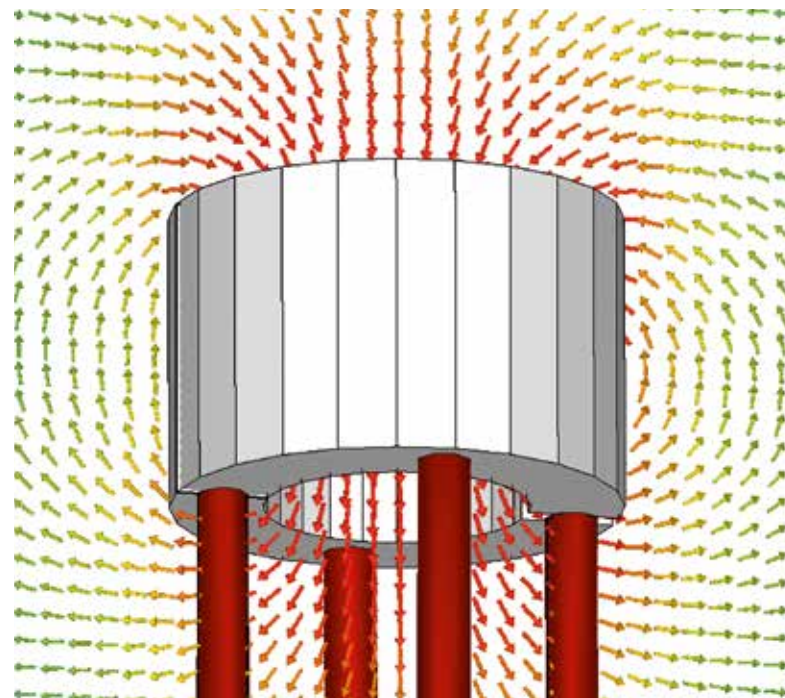
composants « en dur » : un avantage de taille ! Le modèle à l'échelle système de toute la station →3

—
En 2014, ABB a lancé un projet de modélisation de poste CCHT à l'aide du logiciel électromagnétique CST Microwave Studio®.

est excité aux différents endroits où se produit la perturbation HF réelle, par l'injection d'une onde de choc qui fait se propager des courants HF



04a



04b



05a



05b



05c

—
03 Modèle 3D de toute la station dans CST

—
04 Superbe reproduction des impédances haute fréquence d'une inductance dans l'air

04a Inductance

04b Visualisation du résultat de simulation sous forme de champs vectoriels

—
05 Validation du modèle ABB par des mesures HF effectuées sur l'équipement et ses composants

05a Validation d'un transformateur CCHT

05b Mesure d'émissions rayonnées en champ proche (travée CA)

05c Mesure d'émissions rayonnées en champ lointain (à 200 m de la station de conversion)

dans la station. La réponse impulsionnelle de cette simulation temporelle étant transposable dans le domaine fréquentiel, on obtient un spectre de réponse large bande qui peut être capté en plusieurs points d'observation (sondes de champ électromagnétique et sondes de courant, par exemple). Il est ensuite possible de combiner ces réponses aux formes d'onde réelles de commutation des convertisseurs et de les traiter avec un modèle de récepteur CEM. Les résultats sont directement comparables aux valeurs obtenues par des mesures de rayonnement électromagnétique dans un poste existant.

—
ABB a effectué des mesures HF poussées aux niveaux composant et système, qui ont validé les résultats de simulation.

ABB utilise un solveur de matrice de ligne de transport, dont les propriétés spécifiques se prêtent parfaitement à ce cas de simulation. Les modèles 3D combinent structures tridimensionnelles et « fils fins », de sections bien plus petites que la taille de la maille de calcul élémentaire →3. Autre plus : la définition de limites de composants (ouvertures, fentes, etc.) pour simuler efficacement le blindage des enceintes et différents types de parois de bâtiments des valves généralement installés par les énergéticiens.

Enfin, il est possible d'ajouter au modèle 3D des circuits à constantes localisées là où des sous-modèles circuit de composants plus complexes sont raccordés via des ports définis par l'utilisateur. On peut alors connecter ces éléments aux longues listes de composants (*netlists*). En combinant plusieurs types de représentation des spécificités du système, la simulation perd de sa complexité pour gagner en vitesse d'exécution.

Reste qu'un puissant outil de simulation doit reproduire avec précision les impédances HF des composants CA et CC de la station (inductances des convertisseurs →4, transformateurs convertisseurs, traversées murales, transformateurs de mesure, entre autres). D'où l'intérêt de disposer d'informations approfondies sur la modélisation système et composant [1,2].

Validation ABB

Pour influencer la réalisation d'un produit, la modélisation avancée s'appuie sur des mesures physiques. ABB a ainsi effectué des mesures HF poussées aux niveaux composant et système →5a, qui valident les résultats de simulation et confirment la justesse du jumeau numérique. Pour les perturbations HF en champ proche (travée CA, à proximité du convertisseur CCHT) →5b comme en champ lointain (à 200 m de distance) →5c, la mesure et la simulation s'accordent parfaitement pour prédire les valeurs crêtes critiques →6,7.

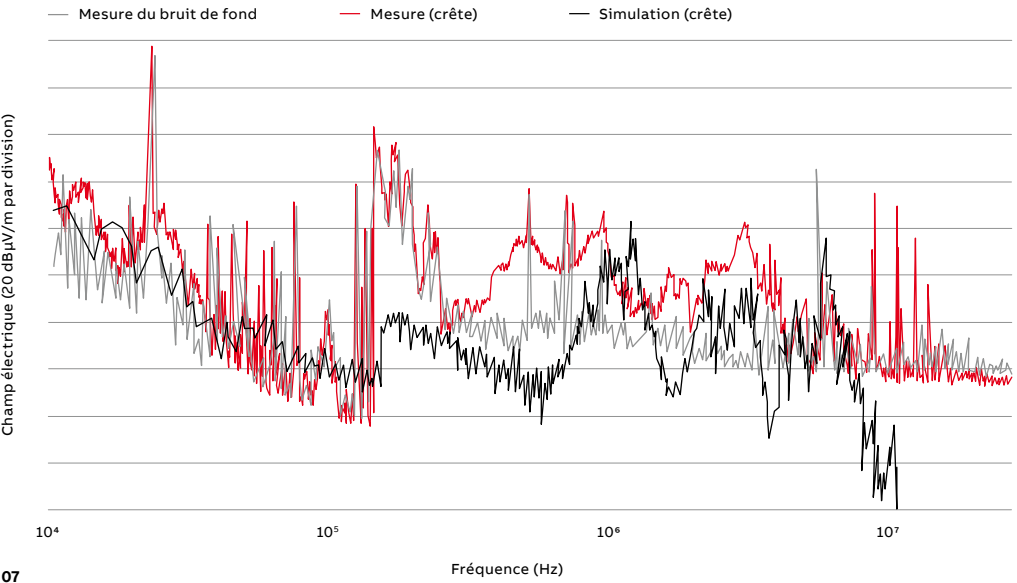
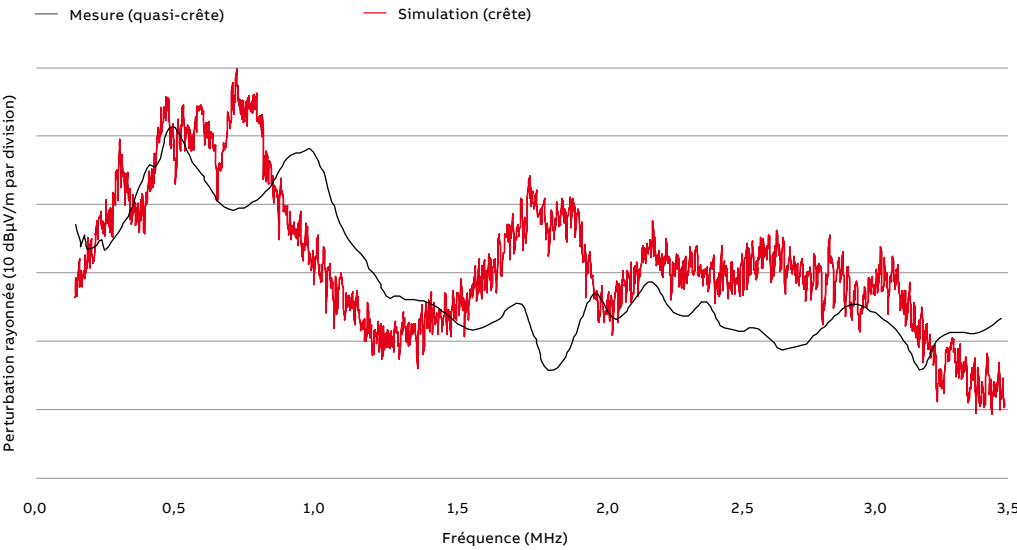
Avantages

L'étude et la performance de la CEM sont assujetties à une multitude de paramètres système. ABB ne se contente pas de lever toutes ces contraintes, mais améliore la compatibilité électromagnétique. Modélisation et simulation permettent de faire des choix de conception CEM fondamentaux, le plus tôt possible : un parti pris de l'optimisation anticipée qui fait chuter les coûts et les temps d'indisponibilité, épargnant à l'énergéticien les vicissitudes des modifications réalisées après les incontournables mesures sur site et, dans la mesure du possible, les coûteux arrêts de production pour reconstruire.

Champs d'application

Sachant qu'une étude CEM doit englober les filtres, les caractéristiques du blindage et de la commutation, l'agencement du poste, la conception de l'appareillage et le système de mise à la terre, entre autres, ABB a appliqué des modèles de simulation à ces différents produits, processus et systèmes pour en améliorer la disponibilité et la fiabilité.

Des modèles très proches de la réalité physique d'un matériel ou d'un site facilitent et accélèrent la prise de décision, au bénéfice de l'entreprise.



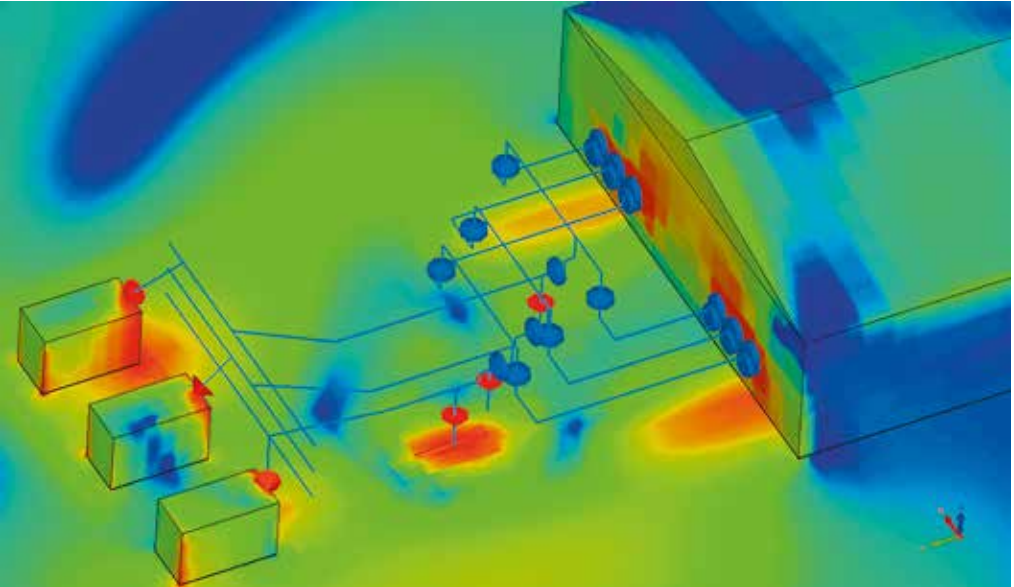
—
06 Comparaison mesures en champ proche/simulations

—
07 Comparaison mesures en champ lointain/simulations avec prise en compte du bruit de fond

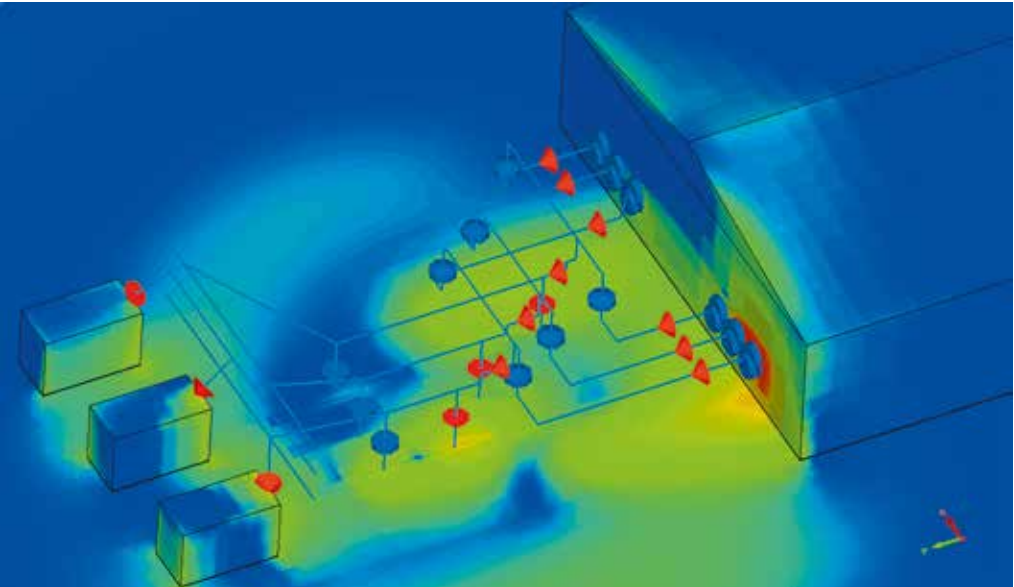
—
08 Distribution des champs magnétiques dans une station de conversion CCHT

08a Avant optimisation du filtre HF

08b Après optimisation du filtre HF



08a



08b

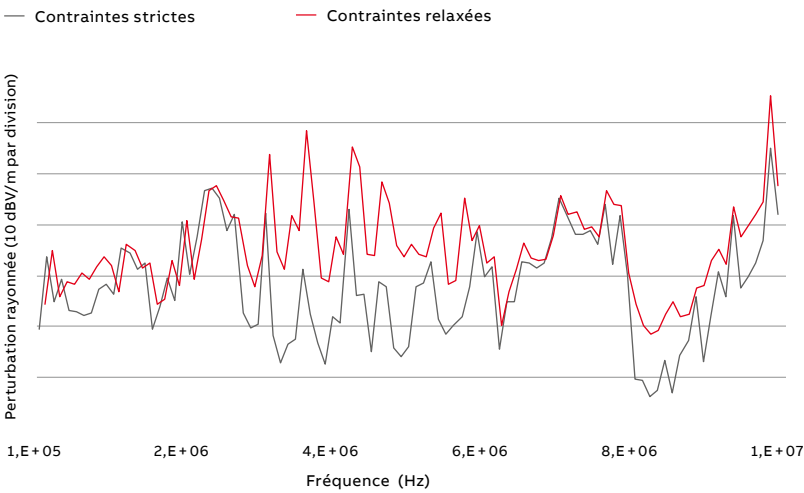
Filtres CEM

Le succès d'un produit dépend souvent de la vitesse à laquelle il est mis sur le marché. Les filtres CEM jouent ici un rôle capital car leur conception optimisée permet de gagner en temps de certification et en coûts de production. Les ingénieurs ABB ont travaillé sur deux fronts : le filtre lui-même et son implantation dans une station de conversion CCHT. Ils ont pour cela comparé le champ magnétique simulé à 5 MHz d'un filtre conçu sans outil 3D → 8a à celui d'un filtre optimisé par modélisation 3D ; sans surprise, la seconde solution a montré une nette contraction de l'amplitude de champ → 8b. Des réductions similaires du niveau de champ sur toute la gamme de fréquences étudiée ont corroboré cet excellent résultat. Il est même un cas d'emploi où le modèle de simulation 3D a fait fondre les coûts et grimper les performances. Le filtre optimisé par la modélisation avancée d'ABB fonctionne mieux et

coûte potentiellement moins cher. Autre point fort : le niveau de détail autorisé par la simulation 3D permet de reconnaître les problèmes de CEM à venir et donc de prédire la performance.

ABB a beaucoup cherché à optimiser la conception des filtres CEM, qui conditionne la réussite d'un produit.

À une époque où les offres, nouveautés et projets s'enchaînent à un rythme effréné, la décision d'innover ne souffre aucun délai. Des modèles très proches de la réalité physique d'un produit ou d'un site facilitent et accélèrent la prise de décision, au bénéfice de l'entreprise.



09

Une conception de bâtiment et une installation sur site anticipées, correctement exécutées et efficaces sont créatrices de valeur. Le blindage est à cet égard primordial. La construction doit empêcher les puissantes ondes émanant directement de la structure des valves de se propager à l'extérieur. Certes, il n'y a pas de station de conversion CCHT sans traversées, portes, aérations, etc., mais tous ces éléments créent autant d'ouvertures dans l'enceinte CEM ou la cage de Faraday, qui amenuisent l'efficacité du blindage. Pire, par souci de commodité et d'esthétisme, les bardages métalliques et leur revêtement de surface sont normalement démunis de contact électrique. De même, le percement d'une petite ouverture, ne serait-ce qu'un fenestron, peut littéralement éroder l'efficacité du blindage d'un bâtiment au demeurant parfaitement conçu et performant. À l'heure actuelle, les modèles de simulation 3D constituent le meilleur moyen d'optimiser en amont les exigences de blindage et de les traduire en détails pratiques, réduisant le risque de modifications a posteriori sur site, longues et coûteuses. Ces exigences peuvent aussi beaucoup influencer sur les perturbations rayonnées.

ABB a donc exécuté deux simulations de blindage du bâtiment des valves : la première sous

contraintes strictes, la seconde sous contraintes relaxées →9. La distance entre vis fournit la liaison électrique entre bardages →10. De strictes exigences de blindage se traduisent par une nette réduction de cette distance. Les écarts les plus importants se situent au-dessus d'un seuil de fréquence avoisinant 2–3 MHz. Ces résultats, associés à un bilan CEM et à une connaissance approfondie de la susceptibilité électromagnétique des équipements situés à proximité du poste, éclairent la prise de décision des énergéticiens sur les exigences de blindage.

—
Les modèles de simulation 3D sont le meilleur moyen d'optimiser en amont les exigences de blindage, réduisant le risque de modifications longues et coûteuses sur le site.

Si ces exemples de modélisation CEM sont tirés d'applications CCHT, la même méthodologie peut rapidement s'appliquer à d'autres solutions ABB en moyenne et haute tension, comme les systèmes de

—
09 Mesure par ABB de l'impact des rayonnements électromagnétiques sur le blindage d'un bâtiment des valves, avec comparaison des perturbations rayonnées sous contraintes strictes/relaxées

—
10 Distance entre vis (flèches blanches) assurant la connexion électrique d'un bardage, variable selon la réglementation

transport flexible en courant alternatif FACTS, SVC Light® et Rail SFC Light®. Innovateur de longue date dans le secteur de l'énergie, ABB poursuit sa démarche d'amélioration continue en vue d'optimiser la création, la réalisation et l'évolution de ses produits, comme en témoigne le jumeau numérique HVDC Light. Le Groupe n'a de cesse de perfectionner la CEM des ouvrages et systèmes électriques. Allonger le temps d'utilisation d'un poste en améliorant la disponibilité et la fiabilité des éléments critiques susceptibles de dégrader la tenue aux perturbations électromagnétiques n'est qu'un exemple de son engagement aux côtés de ses clients. •

Remerciements

Cet article n'aurait pas été possible sans les idées, les contributions et le dévouement de tous les membres de l'équipe et des participants au projet. Les auteurs tiennent également à remercier Filip Grecki, Arne Schröder, Pawel Kryczynski, Szymon Piela, Magdalena Ostrogorska, Celine Tigga et Olof Andersson.

—
Bibliographie

[1] Cottet, D., Eriksson, G., Ostrogorska, M., Skansens, J., Wunsch, M., Grecki, F., Piasecki, W., Andersson, O., « Electromagnetic modeling of high voltage multi-level converter substations », *Asia-Pacific International EMC Symposium*, Singapour, 14–17 mai 2018.

[2] Wunsch, B., Cottet, D., Eriksson, G., « Broadband models of high voltage power transformers and their use in EMC system simulations of high voltage substations », *Asia-Pacific International EMC Symposium*, Singapour, 14–17 mai 2018.



10

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

Gérer la performance des actifs solaires avec l'analytique connectée

ABB a récemment mené plusieurs projets de recherche axés sur le concept de jumeau numérique et son application à la gestion des performances d'actifs industriels récents ou anciens. Ces outils sont aujourd'hui mis en production et déployés en interne ainsi que chez des clients ABB.

—
Karen Smiley
Xiao Qu
Travis Galoppo
K. Eric Harper
Alok Kucheria
Mithun P. Acharya
Frank Tarzanin
ABB Corporate Research
Raleigh (Caroline du Nord, États-Unis)

karen.smiley@us.abb.com
xiao.qu@us.abb.com
travis.galoppo@us.abb.com
eric.e.harper@us.abb.com
alok.kucheria@us.abb.com
mithun.acharya@us.abb.com
frank.tarzanin@us.abb.com

Cet article met en lumière certains aspects et apports de la recherche ABB sur l'emploi de jumeaux numériques pour améliorer la gestion des performances de production. Dans un premier temps, nous aborderons la démarche « agile », qui vise à accélérer la création d'outils pour analyser l'état fonctionnel et la performance de nouveaux dispositifs ou matériaux ne disposant pas encore d'historique de surveillance, d'exploitation ou d'environnement.

—
Les jumeaux numériques créent de la valeur à plusieurs stades du cycle de vie produit : planification, déploiement, exploitation et maintenance.

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons à une initiative en cours qui prend appui sur des données historiques des onduleurs et centrales solaires, collectées en masse dans le cloud, pour créer de nouveaux outils d'analyse de la corrélation événement-météo, mais aussi de comparaison des performances, de prévision et d'informatique décisionnelle. Ces solutions sont aujourd'hui mises en production et déployées en interne ainsi que chez des clients ABB.

Gestion des performances d'actifs (GPA)

La capacité à conserver ses équipements à longue durée de vie en parfait état de marche et à en

comprendre et optimiser les performances est pour beaucoup dans la réussite d'une activité industrielle. Les sciences et techniques de l'analyse, ou « analytique », contribuent de plus en plus à cet objectif. Une GPA active permet aux clients de mieux cerner l'état de santé et les performances des actifs de l'entreprise. Cette prise de conscience aide à passer d'une maintenance réactive coûteuse à une stratégie de gestion prédictive des risques qui maximise la performance et le rendement de l'actif net (RAN). S'il existe bien des façons de quantifier l'état de santé d'un équipement, les algorithmes se limitent pour la plupart à deux indicateurs clés : le risque de défaillance et la durée de vie résiduelle. Or ces marqueurs ne permettent pas à eux seuls de repérer une dégradation des performances préjudiciable à la production et au RAN, phénomène qui précède généralement de beaucoup l'apparition d'une défaillance réelle ou la fin de vie de l'équipement. Pour être exhaustive, une GPA requiert donc des outils d'analyse à même de quantifier aussi bien les gains que les pertes de productivité.

La GPA voit double

Qui dit actifs connectés implique une démarche coordonnée mariant technologies opérationnelles et informatiques. Les jumeaux numériques qui mêlent ces deux grandes catégories de données sont des répliques virtuelles d'objets physiques permettant de bâtir des modèles d'équipement. Nul besoin d'en faire des « clones » ; ce sont de simples doublons chargés de reproduire les comportements les plus pertinents des actifs étudiés. Ils peuvent ainsi faciliter et accélérer



01

—
01 L'analytique basée sur le jumeau numérique permet d'anticiper très tôt une baisse progressive ou brutale de rendement, grâce à une gestion de l'état opérationnel et de la performance des actifs qui exploite toute la masse de données disponibles.

la construction de modèles analytiques capables d'intégrer les métadonnées et données opérationnelles (télémessures, événements, par exemple) de l'équipement à ses données environnementales (météo, irradiation solaire, éclairage, conditions d'exploitation, etc.) en vue de caractériser et de gérer la performance à l'échelle du dispositif ou du site tout entier. Ces doubles numériques créent de la valeur à plusieurs stades du cycle de vie produit : planification, déploiement, exploitation et maintenance. L'un de leurs atouts maîtres réside dans l'exploration sûre et non intrusive d'hypothèses et de scénarios fictifs, comme par exemple simuler l'incidence des réglages du mode opératoire ou de la production sur les équipements et le système.

Des performances au soleil

Les énergies renouvelables progressent dans le monde entier pour répondre au besoin d'une alimentation électrique fiable et pérenne.

Depuis plus de 13 ans, ABB conçoit et fabrique une vaste gamme d'onduleurs solaires photovoltaïques (PV) destinés aux marchés résidentiel, tertiaire et

—
L'un des atouts du jumeau numérique réside dans l'étude sûre et non intrusive d'hypothèses, comme simuler les conséquences de réglages de la production sur les équipements et le système.

industriel, ainsi qu'aux microréseaux [1]. En 2017, son parc mondial représentait plus de 26 gigawatts. Pour accompagner l'essor de l'analytique connectée dans ce domaine, les onduleurs PV gagnent en intelligence et en facilité d'intégration aux environnements complexes et évolués →1.



02

La plate-forme ABB Ability™ Aurora Vision [2] est la nouvelle solution de gestion et de surveillance centralisées d'installations PV →2. Hébergée dans le cloud, elle collecte automatiquement les données remontées des onduleurs et autres matériels PV, et offre un accès temps réel, hautement interactif, aux performances clés et mesures opérationnelles pour optimiser le rendement et l'alignement des décisions avec les objectifs commerciaux. Les données recueillies au cours des 13 dernières années portent sur plus de 250 000 équipements de centrales PV dans le monde →4.

Panneaux, onduleurs, compteurs, stations météo, unités de stockage d'énergie, centrale, réseau électrique : tout peut être modélisé à l'aide de jumeaux numériques donnant accès aux mesures, estimations et résultats analytiques basés sur une fine compréhension des phénomènes physiques en jeu, des techniques sous-jacentes et des retours d'expérience.

Comprendre

Il est aujourd'hui primordial de prédire le comportement des actifs, la production, les événements, le risque de défaillance, la durée de vie résiduelle, etc., pour comprendre l'état réel d'un équipement et déterminer la meilleure façon de maximiser sa valeur. Trois critères sont ici indissociables : la dégradation, le risque de défaillance et la durée de vie résiduelle →3. En effet, la dégradation physique ou logique d'un actif accroît le risque de défaillance tout en érodant sa durée de vie résiduelle ; elle peut être atténuée par des actions de maintenance visant à doper la production et la performance, en amont de la défaillance ou de la fin de vie.

Le jumeau numérique permet ainsi d'analyser les données de l'actif pour caractériser sa production, son état et sa dégradation, mais aussi estimer sa durée de vie résiduelle, quantifier le risque de défaillance et, enfin, évaluer l'impact potentiel de la maintenance sur ce triangle des contraintes. L'analytique peut être utilisée en prédictif pour anticiper les décisions de maintenance préventive ou en descriptif pour éclaircir et affiner la compréhension des défaillances passées.

Classer les algorithmes

Pour faciliter le choix de la démarche analytique en fonction des données disponibles, les algorithmes afférents à chacun des critères ont été regroupés sous plusieurs rubriques : par exemple, « Suivi de défaillance », « Surveillance des symptômes » et « Rapport de détection d'erreurs » pour la prédiction de défaillance →5 ; « Observation directe », « Observation indirecte » et « Apprentissage automatique » pour la durée de vie résiduelle →6. Bien d'autres types d'algorithmes analytiques, notamment prédictifs, peuvent avoir leur utilité : citons la détection d'anomalie, capitale pour enrichir les modèles de prédiction de défaillance, ainsi que la prévision, indispensable à la gestion proactive de la charge des actifs. Ces algorithmes font aussi l'objet d'un classement.

L'analytique peut être utilisée en prédictif pour anticiper les décisions de maintenance préventive ou en descriptif pour éclaircir et affiner la compréhension des défaillances passées.

Classer et affecter les données

Pour bien s'exécuter, ces algorithmes ont besoin de types, de volumes et de variétés de données appropriés. Une résolution temporelle insuffisante des données événementielles ou métriques, par exemple, peut interdire certains algorithmes de calcul du risque de défaillance basés sur la détection précoce d'anomalie. L'évaluation de la

— 02 Application de gestion et de visualisation de centrale solaire ABB Ability Aurora Vision sur tablette et mobile

— 03 Triangle des interactions dégradation/risque de défaillance/durée de vie résiduelle et impact sur la maintenance

disponibilité et de la pertinence des données pour un processus analytique peut beaucoup éclairer le choix des algorithmes à mettre en œuvre. Le graphe →7 illustre un exemple d'outil développé par ABB pour caractériser la disponibilité des données par rapport aux exigences d'une classe d'algorithmes analytiques. Comprendre ces imbrications optimise le développement de nouveaux processus analytiques d'actifs avec une agilité et une itération qui maximisent l'apport des données disponibles. La collaboration analytique a aussi recensé plusieurs stratégies d'imputation des données pour traiter des valeurs manquantes et a emprunté à des expériences de prévision précédentes qui s'appuyaient sur des réseaux de neurones. Ces méthodes viennent combler certaines lacunes dues au manque d'exhaustivité ou à la qualité limitée des données, qui entravent le développement de nouveaux algorithmes d'analyse, de suivi d'état et de gestion des performances d'actifs.

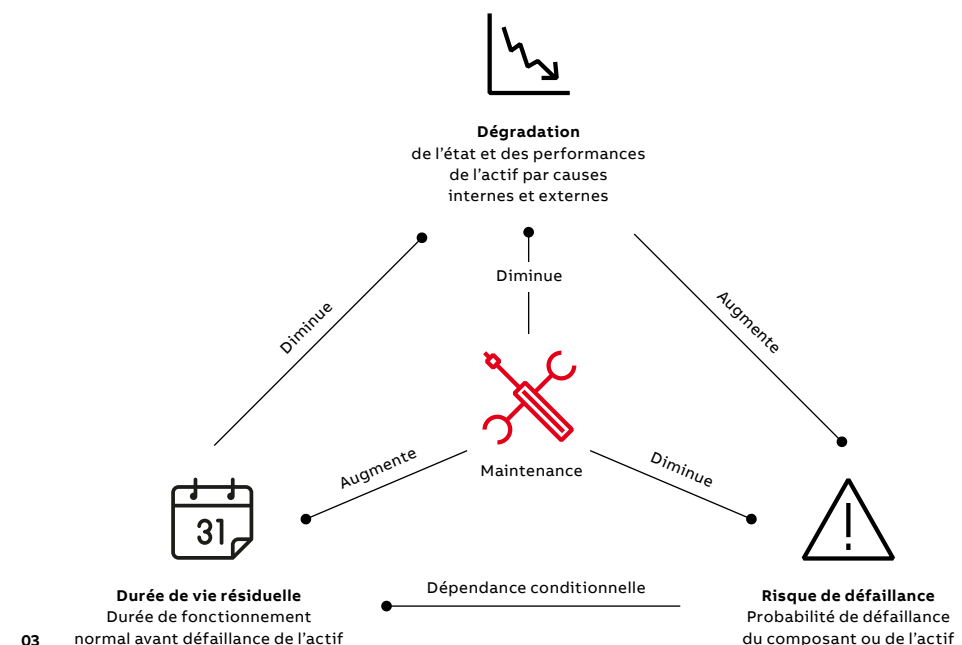
Analyser dans le nuage

L'identification et le croisement de nombreux types complémentaires de données ont beaucoup bénéficié à la création de jumeaux numériques utiles aux onduleurs et centrales PV. La plate-forme Aurora Vision a d'ores et déjà fourni un gros volume de métadonnées sur les installations solaires et leurs équipements, ainsi que des télémesures et des événements envoyés en continu dans le cloud [3]. Certaines centrales abritent également des stations qui enregistrent sur place la météo et l'irradiation solaire. Ces informations locales sont enrichies de données climatiques et de mesures d'éclairement et d'irradiation relevées par des sources hors site [4–6] ; une seule d'entre elles a suffi pour fournir les données pertinentes de 50 % des installations PV dépourvues de stations météo.

Des compléments textuels, numériques et plus détaillés ont également été rapatriés d'autres systèmes internes et externes à ABB [7]. L'inclusion de textes libres fait intervenir le traitement du langage naturel pour mieux interpréter les séquences d'événements rapportés par les clients ou automatiquement consignés par Aurora Vision. Ces informations, combinées aux télémesures et alarmes, ont permis aux nouveaux outils analytiques de comparer et de prédire les performances des onduleurs, donc de mieux saisir l'impact des conditions ambiantes sur la fiabilité, la disponibilité et le rendement de l'installation. De même, ce jumeau numérique « augmenté »

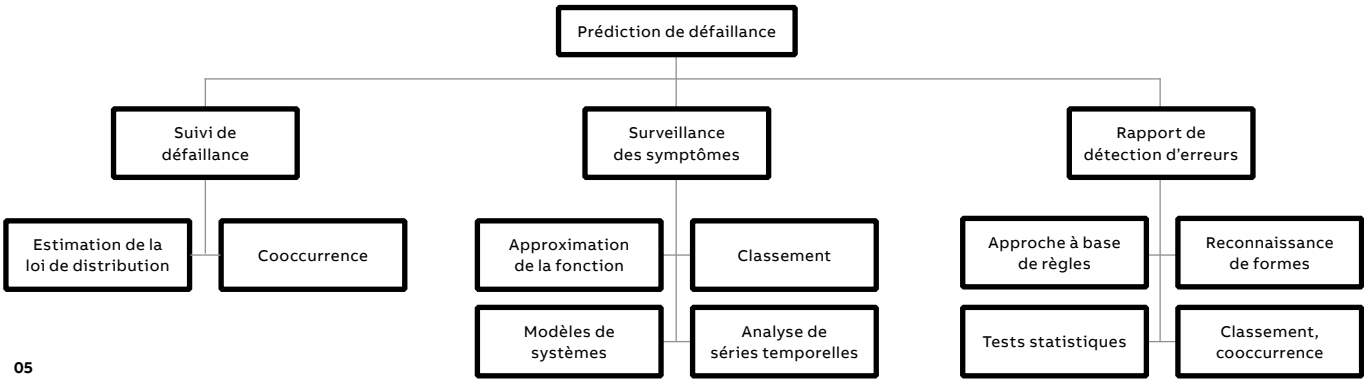
L'identification et le croisement de nombreux types complémentaires de données ont beaucoup bénéficié à la création de jumeaux numériques pour onduleurs et centrales PV.

a contribué à la mise en œuvre de nouveaux processus analytiques détaillant les performances de l'équipement. En croisant par exemple les modes de défaillance remontés du terrain et les télémesures et alarmes du système (température, météo, etc.), ABB a pu corrélérer les différentes catégories de défaillances de composants aux signaux observés sur le site, avant la panne. Cette « intelligence » fournit les signaux annonciateurs d'un dysfonctionnement ou prédit le franchissement d'un seuil de défaillance.





04



05

— 04 Certaines centrales PV abritent des stations qui enregistrent la météo et l'irradiation solaire.

— 05 Classification des algorithmes de risque de défaillance

— 06 Classification des algorithmes de durée de vie résiduelle

Le jumeau numérique « augmenté » permet de nouveaux traitements analytiques détaillant toujours plus les performances de l'équipement.

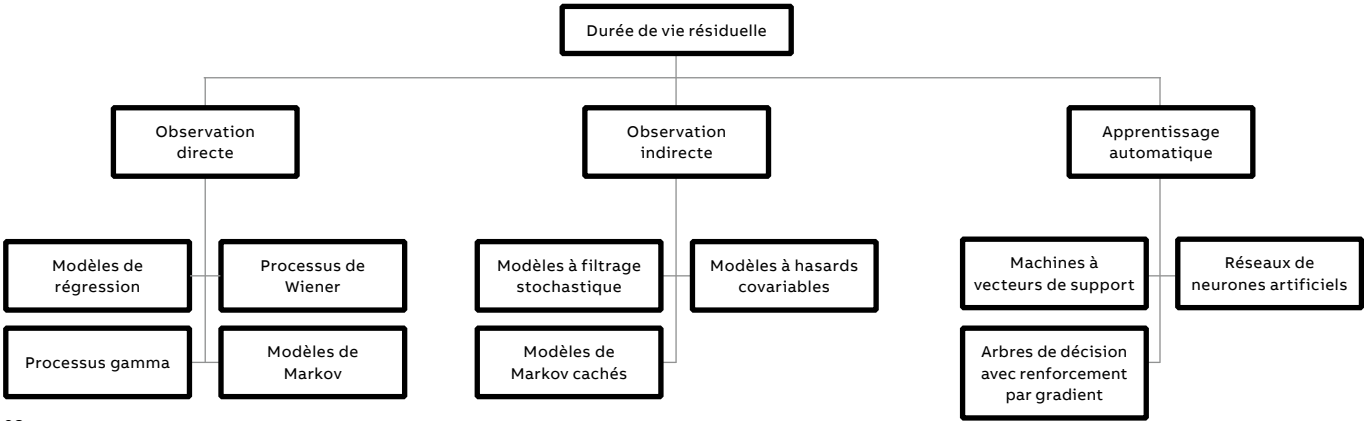
Analyser pour agir
Le rapprochement de ces données diversifiées amplifie et dope l'analyse de la performance. Les données météo des sources hors site, par exemple, renforcent la détection d'anomalie à partir des relevés des stations sur site. Le graphe →8 compare sur un an les mesures d'irradiation solaire journalière d'une station météo locale à celles d'un capteur distant. Cette analyse améliore la précision des outils analytiques dans le cloud, en périphérie de réseau ou hybrides, qui se nourrissent de relevés météo pour évaluer et prédire la production d'énergie des onduleurs. Elle permet à son tour de mieux déceler une baisse progressive ou soudaine de rendement des panneaux ou onduleurs, qui menace de dégrader toute la production PV.

Ces informations guident efficacement les exploitants ou techniciens de maintenance des centrales solaires dans l'évaluation du risque de défaillance et de la durée de vie résiduelle,

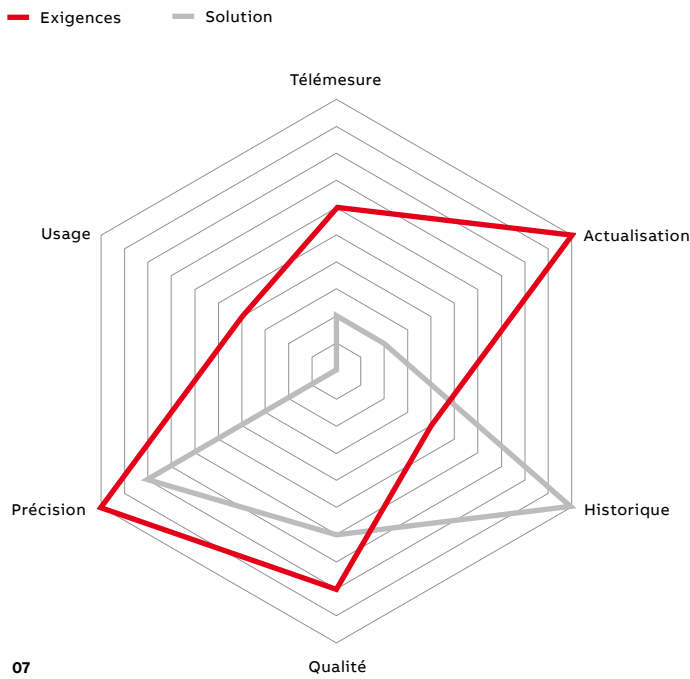
et dans la prise de décisions opérationnelles. À court terme, il peut s'agir d'anticiper les conséquences d'une intempérie et, à plus longue échéance, d'équiper la centrale de protections contre la foudre, ou encore de peaufiner les plans d'investissement et de maintenance.

Visualiser les données
L'analyse visuelle fait appel à des outils d'informatique décisionnelle en libre-service pour illustrer métadonnées, télémessures, événements, etc., à l'aide de courbes, cartes et autres graphes. Ils permettent de fusionner automatiquement, par l'intermédiaire de champs communs, de multiples sources et types de données. Des filtres et choix interactifs adaptent aisément l'information aux besoins et règles métier, et toutes les sélections appliquées à un graphe se répercutent en temps réel sur les autres affichages. Ces fonctions permettent aux propriétaires et exploitants de centrales solaires de visualiser les anomalies et d'en explorer efficacement les détails.

Des bénéfices concrets
Ce travail collaboratif a débouché sur un grand nombre de réalisations : nouveaux algorithmes d'amélioration comparative et de prévision des performances et de la fiabilité des onduleurs ;



06



07

prototypes d'applications d'analytique visuelle en libre-service ; algorithmes périphériques pour estimer en temps réel la puissance d'entrée CC et de sortie CA ; outils de diagnostic automatisé pour la maintenance (analyse des événements, télémétrie et correspondance avec le client en texte libre) ; nouveaux indicateurs de performance aidant les clients d'ABB à mieux comprendre et tirer profit de leur parc PV. Ce projet a aussi montré l'importance d'une synergie entre une architecture analytique dans le cloud et la plate-forme ABB Ability qui sait pleinement exploiter les compléments de données internes et externes. Les données sur l'environnement de l'équipement contribuent également à cette valeur ajoutée.

Tout cela fait désormais partie intégrante de l'offre de solutions ABB de suivi, de gestion et d'optimisation des performances d'actifs PV.

En détectant précocement les défaillances, l'analytique raccourcit les délais d'intervention ou d'acquisition et d'installation d'un équipement de rechange.

Pour illustrer l'apport de l'analytique, voyons l'exemple d'une centrale solaire industrielle équipée de 10 onduleurs TRIO de 60 kW. Une analyse basée sur un jumeau numérique est à même de détecter la dégradation progressive ou brutale, suite à une intempérie, des performances de la centrale, et de prévenir ainsi une perte de production qui sinon passerait inaperçue et resterait sans remède des jours ou des semaines durant. La défaillance inopinée d'un seul onduleur se traduit par une perte de puissance d'environ 10 % qui expose l'exploitant au risque de pénalités pour non-respect de ses engagements contractuels de production renouvelable. En prédisant très tôt ces dysfonctionnements, l'analytique raccourcit les délais d'intervention et, si nécessaire, d'acquisition et d'installation d'un équipement de remplacement ou des bonnes pièces de rechange. Les bénéfices financiers, variables selon la situation, se chiffrent selon plusieurs critères : nombre de jours d'approvisionnement, disponibilité sur site des pièces de rechange et des composants les plus susceptibles de lâcher (réduction des déplacements), montant des pénalités réglementaires, prix de l'électricité dans la région, etc.

07 Graphe en toile d'araignée illustrant la disponibilité des données

08 Détection d'anomalie par comparaison des mesures d'irradiation journalière globale réalisées sur site et hors site

En l'absence d'historiques, l'analytique agile et ses classes d'algorithmes et de données accélèrent la création de jumeaux numériques.

Plus les données sont abondantes et variées, meilleur est le résultat. Mais ce foisonnement a un coût : l'instrumentation ainsi que la collecte, le stockage et la transmission des données pèsent sur le budget d'investissement et de fonctionnement. Quand les historiques font défaut, l'analytique agile, avec ses classes d'algorithmes et de données, permet d'accélérer la création de jumeaux numériques pour ces nouveaux types d'actifs industriels dans un système GPA. Ces outils étaient

également les analyses coûts-bénéfices des stratégies analytiques proposées pour les toutes dernières générations d'équipements.

En somme, le jumeau numérique dédié à la gestion des performances et son cortège de ressources et d'outils analytiques sont une manne pour les exploitants de centrales PV ! •

Remerciements
Les auteurs tiennent à remercier James Ottewill, Marcin Firla, David Cox, Karl Severin, Imtiaz Ahmed, Hang Xu, Melwin Jose et Rohini Kapoor pour leurs précieuses contributions à ce projet. Nos remerciements vont aussi à Filippo Vernia, Emanuele Figliolia, Antonio Rossi, Ronnie Pettersson, Siri Varadan, CJ Parisi et bien d'autres pour leur soutien indéfectible. Sans oublier l'équipe de la suite logicielle ABB Ability Velocity ainsi que les sociétés Earth Networks et The Weather Company qui ont généreusement accepté de partager les compléments d'informations utiles à cette étude.

Bibliographie

[1] Offre Onduleurs solaires ABB, disponible (en anglais) sur : <http://new.abb.com/power-converters-inverters/solar>.

[2] ABB Ability™ Aurora Vision Plant Management Platform, disponible (en anglais) sur : <http://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/monitoring-and-communication/aurora-vision-plant-management-platform>.

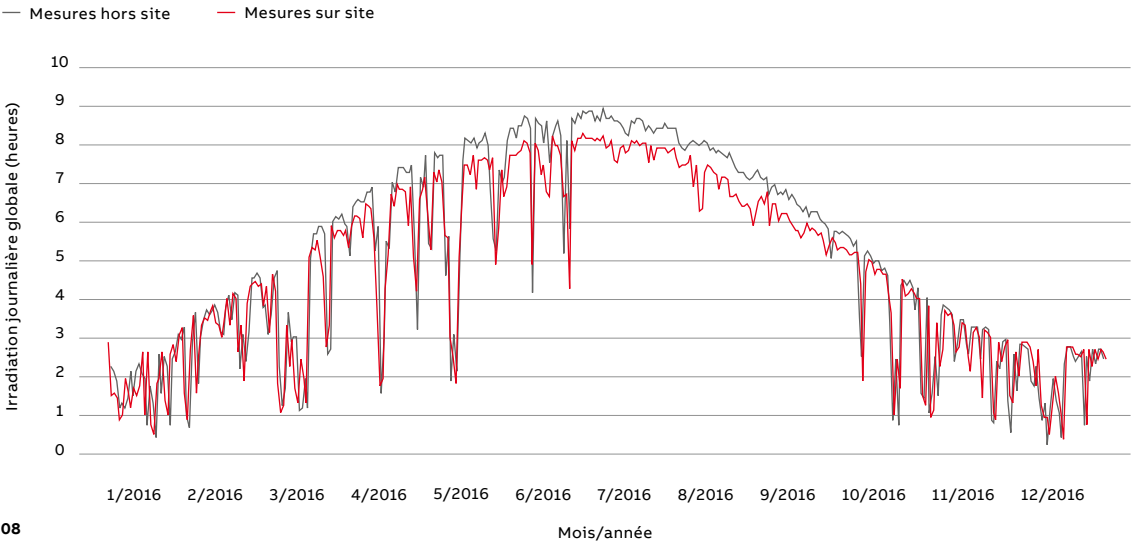
[3] Acharya, M. P., et al., « Des jumeaux numériques en périphérie de réseau pour une IA temps réel », p. 14–19.

[4] Earth Networks, <https://www.earthnetworks.com>.

[5] The Weather Company, <https://www.ibm.com/weather>.

[6] Suite ABB Ability™ Velocity, disponible (en anglais) sur : <http://new.abb.com/enterprise-software/energy-portfolio-management/market-intelligence-services/velocity-suite>.

[7] Salesforce, <https://salesforce.com/fr/?ir=1>.



08

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

La simulation numérique à portée de main

Les puissants outils d'ingénierie assistée par ordinateur et de calcul numérique des écoulements facilitent la tâche des concepteurs et accélèrent la phase de prototypage virtuel. Néanmoins, leur complexité les cantonne aux utilisateurs confirmés. Faisant de l'innovation un puissant levier de démocratisation de la technologie, ABB a mis au point trois plates-formes semi-automatisées pour une modélisation rapide, facile et fiable. Ces nouveaux outils diminuent les coûts de prototypage et décuplent les essais de variantes conceptuelles en un temps raisonnable.

01



Photo fig 01: gorodenkoff, istockphoto.com

01 Le nouveau logiciel de simulation ABB utilise la CFD pour capter les effets de la turbulence, du rayonnement et de la convection naturelle, ainsi que l'incidence des détails géométriques.

02 L'interface du logiciel StudyTrafo d'ABB génère des modèles de simulation à partir de données d'entrée comme les dimensions des organes mécaniques du transformateur : fixations du circuit magnétique et des culasses, cuve et blindage.

Boguslaw Samul
Andrzej Kobierski
Janusz Duc
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

boguslaw.samul@
pl.abb.com
andrzej.kobierski@
pl.abb.com
janusz.duc@pl.abb.com

Jaydeep Deshpande
ABB Power Grids,
Dry Transformers
Raleigh (Caroline du Nord,
États-Unis)

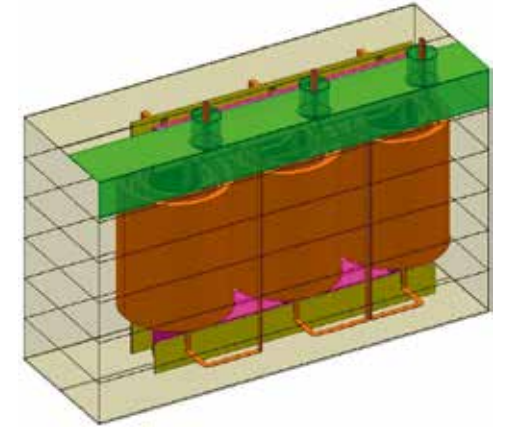
jaydeep.deshpande@
us.abb.com

Jan Westerlund
ABB Motors and
Generators Technology
Helsinki (Finlande)

jan.westerlund@
fi.abb.com

Dietrich Bonmann
ABB Power Grids,
Power Transformers
Bad Honnef (Allemagne)

dietrich.bonmann@
de.abb.com



02

Lorsqu'on envisage de développer un matériel électrique, l'une des premières préoccupations est de réduire les coûts de fabrication et d'exploitation : le fabricant veut gagner en poids, en encombrement et en simplicité, quand le client privilégie la robustesse et la performance à moindre coût. Revient donc aux concepteurs la lourde tâche de satisfaire tout le monde en trouvant pour chaque application un compromis entre ces différents critères, et ce en un minimum de temps !

Ce n'est pas une mince affaire : réduire la taille d'un appareillage se heurte à des facteurs comme les distances électriques (contraintes d'isolement oblige) et la maîtrise thermique. Qui plus est, les essais de validation des propriétés électriques et thermiques sont aussi chronophages que coûteux.

Heureusement, il existe aujourd'hui de puissants outils qui aident les ingénieurs de conception à visualiser, à quantifier et à prédire finement un nombre croissant de caractéristiques matérielles. L'ingénierie assistée par ordinateur (IAO), fondée sur des outils numériques comme la mécanique des fluides (CFD) et la méthode des éléments finis, peut faire chuter les coûts de calcul et les temps d'essai en permettant la création d'une maquette virtuelle de l'appareil et l'analyse de dizaines de configurations dans un temps relativement court →1. La dernière génération de logiciels de simulation et la montée en puissance du calcul haute performance autorisent dorénavant des essais d'équipements complets avec une précision équivalente (à quelques pour cents près) à celle des essais physiques.

Course d'obstacles

Faut-il en conclure que nous en sommes à l'ère du banc d'essai virtuel « zéro défaut » ? Les concepteurs se heurtent encore au coût prohibitif des logiciels et des supercalculateurs, ainsi qu'à des lacunes récurrentes dans la préparation du modèle de simulation et le paramétrage du solveur. Mais les parades existent : des logiciels libres peuvent se substituer à ceux du commerce et des plates-formes de calcul hébergées dans le cloud au calculateur

local. De même, la préparation du modèle et la configuration du solveur sont dans certains cas déléguées à un logiciel spécialisé intégrant des gabarits et des réglages qui n'ont pas besoin d'être modifiés par l'utilisateur. Dans ce contexte évolutif, les ingénieurs peuvent s'appuyer sur une interface conviviale leur proposant plusieurs options en clair et recevoir les résultats sous forme de rapport. Une démocratisation qui met la simulation à la portée de n'importe quel ingénieur généraliste et non plus d'une poignée de numériciens !

Les outils d'ingénierie assistée par ordinateur et de calcul numérique des écoulements par éléments finis réduisent les coûts de développement et les temps d'essai.

Voyons maintenant comment ABB promeut cette évolution créatrice de valeur pour ses clients, avec trois exemples d'outils semi-automatisés mis au point en interne pour faciliter le développement produit.

StudyTrafo

La nécessité de réduire les pertes parasites produites dans les parties métalliques soumises aux champs magnétiques fait de la vérification de la conception et de l'optimisation du blindage deux aspects cruciaux de la fabrication des transformateurs. La préparation des modèles numériques correspondants exige une connaissance approfondie du logiciel de simulation, une grande aptitude à la modélisation 3D et une expérience dans

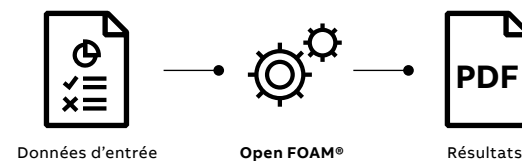
l'interprétation des résultats : des compétences qui sont le lot commun des habitués des suites logicielles, mais pas toujours des concepteurs de matériels électriques ! C'est pour y remédier qu'ABB a développé StudyTrafo, un outil semi-automatisé de prédiction des points chauds, destiné aussi bien aux experts de la simulation qu'aux utilisateurs occasionnels. L'interface StudyTrafo facilite et accélère la création des modèles de simulation.

L'idée est de générer ces derniers en fournissant en entrée les caractéristiques dimensionnelles des éléments mécaniques du transformateur (brides de maintien du circuit magnétique et des culasses, enroulements, cuve et blindage) →2. Les modèles sont construits dans des logiciels de modélisation électromagnétique et thermique du commerce intégrant des primitives 3D (blocs, cylindres, etc.) et des opérations géométriques.

Les conditions aux limites et les paramètres de la simulation leur sont automatiquement attribués. Toutes ces valeurs proviennent de statistiques établies à partir de dizaines d'unités testées et de transformateurs de puissance de toutes tailles fabriqués dans le monde entier par ABB. Les chercheurs ABB ont développé pour ces calculs une bibliothèque de matériaux basée sur des mesures en laboratoire.

StudyTrafo permet aux ingénieurs d'optimiser toute la conception d'un transformateur en une journée.

StudyTrafo est codé en C# et les données d'entrée sont soit saisies manuellement, soit importées directement d'un système de conception, auquel cas la création des modèles est instantanée →4. Le temps de simulation est donc relativement court, ce qui permet aux ingénieurs d'optimiser tout le processus de conception en une journée. Les résultats finaux sont représentés sous forme de tableau affichant la distribution des pertes et les maxima de température.



03

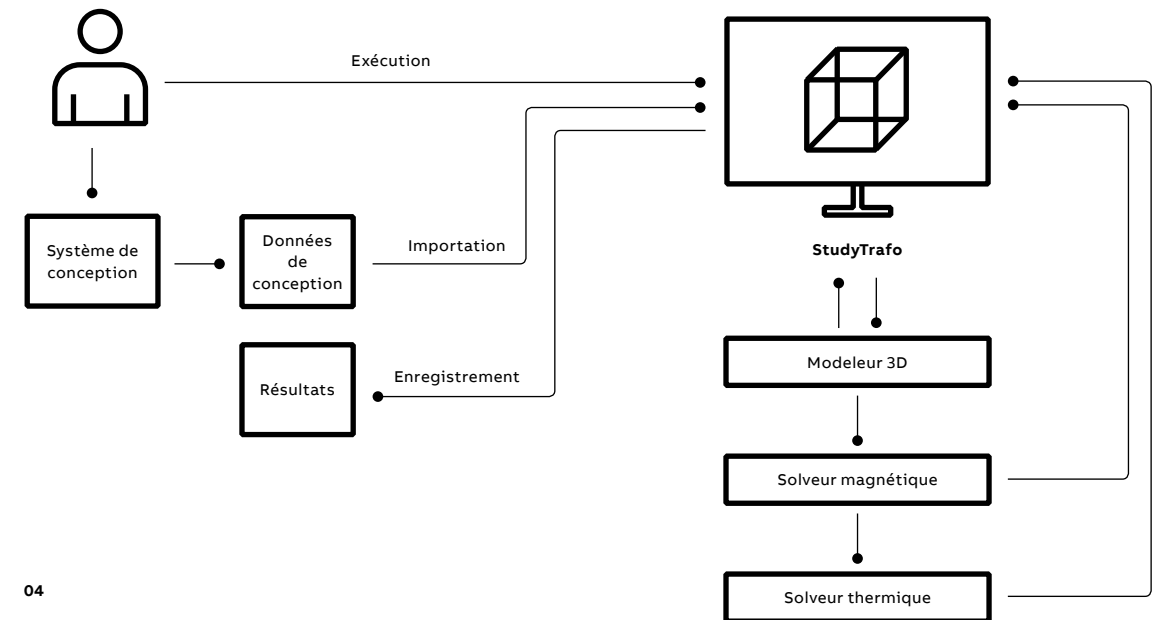
La méthode est pratique et peu coûteuse. Par rapport à d'autres outils de calcul analytique des pertes parasites dans la structure, l'écart-type entre mesure et simulation a été divisé par deux. L'intérêt de la simulation numérique ne se limite pas aux économies de coût et de temps réalisées sur un seul transformateur, mais réside également dans une meilleure compréhension des processus physiques se produisant en fonctionnement. La simulation multiplie les occasions de tester différentes solutions en vue d'améliorer la conception pour réduire les pertes et accroître la performance.

Simulation numérique de moteurs électriques

Le logiciel de simulation expérimentale des écoulements dans les moteurs électriques MCCU-CFD →5 est un outil semi-automatisé qui fait partie intégrante de la commande multiphysique en cascade MCCU (Multiphysics Cascaded Controlling Unit) d'ABB. L'objectif est de piloter et d'automatiser plusieurs phénomènes physiques de natures différentes, couramment mis en jeu dans l'étude du fonctionnement d'un moteur. Plus précisément, il s'agit d'analyser l'influence des modifications dimensionnelles ou opérationnelles du moteur sur ses performances approchées.

MCCU regroupe une panoplie d'outils accessibles depuis une page web, qui permettent aux ingénieurs de recherche-développement d'automatiser la préparation de simulations CFD complètes à partir d'un jeu prédéfini de paramètres. La simulation du moteur se fait alors en un clic ! Les données d'entrée (encombrement et paramètres de fonctionnement du moteur) sont fournies par l'environnement de conception ADEPT.

MCCU-CFD génère un modèle 3D représentatif du moteur, qui se prête très bien à une simulation fluide ou couplée fluide-thermique à l'aide de solveurs multiphysiques sous licence libre comme OpenFOAM® →3. Une fois créés avec le maillage en volumes finis des parties actives et des écoulements d'air, les scripts garantissent la bonne attribution des propriétés de matériaux, sources de chaleur et conditions aux limites pour tous les constituants du moteur.



04

— 03 MCCU-CFD collecte les résultats de simulation sous forme d'images, de tracés et de tableaux, et prépare le rapport destiné à l'utilisateur.

— 04 StudyTrafo facilite et accélère la modélisation.

— 05 MCCU-CFD automatise la préparation au calcul CFD à partir d'un jeu prédéfini de paramètres.

Le modèle construit, la simulation est exécutée sur un serveur jusqu'à obtention d'un état stable, puis s'achève par un post-traitement automatisé sur un logiciel de visualisation de données comme ParaView. MCCU-CFD récupère et présente les résultats sous forme d'images, de tracés et de tableaux, puis prépare le rapport qui sera envoyé à l'utilisateur.

DryFOAM

Les transformateurs de type sec, très sensibles aux variations de température, se caractérisent par des performances thermiques bien moins bonnes que celle des transformateurs immergés, du fait de leur mode et milieu de refroidissement (circulation naturelle de l'air ambiant). Pour optimiser leur conception, il faut impérativement des codes de calcul thermique fiables.

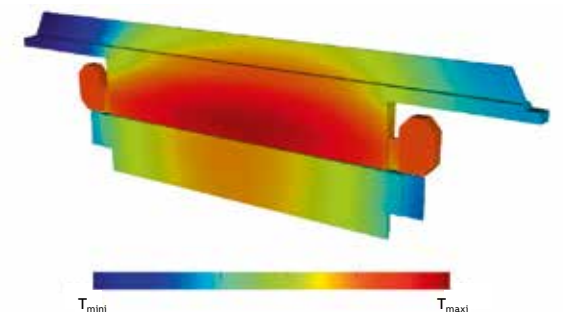
L'idée est d'automatiser la préparation de simulations CFD complètes à partir d'un jeu prédéfini de paramètres.

Ceux-ci peuvent aller de simples systèmes de masse à contraintes localisées à des modèles de réseau très complexes. Au-delà des limites des modèles paramétriques moyennés, la CFD permet de prendre en compte les effets de la turbulence, du rayonnement et de la convection naturelle, ainsi que l'incidence de la géométrie sur les transformateurs secs.

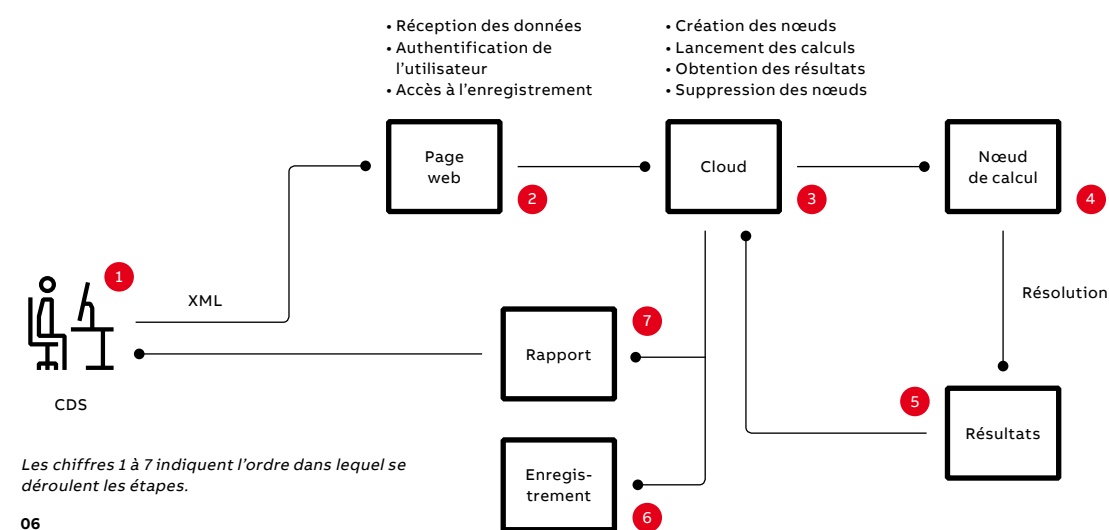
L'avènement du cloud fait fondre les coûts de calcul, qui ne sont désormais plus un obstacle aux

analyses numériques de type CFD. En effet, le coût exorbitant des licences payantes a toujours été un frein à l'adoption massive des solutions proposées sur le marché. Ce n'est plus le cas aujourd'hui avec le logiciel libre OpenFOAM qui permet de répartir les traitements sur une multitude de cœurs et d'exploiter ainsi toute la puissance du calcul intensif à un prix dérisoire. Pour une tâche répétitive comme la conception d'un transformateur, une plate-forme automatisée sous OpenFOAM est une bonne solution pour obtenir un calcul thermique précis.

L'idée de DryFOAM (contraction de *Dry* pour transformateur sec et *FOAM* pour OpenFOAM) remonte à un atelier organisé en 2016 sur le thème des problèmes thermiques rencontrés dans les machines électriques. Les échanges d'expérience dans les domaines des codes *open source*, de la maîtrise thermique, du développement des logiciels de simulation et des nouvelles méthodes de calcul dans le cloud ont abouti en 2017 à un projet informatique aux multiples visées : a) fournir un outil simple et fiable de simulation fluide-thermique



05



06

—
06 Étapes du
traitement DryFOAM

dédiée aux transformateurs secs ; b) exploiter les logiciels libres pour minimiser les dépenses d'exploitation ; c) utiliser les ressources du cloud (logiciel Microsoft Azure) pour alléger la charge de calcul ; d) faciliter l'usage de l'outil par les ingénieurs des usines de transformateurs, quel que soit leur bagage théorique en mécanique des fluides et en transfert thermique.

DryFOAM →6 débute par un simple fichier d'entrée qui est aussi universellement utilisé par le système ABB de conception CDS (*Common Design System*) pour les transformateurs. L'outil en extrait automatiquement les paramètres géométriques, tels que les dimensions des enroulements, du circuit magnétique et de l'enveloppe ainsi que les charges (pertes) et les conditions aux limites (température ambiante). Les scripts du logiciel Octave, « clone » libre du langage de calcul MATLAB®, prennent ensuite le relais pour bâtir un modèle bidimensionnel axisymétrique, représentatif du transformateur et de ses caractéristiques constructives : circuit magnétique, enroulements, canaux de refroidissement, enveloppe, ouïes de ventilation, flux d'air autour de l'appareil. Est alors créé un maillage CFD en volumes finis, qui garantit la qualité des éléments et des détails des couches limites pour résoudre les écoulements près de la paroi de la convection naturelle et forcée. Dans une dernière étape, DryFOAM affecte les sources de chaleur, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et les paramètres du solveur. Le modèle prêt, DryFOAM lance les calculs et édite un rapport après obtention d'une solution stable. Cette édition automatique est d'ailleurs l'une des fonctionnalités clés de DryFOAM. Elle facilite la transmission des résultats aux concepteurs dans un format explicite. Libérés de la complexité de la simulation, les ingénieurs peuvent visualiser en clair

les indicateurs clés de performance thermique de l'ensemble circuit magnétique-bobinage, à savoir la température moyenne des enroulements mais aussi la température et la position des points chauds. Ce rapport peut être téléchargé ou stocké dans le système.

Dans une optique de déploiement, DryFOAM est une solution complète et autonome, implantable sur un ordinateur portable ou une station de travail, ou encore dans le cloud. Les solutions cloud sont très prometteuses : l'interface opérateur DryFOAM Cloud garantit la sécurité des données,

Fonction clé de DryFOAM, l'édition automatique de rapport facilite la transmission des résultats de simulation dans un format explicite.

facilite et accélère la saisie du fichier d'entrée et son transfert dans le cloud, mais aussi le téléchargement des rapports ainsi que l'affichage en ligne et en direct des paramètres de stabilité de la résolution par rapport à l'itération. Pour l'instant, le logiciel autorise des calculs 2D de deux types de construction. Sont néanmoins prévus des calculs 3D plus détaillés pour prendre en compte d'autres types d'appareils comme les transformateurs en résine moulée RESIBLOC® et les transformateurs de traction. Mieux encore, l'outil peut aisément s'adapter à la simulation d'autres produits ABB. •

JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SIMULATION

L'impression 3D s'invite en production

ABB transpose les progrès de l'informatique et du numérique au monde de la fabrication additive. Résultat : des solutions d'impression 3D performantes qui optimisent la conception des composants clés tout en diminuant les coûts de réalisation.

—
01 Réduire le poids des robots de peinture industriels en diminuant les coûts de fonctionnement. Dans cette optique, le système d'injection de peinture, en bout de bras, a lui aussi tout intérêt à s'alléger.

—
Lukasz Matysiak
Tomasz Nowak
Robert Sekula
Dariusz Bednarowski
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

lukasz.matysiak@
pl.abb.com
tomasz.nowak@
pl.abb.com
robert.sekula@
pl.abb.com
dariusz.bednarowski@
pl.abb.com

—
Frederic Tholence
Erik X. Johansson
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

frederic.tholence@
se.abb.com
erik.x.johansson@
se.abb.com

—
Peter Schuster
ABB Technology Center
Uster (Suisse)

peter.schuster@
ch.abb.com



01

La fabrication additive, ou impression 3D, consiste à réaliser des pièces par dépôt de couches successives de matière [1]. Cette technologie a connu une évolution fulgurante ces dix dernières années, avec la diversification des matériaux, des formes et des sources de chaleur. Dans les procédés d'extrusion comme la modélisation par dépôt de matière ou de filament en fusion (*FDM* ou *FFM*),

la forme est directement obtenue, couche après couche, par l'extrusion d'un filament polymère fondu. Dans les procédés à base de poudre (métal ou polymère), celle-ci est étalée sur la plate-forme d'impression puis solidifiée par faisceau laser, ou bien déposée directement sur la zone chauffée.

Ces avancées offrent aujourd'hui aux constructeurs une grande liberté de conception en permettant l'impression 3D d'objets formés de multiples pièces intégrées.

ABB a évalué des outils de conception et de simulation afin de déterminer les avantages offerts par l'impression 3D, au-delà de la liberté conceptuelle.

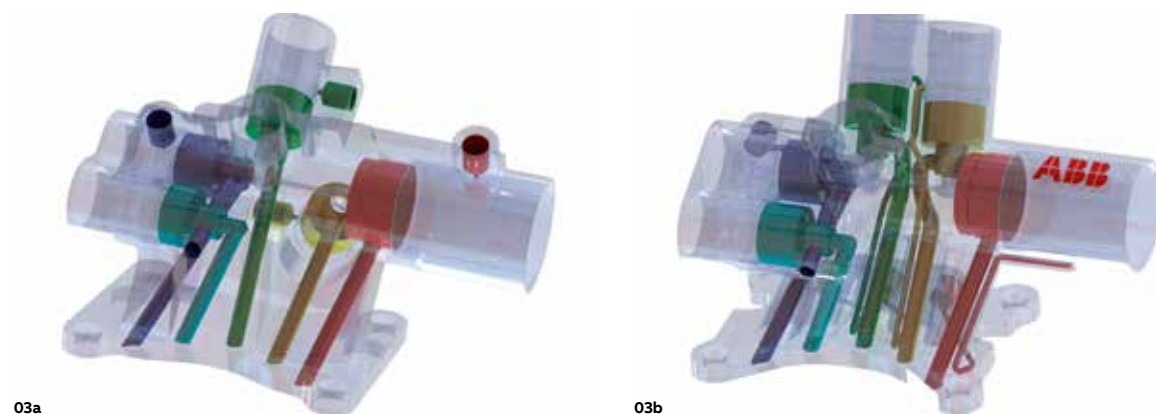
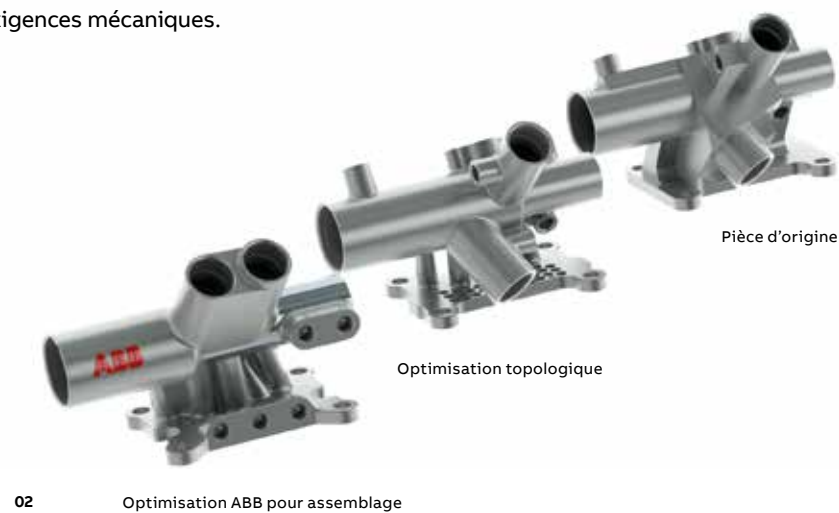
Pour autant, la complexité intrinsèque de la technologie constitue un obstacle à sa généralisation. Citons par exemple les contraintes liées à la géométrie du produit et à l'organisation de la matière, caractéristiques définies pendant l'impression. Le procédé lui-même peut avoir une influence sur le matériau, puisque chaque couche est « déposée » sur la précédente. La solidification rapide, le refroidissement directionnel et les changements de phase induits par la succession des cycles thermiques fragilisent les microstructures du matériau. Sans compter que la pièce finie risque de présenter une porosité inacceptable au regard des exigences mécaniques.

De même, les déformations et contraintes résiduelles inhérentes aux phénomènes thermomécaniques à l'œuvre peuvent dégrader fortement la précision dimensionnelle [2].

Les outils numériques, notamment les logiciels d'analyse par éléments finis, mettent en lumière les phénomènes physiques déterminants et explicitent les relations entre conception du produit, réglages du procédé, microstructure du matériau et propriétés physiques des objets imprimés en 3D. Ces outils excellent également dans l'optimisation topologique et paramétrique, qui vise à réduire le temps de fabrication et la masse de la pièce finie.

Études de cas

Dans les trois cas présentés ci-après, ABB s'est attaché à évaluer les outils de conception et de simulation numériques disponibles afin de



—
02 Évolution du système d'injection au fil des itérations : au final, toutes les entrées d'air se retrouvent du même côté.

—
03 Trajet de la peinture

03a Pièce d'origine

03b Prototype ABB optimisé pour assemblage

—
04 De l'optimisation topologique au prototype

04a Variantes de conception

04b Simulation thermique du remplissage de moule

04c Prototype d'avant-bras robotique moulé

déterminer les avantages offerts par l'impression 3D, au-delà de la liberté conceptuelle :

- Impression 3D d'un système complexe d'injection de peinture ;
 - Optimisation topologique et fabrication hybride d'un bras robotique de démonstration ;
 - Impression 3D d'outillage de moulage par injection.
- Le Groupe s'est pour cela attaqué aux deux talons d'Achille de la fabrication additive que sont les délais et les coûts de réalisation.

Impression 3D métallique d'injecteur de peinture

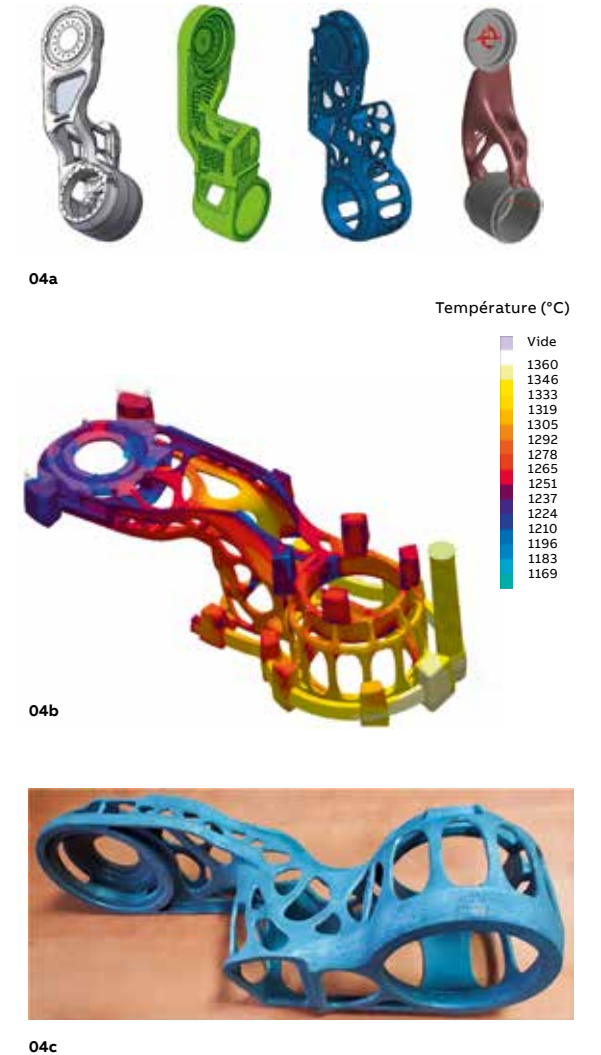
Le poids d'un robot industriel, notamment de peinture →1, influe beaucoup sur le temps de cycle, la précision, la capacité de charge et le bilan énergétique de l'opération : l'allègement est donc synonyme de gains de temps et d'argent. Le bénéfice est particulièrement net pour le pulvérisateur robotique en bout de bras. La fabrication additive a d'autres atouts potentiels : assemblage et nettoyage facilités, composants plus robustes.

L'injecteur a pour fonction de mélanger les deux composants de peinture (résine et catalyseur) juste avant leur pulvérisation. Il est traditionnellement fabriqué par usinage à commande numérique (CNC) d'un bloc d'acier inoxydable. L'intérieur se compose d'un réseau complexe de tuyaux dont la réalisation, longue et coûteuse, gaspille en outre beaucoup de matière : environ 88 % du bloc d'acier initial est enlevé par usinage.

Sachant que tout ajout de matière superflue augmente la masse de la pièce imprimée en 3D et donc son coût, la légèreté de la structure est un paramètre primordial qui relève généralement de l'optimisation topologique. On commence donc par appliquer à la pièce des charges de service, qui permettent ensuite au moteur d'optimisation d'en déduire la densité de chaque élément pour assurer la rigidité de l'ensemble. On obtient alors une « carte de densité » qui sert de base à l'élaboration d'une structure bionique type ou d'un treillis léger.

ABB a ainsi démontré que la fabrication additive était le procédé idéal pour obtenir ces formes complexes. Dans sa version la plus légère, l'injecteur combine caractéristiques bioniques et structures alvéolaires. Résultat, la pièce affiche la même rigidité et les mêmes fonctionnalités que l'original, pour un allègement de 43 % !

La conception a ensuite été repensée pour faciliter l'impression et l'usinage de finition. Un logiciel dédié a servi à optimiser l'orientation de la pièce sur la plate-forme d'impression. Une analyse du volume des renforts (matière perdue), de la déformation, de la durée d'impression, de l'ampleur et de la difficulté du post-traitement ainsi que du nombre maximal de pièces sur la plate-forme a



permis d'améliorer la qualité de fabrication et d'en réduire le coût.

La durée d'impression a ainsi diminué de 10 % tandis que le volume des renforts a été divisé par six !

La légèreté est primordiale puisque toute matière superflue augmente le poids de la pièce et donc son coût.

Par la suite, ABB a modifié la conception de l'injecteur →2. À la différence d'une fabrication classique, où les tubes d'injection passent forcément par des trous droits, l'impression 3D permet de créer des tubes incurvés vers l'intérieur de la structure. Il est ainsi possible de modifier à loisir la circulation d'air dans l'injecteur de façon à positionner toutes les vannes de pilotage pneumatique du même côté →3. L'assemblage et l'usinage post-impression s'en trouvent facilités.



05

Pour fabriquer des prototypes de cette nouvelle génération d'injecteurs, ABB a eu recours au procédé de fusion sélective par laser (SLM), avec à la clé une nette réduction du poids et des pertes de production, ainsi qu'un assemblage facilité. Le délai de livraison de la pièce est passé de trois mois à seulement trois semaines.

Globalement, cette amélioration ABB fait profiter les clients du Groupe d'un produit mieux conçu et démocratise l'usage de robots ultra-performants.

Optimisation topologique d'un bras robotique
Les principaux atouts de l'impression 3D (liberté de conception, fabrication de pièces complexes, à la demande) sont réduits à néant par les contraintes propres aux composants robotiques : bras en aluminium n'acceptant qu'un nombre limité de matériaux, pièces de petite taille, coûts de production élevés et durée d'impression longue, entre autres. Par contre, les méthodes classiques comme le moulage offrent un excellent rendement sans limitation de taille des composants.

C'est pourquoi ABB s'est intéressé à une stratégie de production hybride, en commençant par optimiser la topologie de l'avant-bras du robot [3,4] afin d'identifier différentes variantes de conception →4a, puis en imprimant en 3D le moule en sable qui servira d'outillage classique. Le Groupe a ainsi mis

au point un concept inédit d'avant-bras affranchi des contraintes qui limitaient jusque-là l'intérêt de la fabrication 3D.

Ce démonstrateur →4c marie donc trois technologies : la conception générative qui autorise un grand nombre de formes ; la fabrication additive pour réaliser l'outillage (moule) et non la pièce finale ; enfin, la fonderie pour concrétiser l'idée du concepteur à l'aide d'un moule imprimé en 3D et d'un alliage métallique à la fois léger et solide →4b.

Preuve était ainsi faite qu'il pouvait être plus intéressant d'utiliser l'impression 3D pour réaliser un outillage destiné à aider la fabrication classique.

Outillage d'injection
Les avancées de la fabrication additive ont stimulé le développement d'imprimantes 3D haute résolution plus précises et plus rapides que jamais, ainsi que de nouveaux matériaux d'injection. Plusieurs fournisseurs proposent d'imprimer directement en 3D des empreintes de moules d'injection [5,6] qui ne nécessitent aucun usinage ultérieur et peuvent donc être directement montées sur une carcasse métal →5.

ABB a prouvé qu'il pouvait être plus intéressant d'utiliser l'impression 3D pour produire un outil de fabrication classique.

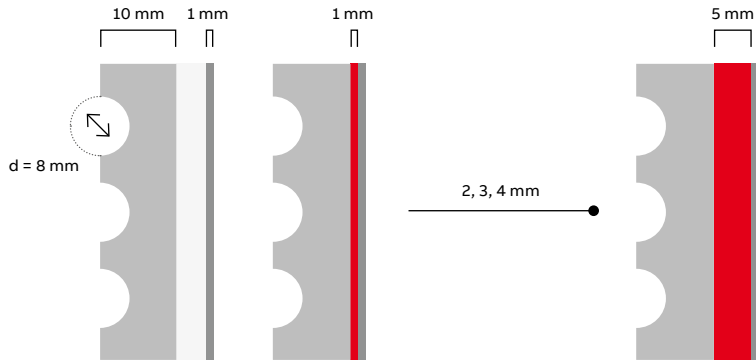
Les moules polymère imprimés en 3D sont 50 à 70 % moins chers que leurs équivalents métalliques et fabriqués bien plus vite, en quelques jours ! Reste que leurs limitations technologiques les rendent encore impropres aux séries de plus de 100 pièces, selon le type de matériau et la complexité du moule. Autres désagréments : le choix des thermoplastiques utilisables est limité, tandis que la matière première est chère et présente une faible conductivité thermique qui allonge le cycle de moulage par injection (15 à 20 fois plus que pour les moules en métal).

Pour s'affranchir de ces contraintes, ABB a adopté une approche radicalement différente. N'est imprimée en 3D que la structure, sorte de « coque » qui est ensuite remplie d'un matériau à haute conductivité thermique. L'épaisseur de cette coque est primordiale pour concilier deux exigences contradictoires : elle doit être faible pour écourter le temps de cycle, mais importante pour garantir la stabilité mécanique. Des simulations de géométrie sous ANSYS/Fluent ont permis d'évaluer l'impact de ce critère sur le temps de cycle →6, pour une épaisseur de paroi comprise entre 1 et 5 mm, et une structure en polymère ou en acier.

- 05 Moule polymère imprimé en 3D, prêt pour l'injection
- 06 Géométrie 2D étudiée en simulation thermique (simplification du modèle par symétrie)
- 07 Comparaison des temps de cycle de trois procédés de moulage

Le tableau →7 présente quelques résultats de calcul de température de surface pour les scénarios étudiés lors du premier cycle et en cycle stable : l'épaisseur de paroi conditionne la vitesse de refroidissement, et ce dès le premier cycle. En conditions stables, le temps de cycle d'un moule en polymère massif est environ 15 fois plus long que celui d'un moule en acier. Ces enseignements ont permis d'optimiser la conception et de réduire la durée de refroidissement d'un facteur 4 à 7 ; le temps de cycle n'est plus que 2 à 3 fois celui de l'acier, ce qui constitue un excellent résultat.

Au-delà de l'impression, la simulation
La fabrication additive et les avancées qu'elle permet bouleversent la conception et la fabrication industrielle. La filière est suffisamment mature pour rivaliser sur de nombreux plans (propriétés matières, géométries, coûts du procédé et des matériaux, etc.) avec les techniques traditionnelles de fabrication soustractive ou les méthodes de production comme le moulage par injection. Les éditeurs de logiciels de simulation, les fabricants d'imprimantes 3D et les fournisseurs de matières premières devraient continuer d'unir leurs forces pour proposer des solutions toujours plus automatisées et conviviales. Pour le client, c'est la perspective d'une plus grande liberté et flexibilité dans la géométrie des pièces, et donc de structures offrant le meilleur rapport masse-résistance, idéales pour l'intégration fonctionnelle et la consolidation de pièces.



06

Étude de cas	Premier cycle (s)	Cycle stable (s)
Moule en acier	10	11,5
Modèle imprimé intégralement en 3D et coque en polymère massif, de 5 mm d'épaisseur	44	171
Coque polymère de 2 mm d'épaisseur, remplie de matériau à haute conductivité thermique	33	40

07

La fabrication additive s'impose en conception et en production, rivalisant avec les procédés classiques.

ABB ouvre maintenant un nouveau front : la simulation numérique multiphysique du procédé d'impression lui-même, notamment des interactions thermomécaniques entre les particules isolées et les couches successives de poudres métalliques ou polymère. Nous ne manquerons pas de vous présenter les résultats de ces travaux dès qu'ils auront été testés et validés. •

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

Entraînements de puissance numériques : du jumeau à l'avatar

Un jumeau numérique est un double presque parfait d'un objet physique. Pourtant, si l'on veut tirer pleinement profit du numérique, il faut aller plus loin dans cette représentation virtuelle et l'« augmenter » de ses multiples caractéristiques dynamiques et interactions avec le monde réel : c'est tout l'enjeu du concept ABB d'« avatar » numérique.

—
Piotr Lipnicki
Daniel Lewandowski
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

piotr.lipnicki@pl.abb.com
daniel.lewandowski@pl.abb.com

Diego Pareschi
ABB BV
Rotterdam (Pays-Bas)

diego.pareschi@nl.abb.com

Enrico Ragaini
Gabriele Perrone
ABB S.p.A.
Bergame (Italie)

enrico.ragaini@it.abb.com
gabriele.perrone@it.abb.com

Pour produire plus avec moins et maximiser ses bénéfices sans négliger les questions environnementales, l'industrie moderne doit conjuguer excellence opérationnelle, efficacité et rentabilité.

Le numérique vient concrétiser ces ambitions en permettant de créer des doubles virtuels *ad hoc* de l'usine. Un jumeau numérique est la somme de données et de connaissances sur un équipement, un système ou un procédé physique dont il réplique fidèlement la configuration, l'environnement et les caractéristiques. Doué d'intelligence, il s'enrichit d'une interface permettant de comprendre le fonctionnement passé et présent de l'objet modélisé, mais aussi d'en prédire le comportement futur. Pour autant, le principe a ses limites : cette représentation

—
Pour tirer le meilleur parti du numérique, le virtuel ne doit donc plus seulement copier le réel, mais le transcender ; place à l'« avatar » numérique.

virtuelle doit gagner en authenticité par rapport à la réalité physique de l'objet en question et intégrer bien plus d'informations que les seules données directement liées à l'appareil, au système, à l'usine ou encore au modèle. L'interaction homme-machine, par

exemple, produit et exploite toutes sortes de données numérisées qui peuvent aussi avoir leur importance pour caractériser l'objet dans sa globalité : mesures en temps réel, modèles, graphiques en 3D, manuels opérateur, notes et consignes de maintenance. Pour tirer le meilleur parti du numérique, le virtuel ne doit donc plus seulement copier le réel, mais le transcender. Et le jumeau se muer en « avatar », sorte d'alter ego aux super pouvoirs. Pur produit du cyberspace, l'avatar ne se contente pas de reproduire un objet physique ; il est capable d'interagir avec son écosystème numérique et d'évoluer selon des comportements et des modes de fonctionnement bien différents.

Les données constituant cette version améliorée du jumeau virtuel peuvent être regroupées et classées pour former un système particulier, comme un entraînement de puissance numérique.

Entraînement numérique

Le qualificatif de « numérique » désigne ici une suite de solutions permettant de répliquer informatiquement les équipements clés d'un procédé comme, par exemple, les compresseurs omniprésents dans l'industrie du pétrole, du gaz et de la chimie →1. L'entraînement numérique englobe à cette fin matériels, logiciels et services, et exploite les possibilités offertes par la connectivité et l'analytique, doublées de l'expertise métier. Chaque maillon de la chaîne cinématique (variateur, moteur, palier, etc.) et de l'application cible (pompage, compression) peut envoyer des données au cloud, qui les



01

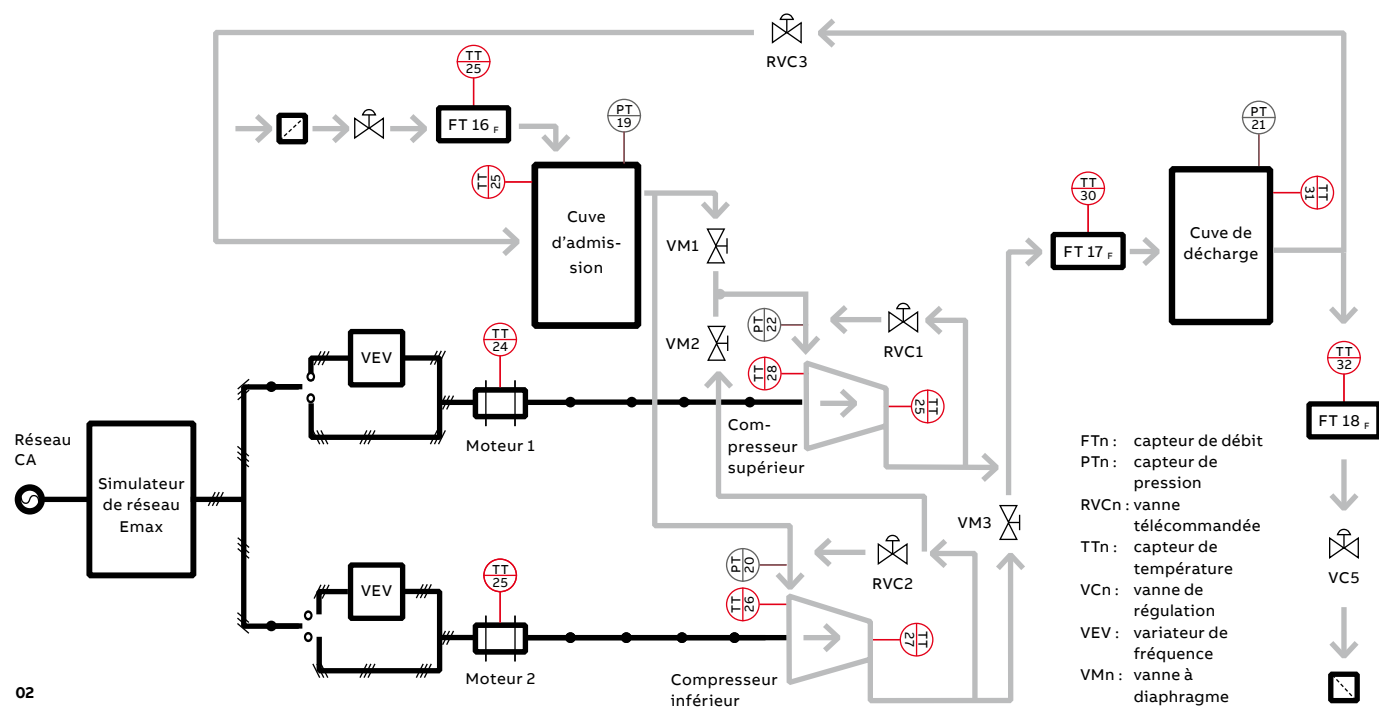
—
01 Les compresseurs sont incontournables dans le secteur pétrolier, gazier et chimique. ABB revisite le jumeau numérique en l'enrichissant de toute l'expertise du Groupe en matière d'entraînement de compresseurs : place à l'« avatar » numérique.

affiche sur le tableau de bord de l'opérateur. Des services de suivi d'état et de maintenance prédictive peuvent ensuite assister ce dernier ou préconiser des réparations au vu des niveaux d'usure et de contrainte constatés sur les différents équipements.

ORKAN

Pour mener cette course à l'innovation technologique et numérique, ABB met au point des concepts « intelligents » vérifiés à grand renfort de revues de conception, de modélisations et de simulations

—
L'entraînement numérique englobe matériels, logiciels et services.



02

avancées, ainsi que d'essais réalisés dans de strictes conditions maîtrisées, surtout pour les petites configurations. Le banc d'essai pour compresseurs ORKAN →2,3 fait partie de l'arsenal d'outils ABB de pilotage et de diagnostic permettant d'évaluer tous les concepts liés aux entraînements de puissance numériques.

ORKAN peut notamment tester l'impact des défauts électriques sur la stabilité du procédé et développer des parades. Ces dernières années, le banc a servi à la conception et au test de solutions remédiant aux perturbations du réseau électrique ainsi qu'aux défauts électriques et mécaniques du *process*. Font également partie de son champ d'exploration les modes de conduite du procédé (commande de base, régulation de la pression d'aspiration et de refoulement, antipompage, etc.) et le développement de solutions robustes pour parer aux aléas.

Le banc est équipé de dispositifs ABB : variateurs basse tension ACS880 et ACS850, moteurs asynchrones, contrôleur AC 800PEC, puissants API AC500 pour le suivi d'état, disjoncteur SACE Emax (complété d'un enregistreur de données Raspberry Pi), ainsi que de nombreux capteurs de débit, de pression et de température. Avec la plate-forme ServicePort™ d'ABB, l'utilisateur peut visualiser, analyser et suivre tous les

indicateurs de performance (KPI) pour optimiser le fonctionnement des compresseurs et du procédé tout entier →4.

Étude de cas

Le banc d'essai ORKAN reprend les éléments fondamentaux du jumeau numérique, qu'il enrichit des attributs de l'avatar : gestion de la documentation, modélisation, simulation, représentation 3D, mise en données, visualisation, synchronisation du modèle et analyse.

ORKAN permet notamment d'évaluer l'impact des défauts électriques sur la stabilité du procédé et d'y remédier.

Gestion documentaire

Le versionnage du logiciel est effectué par l'outil *open source* Git, qui garde la trace des consignes d'exploitation du banc et de toutes les interventions, sous forme de journaux (données/événements) et de rapports.

Modélisation

Cette étape fait appel à des modèles analytiques du procédé et à des modèles électromécaniques

dynamiques du groupe de compression, dont des campagnes de mesure et de simulation ont permis de vérifier la précision. L'optimisation se concentre sur le pilotage du procédé avec une régulation prédictive antipompage des compresseurs, assortie d'une fonction de calcul du délai d'entrée en pompage pour déterminer le temps de réaction de la commande. La partie diagnostics s'appuie sur des algorithmes et des processus analytiques traitant aussi bien des machines tournantes que du procédé. Ces diagnostics interviennent à différents échelons, de l'appareil de mesure et de surveillance à la passerelle en bordure de réseau et jusqu'au cloud. La modélisation se focalise sur le suivi d'état ainsi que la gestion de l'énergie et du process.

La modélisation se focalise sur le suivi d'état ainsi que la gestion de l'énergie et du process.

Simulation

Ce volet a deux grandes composantes : la simulation de la conception et celle du rendement des compresseurs. La première emploie des modèles de simulation qui détaillent les changements de point de

consigne, les perturbations, les modes de défaillance et le niveau sonore ; la seconde évalue l'optimisation des rendements du groupe de compression (partage de la charge, fonctionnement en série, antipompage, etc.) en régime normal ou perturbé. Ces simulations sont ensuite vérifiées par expérimentation.

Représentation 3D

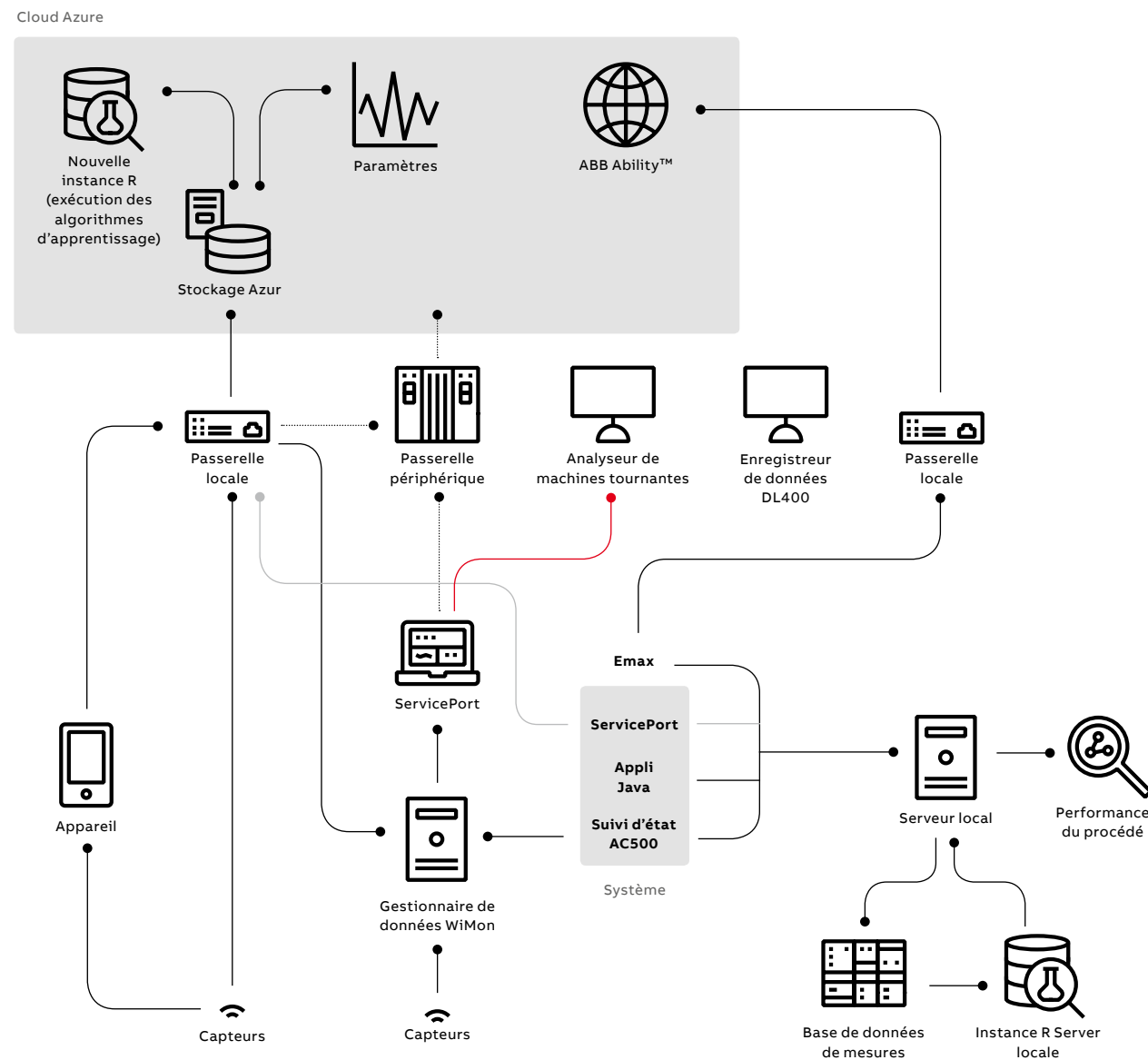
Les graphiques 3D sont basés sur les schémas de conception des composants ABB et tiers.

Mise en données

Le modèle utilise les données techniques de l'instrumentation et de la commande, mais aussi des autres éléments constitutifs de l'entraînement, jusqu'à la passerelle et au cloud. Il remplit plusieurs fonctions : contrôle-commande, traitement, diagnostic et suivi d'état, analytique. En entrée, les données de production fournissent le détail des caractéristiques produit (débit et pression de gaz, par exemple), tandis que les données d'exploitation renseignent sur la disponibilité, la performance, la qualité, le taux de rendement synthétique, etc. Les données de maintenance sont multisources : ServicePort, applications Java, disjoncteur Emax, automate de suivi d'état AC500, tableau basse tension ABB, entre autres →5.



03



04

Visualisation

Les résultats de simulation se présentent à l'écran sous la forme de graphiques, de courbes caractéristiques et de séries temporelles →6.

L'architecture cloud ABB Ability™ Electrical Distribution Control System vise à doper, fiabiliser et sécuriser la distribution électrique.

Il en va de même de l'affichage de l'état de fonctionnement des actifs, rafraîchi en temps réel depuis le poste opérateur. L'état de santé du parc se matérialise par des alarmes et des alertes, au niveau application, passerelle ou cloud.

Synchronisation du modèle

La synchronisation des données de simulation numérique avec les mesures physiques est basée sur une évaluation temps réel de la commande, du procédé, du diagnostic et du suivi d'état.

Analytique

Il s'agit essentiellement d'une vérification algorithmique basée sur le triptyque modèles-simulations-mesures. Elle débouche sur un ensemble de KPI opérationnels (données process, électriques, mécaniques et de contrôle-commande) et fonctionnels (état de santé des actifs). Ces derniers utilisent le détail des indicateurs de diagnostic et de maintenance fournis par le nouvel analyseur de machines tournantes ABB intégré à ServicePort.

Toutes ces données peuvent s'agréger à une plateforme cloud connectée à ORKAN, comme ABB Ability™ Electrical Distribution Control System,

par exemple. Cette solution de supervision, d'optimisation et de gestion des actifs et de l'énergie s'appuie sur le dernier cri des architectures cloud pour collecter, traiter et stocker les données. Son développement est le fruit d'un partenariat avec Microsoft visant à doper, à fiabiliser et à sécuriser la distribution électrique.

Nouveaux terrains d'action

Le jumeau numérique se limite à une « simple » représentation virtuelle d'un objet et de ses performances temps réel. L'avatar, illustré par l'exemple du banc ORKAN, va plus loin en multipliant les scénarios et les interactions avec un éventail beaucoup plus large de compagnons numériques. L'idée est de nourrir ses algorithmes analytiques d'un maximum d'informations et d'entités.

L'avatar numérique ouvre la voie à une multitude d'analyses et de simulations qui éclairent la prise de décision.

Le banc ORKAN permet d'illustrer la richesse du concept appliqué à l'entraînement numérique d'un compresseur de pétrole et de gaz. Cet environnement de test unique n'en utilise pas moins une telle panoplie de produits et de technologies ABB qu'il peut être considéré comme une plate-forme générique de numérisation de l'usine.

Ce concept d'avatar numérique, qui ouvre de nombreuses perspectives en matière d'évaluation, de simulation, d'analytique et de prise de décision, permet à l'industrie moderne de repousser ses limites. •

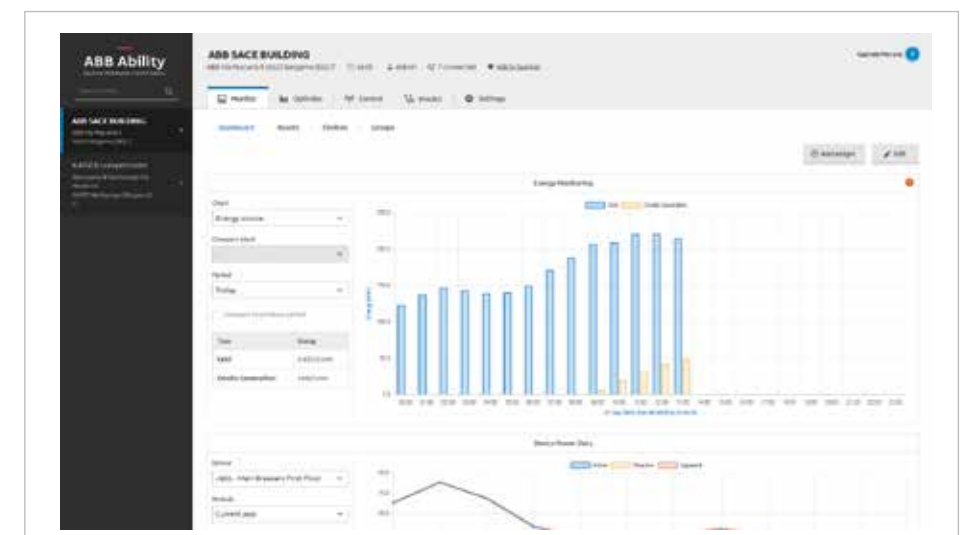
04 Synoptique de fonctionnement du banc ORKAN de commande et de diagnostic de compresseurs

05 Tableau électrique dans le cloud ABB Ability™ Electrical Distribution Control System

06 Affichage graphique de bilan énergétique dans le cloud ABB Ability™ Electrical Distribution Control System



05



06

JUMEUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

L'apprentissage automatique bouleverse le suivi d'état

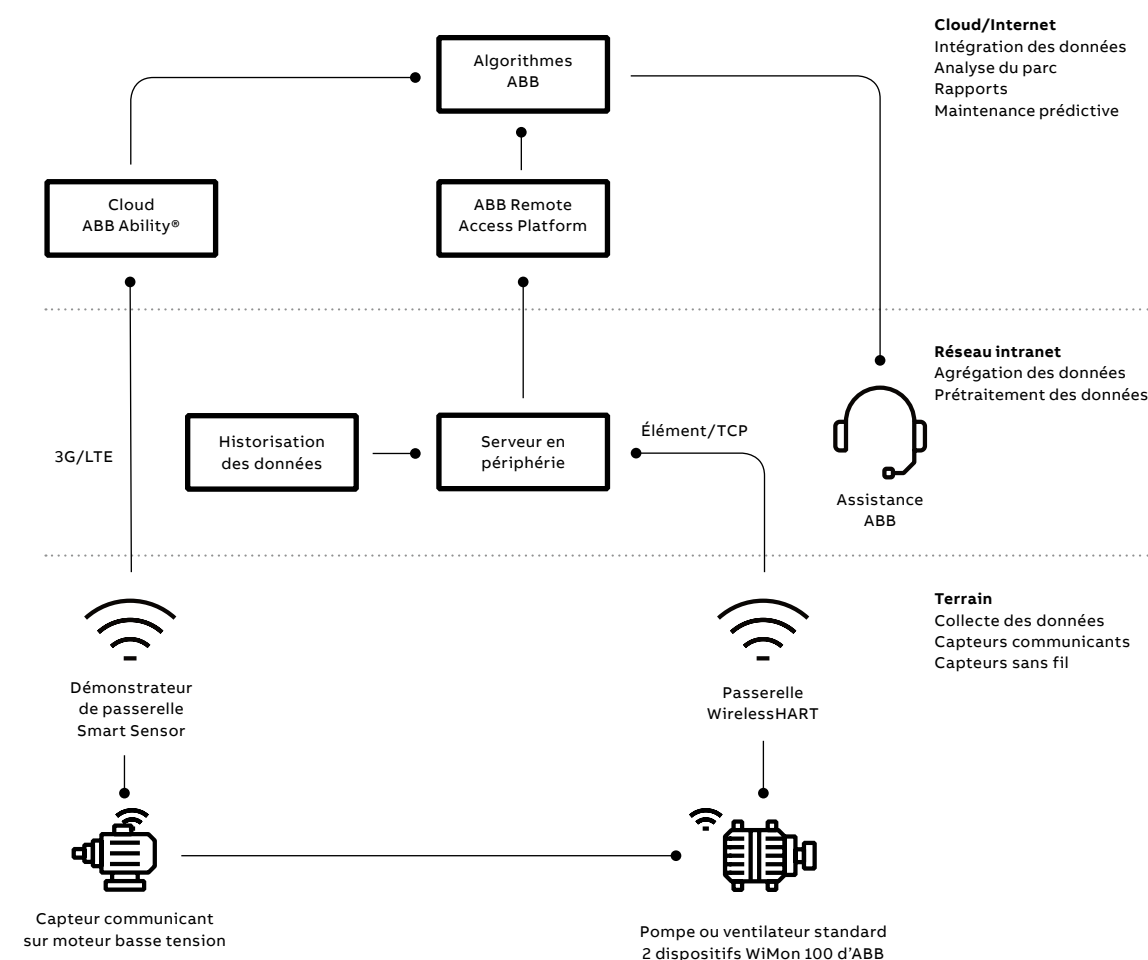
Dans une usine, seules les machines tournantes indispensables à l'activité ont droit à une surveillance continue. Pour combler cette lacune, ABB a mis au point et déployé sur un site pilote une solution de suivi d'état performante et peu coûteuse alliant logiciel, apprentissage automatique et instrumentation bon marché.



01

— 01 Les équipements non critiques d'un site industriels peuvent aussi bénéficier des gains financiers et opérationnels promis par le suivi d'état et la maintenance prédictive.

— 02 Architecture de suivi d'état pour machines tournantes non critiques ; certains aspects peuvent varier d'un site à l'autre (par exemple, utilisation de protocoles autres que WirelessHART ou Bluetooth).



02

— **Ralf Gitzel**
Benedikt Schmidt
Arzam Kotriwala
Ido Amihai
Guruprasad Sosale
 ABB Corporate Research
 Ladenbourg (Allemagne)

ralf.gitzel@de.abb.com
 benedikt.schmidt@de.abb.com
 arzam.kotriwala@de.abb.com
 ido.amihai@de.abb.com
 guruprasad.sosale@de.abb.com

— **James Ottewill**
 ABB Corporate Research
 Cracovie (Pologne)

james.ottewill@pl.abb.com

— **Marco Heese**
 ABB Automation GmbH
 Mannheim (Allemagne)

marco.heese@de.abb.com

— **Diego Pareschi**
 ABB B.V.
 Rijswijk, (Pays-Bas)

diego.pareschi@nl.abb.com

— **Subanatarajan Subbiah**
 Ancien collaborateur ABB

En réduisant les besoins de maintenance corrective, la détection précoce est bien moins coûteuse que le remplacement d'un composant après défaillance.

Traditionnellement, le suivi d'état et la maintenance prédictive sont réservés aux machines tournantes stratégiques pour l'usine, les autres actifs devant se contenter d'une surveillance et d'analyses sommaires, sans incidence sur le budget de maintenance.

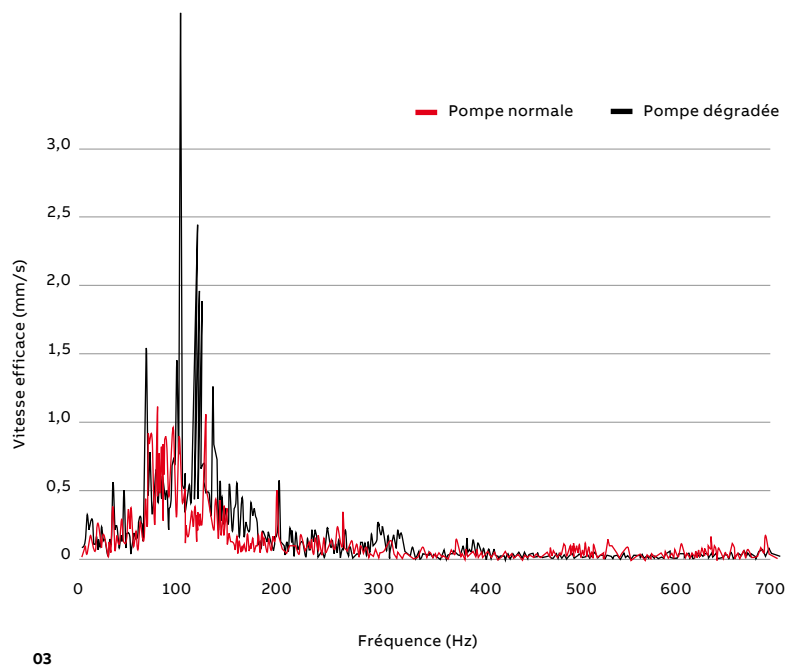
Certaines machines tournantes moins importantes, comme les pompes ou les moteurs, n'en sont pas moins très répandues. ABB a imaginé pour elles une solution de surveillance peu coûteuse reposant sur trois piliers : capteurs bon marché, apprentissage automatique et logiciel de suivi d'indicateurs d'état, ou « KCI ».

Testée sur un site client pendant deux ans et demi →1, cette installation pilote exploite les capacités de l'Internet des objets pour prélever et analyser, plusieurs fois par jour, les données vibratoires de 30 pompes et en tirer de précieux renseignements sur l'état fonctionnel du parc.

État des lieux

Le suivi d'état d'actifs industriels comme les moteurs ou les pompes permet d'anticiper les pannes et d'intervenir avant qu'il ne soit trop tard. En réduisant les besoins de maintenance corrective, cette démarche est bien plus économique que celle consistant à attendre la défaillance d'un composant pour agir. Toutefois, le coût élevé des systèmes de suivi d'état restreint leur champ d'application aux actifs critiques.

Reste que les usines de transformation, dans le secteur de la chimie ou de la pharmacie par exemple, comptent aussi un grand nombre de moteurs non critiques destinés à l'entraînement des pompes. Même si leur défaillance n'est en rien



03

comparable à celle d'un équipement stratégique, une détection précoce ou un diagnostic anticipé permettrait non seulement d'éviter une dégradation plus importante mais aussi d'écourter la réparation.

Architecture globale

La solution de suivi d'état ABB pour actifs non critiques s'étage sur trois niveaux →2 :

- Terrain : collecte des données ;
- Intranet de l'usine : agrégation et prétraitement des données brutes remontées des capteurs ;
- Cloud ou autre plate-forme : intégration des données du parc machines à des fins d'analyse et de comparaison, de maintenance prédictive et d'édition de rapports.

Niveau terrain

Dans un premier temps sont définis les processus de collecte et de transmission au niveau supérieur des données collectées. Les actifs concernés sont les organes classiques de machines tournantes dans un procédé continu, tels que les moteurs basse tension (BT) et les pompes. Chacun est équipé du dispositif de suivi d'état sans fil WiMon 100 d'ABB qui se compose d'un capteur de vibrations (accéléromètre) et d'une sonde thermique mesurant la température de surface de la machine. L'architecture maillée de ce réseau de capteurs simplifie le transfert des données au sein de l'usine. Les moteurs BT embarquent également un capteur ABB Ability™ Smart Sensor qui leur apporte intelligence et connectivité sans fil.

L'utilisateur peut configurer la collecte des données WiMon en fonction de l'application. En temps normal, l'appareil enregistre toutes les heures la valeur agrégée de la vitesse efficace en mm/s ainsi que la température de surface, sous forme de séries temporelles. Toutes les six heures, le signal brut de

l'accéléromètre est échantillonné pendant 700 ms et calculé par une transformée de Fourier rapide. Le spectre de fréquence ainsi obtenu permet d'extraire pour analyse certaines composantes du signal vibratoire à des fréquences données.

Niveau réseau d'usine

Le réseau maillé de capteurs WiMon est relié à une passerelle WirelessHART d'accès à l'intranet du site pour permettre différentes analyses à l'échelle de l'usine. Dans notre installation pilote, les données collectées sont historisées et transmises pour traitement à un serveur ABB installé en périphérie de réseau.

Niveau cloud

La solution de communication sécurisée Remote Access Platform d'ABB assure le transfert des mesures vers la plate-forme d'intégration, outil de collecte multisite doté d'une très grande capacité de calcul.

La plate-forme d'intégration permet d'analyser l'ensemble du parc pour évaluer et comparer différents sites et régions.

Cette plate-forme cloud est capable d'agréger les données du parc machines de nombreuses usines connectées pour analyser, évaluer et comparer différents sites et régions. Un algorithme de suivi d'état traite l'ensemble des données et permet d'accéder aux résultats à distance, depuis n'importe où.

Diagnostic : l'analyse au service des indicateurs d'état

La valeur ajoutée d'un système de suivi d'état se mesure à sa capacité à fournir des informations concises, intelligibles et exploitables à l'utilisateur. Les métriques obtenues à partir des données vibratoires aident les responsables de maintenance à identifier les mesures nécessaires pour éviter toute dégradation supplémentaire des actifs. Par exemple, une augmentation des vibrations à la fréquence de rotation peut trahir un déséquilibre au sein de la machine tournante. Dans le scénario présenté ici, les données des spectres de fréquence →3 alimentent des algorithmes développés par ABB pour calculer les indicateurs KCI en lien avec les modes de défaillance d'un organe mécanique (instabilité de palier ou cavitation, par exemple).

— 03 Exemple de spectre fréquentiel d'une pompe en régimes normal et dégradé

— 04 Méthode de modélisation prédictive retenue

Un KCI se présente sous la forme d'une valeur numérique indiquant le niveau de sévérité du mode de défaillance observé sur l'équipement. Les KCI suivants surveillent des anomalies pouvant être décelées à partir de données vibratoires :

- Problème de pales : certains pics du spectre fréquentiel d'une pompe sont symptomatiques de pales endommagées. L'indicateur renseigne sur leur criticité ;
- Turbulences : le KCI signale des irrégularités dans l'écoulement du fluide dans la pompe, qui peuvent être soit problématiques en elles-mêmes, soit révélatrices d'un défaut ;
- Desserrage : l'arbre central d'une machine tournante est souvent maintenu en position par les paliers afin d'éviter tout déplacement axial. Or l'usure d'un palier peut créer un jeu excessif engendrant un déplacement vertical et horizontal de l'arbre, qui accélère sa dégradation. Le KCI correspondant renseigne sur l'éventuelle présence de cette anomalie et, le cas échéant, sur sa gravité ;
- Défaut d'alignement : tous les organes mécaniques d'une machine tournante doivent être bien alignés. Le transport ou des instabilités en fonctionnement peuvent entraîner un déalignement qui, à l'instar du desserrage, dégrade encore plus l'actif et ses performances ;
- Déséquilibre : dans l'idéal, les éléments d'une machine tournante sont équilibrés, leur masse étant répartie uniformément dans toutes les directions. Or il suffit d'une saleté sur une pale de pompe, par exemple, pour exercer un effort supplémentaire sur les paliers et engendrer un balourd ;
- Cavitation : ce phénomène, typique des applications de pompage, se manifeste par la formation de petites bulles de sous-pression sous l'effet d'une force entraînant de brusques fluctuations de pression dans un fluide. La suppression autour des bulles peut les faire éclater, provoquant des ondes de choc très dommageables pour la pompe. Le KCI correspondant détecte ces implosions.

Maintenance prédictive : l'apprentissage automatique au service du bilan de santé

Un modèle d'apprentissage automatique basé sur un réseau de neurones a été entraîné à prédire l'état de santé des actifs. Ce pronostic s'appuie sur les KCI et autres mesures du terrain, ainsi que sur leur évolution dans le temps. Par exemple, le réseau de neurones prédit les valeurs futures $Ct+1$ à $Ct+n$ d'un actif à partir des valeurs passées $Ct-n$ à $Ct-1$ des KCI, n étant la fenêtre temporelle ou « horizon de prédiction » →4. Si l'une des valeurs prédites franchit un seuil, le gestionnaire d'actifs reçoit un message lui demandant de procéder à une inspection.

La valeur ajoutée d'un système de suivi d'état se mesure à sa capacité à fournir des informations concises, significatives et exploitables.



Mesures du terrain



Traitement des données et calcul des KCI



Ajustement du modèle aux données actuelles



04

Prédiction des données



05



06

La définition de ce seuil d'alerte peut soit obéir aux référentiels de l'industrie, soit être dicté par les données du site. Dans ce dernier cas, un large échantillon de KCI est fourni à un modèle d'apprentissage automatique différent qui classe les données en fonction de ces valeurs. Quel que soit ce seuil, la méthode ABB a démontré son efficacité avec un taux de détection des dégradations avoisinant 90 %. Les valeurs exactes dépendent, pour chaque cas, du KCI utilisé et d'autres facteurs comme la taille de l'horizon de prédiction.

La méthode d'apprentissage automatique retenue par ABB est très efficace pour prédire la dégradation de l'état d'un actif, avec un taux de détection d'environ 90 %.

Scénarios applicatifs
Le prototype de suivi d'état ABB destiné aux gestionnaires d'actifs et aux responsables de maintenance →5,6 reprend l'architecture décrite plus haut et les processus analytiques de diagnostic et de prédiction.

Les résultats sont présentés sous la forme d'un tableau →7 indiquant en première ligne l'état actuel de l'actif, à savoir « Fonctionnement OK », « Étroite surveillance » ou « Action requise », puis en deuxième et troisième lignes la prédiction à une et deux semaines, qui peut prendre deux états : « Fonctionnement OK » ou « Action requise ». Voyons ci-après quatre scénarios applicatifs qui illustrent les bénéfices de cette technologie pour l'utilisateur.

Scénario 1
Dans ce premier cas ordinaire où l'équipement fonctionne normalement, sans risque de défaillance, les états actuel et prédits sont « Fonctionnement OK » ; aucune maintenance préventive à date fixe n'est requise.

- 05 Tableau de bord indiquant l'état du parc machines
- 06 Tableau de bord des actifs sélectionnés et modes de défaillance associés
- 07 Scénarios envisagés avec les interventions correspondantes et les avantages client

Scénario 2
L'équipement présente ici des signes de dégradation mais pas de défaillance imminente : la solution préconise donc dans l'immédiat un maintien en fonctionnement tout en prévoyant une action dans les deux semaines à venir. Il pourra par exemple s'agir d'analyser le détail des données capteurs et d'intervenir en conséquence. Les algorithmes de diagnostic signalent les dégradations en cause ; la détection d'un défaut d'alignement, par exemple, peut amener le système à préconiser un simple réaligement plutôt qu'un démontage de l'actif de façon à limiter la maintenance au strict nécessaire.

Scénario 3
Dans ce cas, l'actif est visiblement dégradé mais pas au point de devoir être arrêté. Son état justifie dans l'immédiat une étroite surveillance et requiert une action sous deux semaines. Là encore, ce peut être une analyse approfondie des données capteurs, suivie d'une intervention adaptée aux différents modes de défaillance. Les algorithmes de diagnostic signalent les dégradations en cours. Par exemple, la détection de problèmes de pales donne lieu à une préconisation de maintenance impliquant éventuellement de démonter la machine. Le gestionnaire peut ainsi prévoir les pièces de rechange et coordonner les interventions afin de minimiser les temps d'arrêt.

Scénario 4
Ici, l'actif est gravement endommagé et son état risque d'empirer dans les semaines à venir. Toutefois, en l'absence de risque de casse, la solution indique à l'utilisateur « Fonctionnement OK » pour le moment, mais « Action requise » sous deux semaines. Elle préconise d'approfondir l'analyse des données capteurs pour obtenir un diagnostic ultraprécis des défauts qui aidera le gestionnaire à planifier la maintenance, si nécessaire.

Bilan
Le développement de cette solution pilote de maintenance prédictive a fourni des enseignements précieux :

- La préparation des données est un aspect majeur, souvent sous-estimé ;
- Lorsque de nouvelles données sont collectées du terrain à intervalles réguliers, il convient d'accorder un soin particulier à leur cohérence pour tenir compte, par exemple, des cas de déplacement ou de remplacement de capteur ;
- Le traitement et la manipulation de données en temps réel posent des problèmes très spécifiques.

ABB a tenu compte de ces difficultés et, fort de son expertise du domaine enrichie de l'apport de l'apprentissage automatique, a élaboré une solution de suivi d'état fiable et robuste destinée aux machines tournantes non critiques. Les essais en conditions réelles du prototype chez un client ont confirmé que la solution ABB offrait une prédiction fiable des KCI jusqu'à un horizon de deux semaines. •

Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
État actuel Prédiction à 1 semaine Prédiction à 2 sem.	État actuel Prédiction à 1 semaine Prédiction à 2 sem.	État actuel Prédiction à 1 semaine Prédiction à 2 sem.	État actuel Prédiction à 1 semaine Prédiction à 2 sem.
Problèmes de pales Défaut d'alignement Déséquilibre	Problèmes de pales Défaut d'alignement Déséquilibre	Problèmes de pales Défaut d'alignement Déséquilibre	Problèmes de pales Défaut d'alignement Déséquilibre
Préconisation Pas de maintenance préventive sur l'actif en question	Préconisation Consulter le détail de l'actif et les KCI des modes de défaillance	Préconisation Consulter le détail de l'actif et les KCI des modes de défaillance	Préconisations Demander un diagnostic de défauts à ABB Diagnostic ABB Préparer l'intervention (tâches et personnel)
Avantage Allègement du budget maintenance	Avantage Élimination des interventions superflues (p. ex., en cas de défaut d'alignement, pas besoin de déposer l'actif)	Avantage Réduction des temps d'arrêt et des pannes grâce à la planification en amont de la maintenance adéquate	Avantage Planification en amont de la maintenance

07

JUMEAUX NUMÉRIQUES ET SIMULATIONS

Atténuer l'impact d'un arc interne

La formation d'un arc dans un appareillage électrique est un événement rare mais dévastateur. La nouvelle plate-forme de simulation d'arc ABB, qui intègre trois outils de simulation du soufflage des gaz, permet d'évaluer la résistance d'un produit à un arc interne.

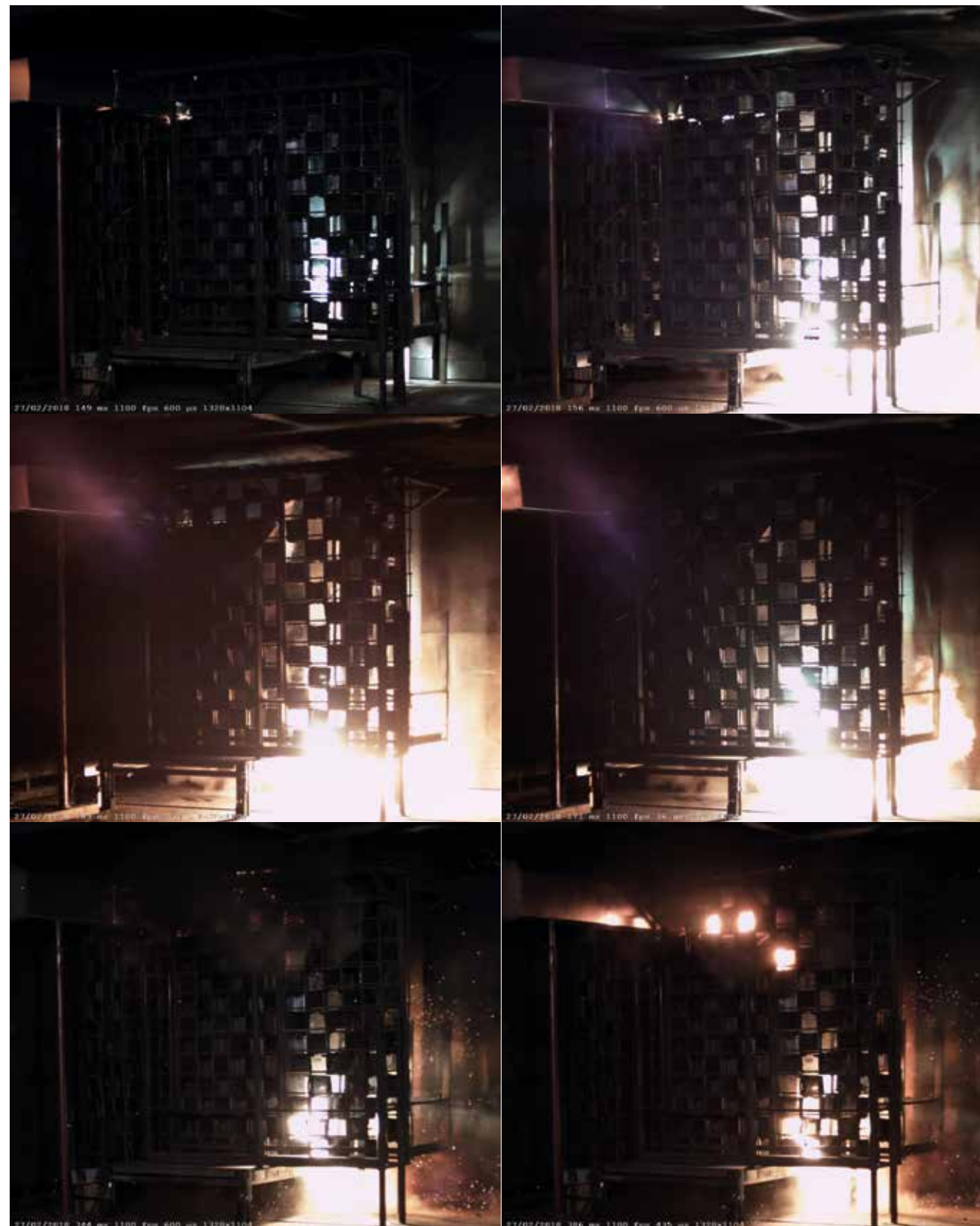
— 01 La nouvelle plate-forme ABB de simulation d'arc interne aide les ingénieurs à minimiser l'impact du défaut électrique.

Les arcs électriques qui se forment accidentellement entre deux conducteurs sous tension véhiculent une grande quantité d'énergie et peuvent générer des plasmas dont la température dépasse largement 10 000 °C. Sous l'effet de la chaleur, ces gaz se dilatent brutalement et provoquent une violente explosion →1.

La simulation numérique des hausses de température et de pression permet d'évaluer la résistance à l'arc interne.

L'énergie dégagée par un défaut d'arc consécutif à une valeur crête de courant de court-circuit de 25 kA pendant un quart de seconde équivaut à l'explosion de 2 kg de dynamite [1] ! Un tel dégagement engendre d'énormes contraintes thermiques et mécaniques qui, en plus d'endommager la structure et l'enveloppe de l'appareillage, mettent en danger le personnel.

La parade consiste à évacuer l'onde de pression dans un caisson d'expansion ou à l'extérieur au moyen de conduits d'échappement. Divers dispositifs de décharge, tels qu'ouvertures de détente, grilles métalliques, volets ou disques d'éclatement,



aident à refroidir et à canaliser le gaz, ainsi qu'à maintenir la pression dans les limites admissibles.

La régulation de pression est un élément indispensable de la résistance aux arcs électriques. La gamme de produits ABB résistants à l'arc est conforme aux normes CEI 62271-200 et IEEE C37.20.7, qui prescrivent des essais de type pour vérifier la tenue aux surpressions et la capacité à évacuer les gaz chauds tout en assurant la sécurité du personnel. Ces tests sont néanmoins très gourmands en temps et en argent.

Simulation numérique

La simulation numérique des hausses de température et de pression permet d'évaluer la tenue aux défauts d'arc. Elle constitue un outil précieux et peu onéreux quand les essais physiques sont irréalisables, par exemple dans les premières phases du développement produit ou pour valider des modifications apportées à une structure en place. La simulation peut aussi servir à identifier les zones où la pression engendrée par l'arc dépasse un seuil critique, ainsi qu'à bien placer et dimensionner les dispositifs de décharge et les conduits d'évacuation. Ces calculs fournissent également les données d'entrée (forces) nécessaires à l'analyse mécanique pour évaluer le risque de dommages structurels consécutifs à l'arc et procéder à un essai virtuel.

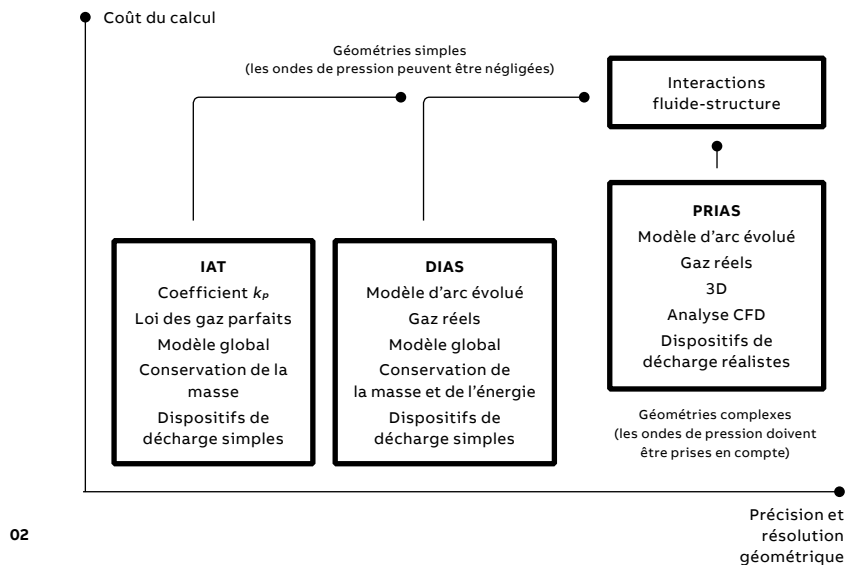
Le CIGRÉ [1] préconise à cette fin différents modes de calcul des processus physiques à l'œuvre dans un défaut d'arc interne, par modélisation (simple ou avancée) ou simulation numérique des écoulements (CFD). Si ces méthodes ont en commun d'utiliser en entrée les valeurs de tension et d'intensité du défaut d'arc, elles divergent en complexité calculatoire, en capacité de prédiction et en temps

— **Marley Becerra**
Ulf Sand
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

marley.becerra@
se.abb.com
ulf.sand@se.abb.com

— **Jörg Lehmann**
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)

joerg.lehmann@
ch.abb.com



02

- de simulation, qui sont fonction des diverses hypothèses simplificatrices retenues :
- Représentation de l'arc : un défaut d'arc interne s'apparentant généralement à une simple source de chaleur, on utilise comme paramètre empirique le coefficient k_p qui représente la fraction nette de l'énergie d'arc contribuant directement à l'élévation de pression [1]. La modélisation de l'arc peut aussi se baser sur les sources d'énergie et de masse de divers processus physiques (rayonnement, vaporisation de métal, entre autres) ;
 - Thermodynamique des gaz : on peut supposer ces propriétés constantes ou variables selon la température et la pression, en s'appuyant sur les valeurs réelles mesurées ;
 - Géométrie : les compartiments de décharge du gaz peuvent être considérés, au choix, comme des espaces sans dimension, à constantes localisées ou à trois dimensions (3D), ce dernier reproduisant la géométrie effective de l'appareil ;
 - Analyse des écoulements : le calcul peut faire appel aux équations de conservation de l'énergie et de la masse moyennes dans les volumes (négligeant alors l'impact des ondes de pression), ou à la CFD, pour une résolution spatiale plus fine ;
 - Dispositifs de décharge : ils sont soit représentés sous la forme de simples ouvertures au coefficient de débit connu, soit modélisés par CFD en tenant compte de la résistance réelle à l'écoulement (qui inclut aussi le mouvement de rotation ou de translation des volets et disques d'éclatement).

Pour répondre à la diversité des besoins de ses ingénieurs et clients (précision, résolution géométrique, coût de calcul), ABB a développé trois outils de simulation : IAT (*Internal Arc Tool*),

ABB a développé trois outils de simulation offrant des niveaux variés de précision, de résolution géométrique et de coût de calcul.

DIAS (*DymoDAT-based Internal Arc Simulation*) et PRIAS (*Pressure Rise in Internal Arc Simulation*), synthétisés en →2 et présentés plus en détail dans la suite de cet article. Tous permettent d'évaluer l'impact des défauts d'arc interne dans une large palette d'applications, qu'il s'agisse d'effectuer des calculs rapides en vue d'une soumission pour un appareillage ou un poste électrique, de rechercher les causes d'incidents d'arc dans une installation existante, ou encore de développer un nouveau produit.

Simulation avec IAT

Ce logiciel de simulation rapide utilise un modèle d'arc interne simple basé sur le coefficient de transfert thermique k_p [2]. Il s'agit d'un exécutable à installer sur n'importe quel ordinateur tournant sous Microsoft Windows. Il suffit à l'utilisateur de renseigner les champs de texte de l'interface graphique pour paramétrer le modèle, puis lancer la simulation, qui s'exécute en quelques dizaines de secondes. L'outil a été validé pour les défauts d'arc interne dans l'air et dans le SF₆.

Les simplifications apportées influent toutefois sur la précision et la capacité de prédiction des calculs, notamment pour des températures supérieures à 6000 K dans l'air et à 2000 K dans le SF₆. Les calculs à constantes localisées n'étant pas capables de

02 Principales caractéristiques des outils de simulation d'arc ABB

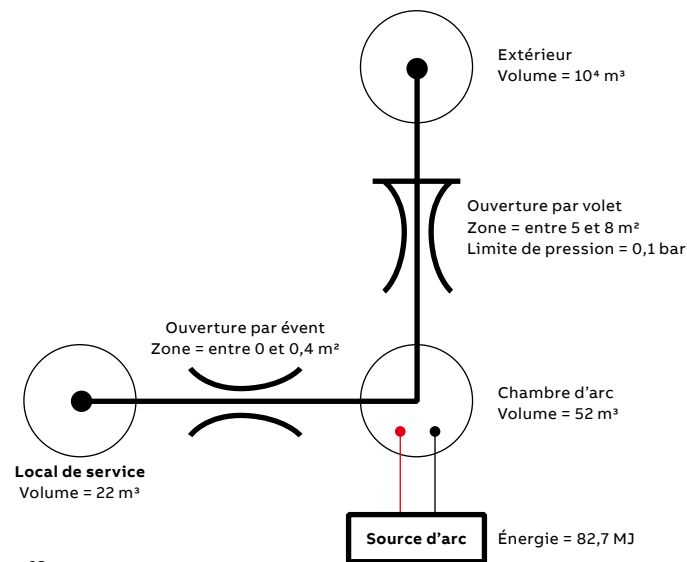
03 Représentation des volumes et zones de décharge de pression dans DIAS

La simulation PRIAS tient compte du déplacement des ondes de pression, condition indispensable à une évaluation précise des écoulements.

résoudre le mouvement des ondes de pression dans l'espace, on utilise plutôt des valeurs moyennes. IAT n'est donc guère adapté au calcul du trajet des ondes de pression le long des conduits d'évacuation ou autre tubulure, ni à celui du mouvement des volets de décharge et disques d'éclatement.

Simulation avec DIAS

DIAS est un outil de simulation rapide qui utilise un modèle à constantes localisées amélioré avec conservation de la masse et de l'énergie. Il s'appuie sur l'outil DymoDAT d'ABB pour décrire la hausse de pression occasionnée par les manœuvres de disjoncteurs haute tension [3]. DIAS se distingue par un modèle d'arc évolué, spécialement développé par ABB, qui inclut les modèles physiques des principaux effets en jeu, comme l'érosion des électrodes. L'outil dispose également d'un modèle réaliste du gaz ou du plasma, qui lui permet de tenir compte des réactions exothermiques à l'interface entre le matériau des électrodes et le gaz [4].



03

Par conséquent, le coefficient k_p n'est pas nécessaire et la description des propriétés de gaz sur une large plage de températures et de pressions est satisfaisante. L'approximation de l'écoulement fluide entre les différents compartiments de l'appareil s'appuie sur les relations classiques de la thermodynamique des gaz et peut être corrigée par les zones d'écoulement effectivement réduites. On tient compte de la dynamique des volets et disques en stipulant une durée d'ouverture, après atteinte d'un seuil de surpression donné →3.

La simulation DIAS a besoin de la solution commerciale Dymola, qui fournit aussi l'interface graphique pour la création des modèles et l'analyse des résultats. Elle prend environ une seconde sur un ordinateur classique. DIAS a vu ses prédictions validées pour un large éventail de défauts d'arc dans des appareillages de coupure à l'air et au SF₆ équipés d'électrodes en cuivre ou en aluminium.

Simulation avec PRIAS

PRIAS est un outil CFD aussi précis que complexe. Il vient en renfort d'IAT et de DIAS lorsqu'il faut résoudre l'ensemble des paramètres fluidiques dans le temps et les trois dimensions. Il autorise une évaluation précise des écoulements en tenant compte du mouvement des ondes de pression, ce que ne permet pas une description à constantes localisées. Cet outil ABB prend la forme d'un jeu de scripts exécutés sur le logiciel CFD tiers ANSYS/Fluent sous Linux. À la différence de IAT et DIAS, PRIAS a besoin d'une description détaillée de la géométrie et des dispositifs de décharge pour générer le maillage CFD nécessaire aux calculs ANSYS/Fluent. Pour l'heure, ses prédictions ne sont validées que pour les arcs dans l'air.

La simulation PRIAS, qui exige une grappe de calculateurs haute performance, dure habituellement moins de deux jours ; toutefois, son déroulement complet (préparation, paramétrage, exécution) est l'affaire de plusieurs jours, voire de semaines. C'est pourquoi l'outil est réservé aux simulations pointues de configurations complexes, pour lesquelles la précision de calculs globaux ne suffit pas ou le comportement des dispositifs de décharge n'est pas connu à l'avance. Autre champ d'action : les pièces de grande longueur, comme les conduits d'évacuation, ou volumineuses, surmontées de plusieurs dispositifs de décharge qui obligent à tenir compte de l'impact de la propagation des ondes de pression. Dans pareils cas, PRIAS peut aussi servir aux simulations complexes d'interactions fluide-structure, indispensables pour évaluer les dégâts mécaniques consécutifs à l'arc. Les figures →4,5 illustrent une simulation PRIAS d'appareillage moyenne tension isolé dans l'air avec déplacement des disques d'éclatement.

Plate-forme collaborative ABB

Afin de fluidifier les échanges entre ses différents services concernés par la simulation d'arc (développement, utilisation, archivage, etc.), ABB a créé un site SharePoint. Cette plate-forme dédiée, gérée par des experts de la discipline, assure également la coordination des prestataires de service et des équipes de développement logiciel.

Étude de cas

Une étude approfondie de la montée en pression et de l'impact structural d'un défaut d'arc dans le redresseur de la ligne d'électrolyse 6 de l'usine Aluminium Bahrain (ALBA) a été menée en 2016. Il s'agissait d'améliorer la conception de l'appareil, notamment les caractéristiques et le positionnement des dispositifs de décharge. Principal objectif : optimiser la conception structurelle de l'armoire redresseur afin de la rendre résistante aux arcs grâce à une évacuation efficace des surpressions vers l'extérieur.

Des simulations DIAS ont fourni une première estimation grossière des zones d'ouverture des disques d'éclatement, sans entrer dans le détail de la géométrie ni des écoulements dans l'armoire redresseur.

PRIAS a ensuite pris le relais en intégrant les conditions détaillées d'écoulement et de pression dans les chambres d'arc et locaux de service du redresseur. Ces calculs ont permis de déterminer le nombre de disques et leur emplacement de façon à minimiser les surpressions →5.

Les retours d'expérience ont montré que les valeurs de surpression calculées coïncident avec celles mesurées au cours d'un essai d'arc interne sur un même appareil.

Pour finir, une simulation 3D par éléments finis sous ABAQUS a évalué l'intégrité structurelle de l'ensemble à partir des calculs PRIAS de pression et de force sur les surfaces et parois. Ont ainsi été étudiés divers aspects de la réponse structurelle de l'appareil au défaut d'arc : déformation des parois →6, contraintes exercées sur les composants plastiques, les soudures et les jonctions.

Bibliographie

[1] GT A3.24 du CIGRÉ, « Tools for simulation of the internal arc effects in HV and MV switchgear », *Electra*, 2015.

[2] Dullni, E., et al., « Avancée détonante », *ABB Review*, 3/2013, p. 54–59.

[3] Lehmann, J., et al., « A Modelica library for High-Voltage AC Circuit-Breaker Modeling », *Proceedings of the 7th International Modelica Conference*, Côme (Italie), p. 855-860, 20-22 septembre 2009.

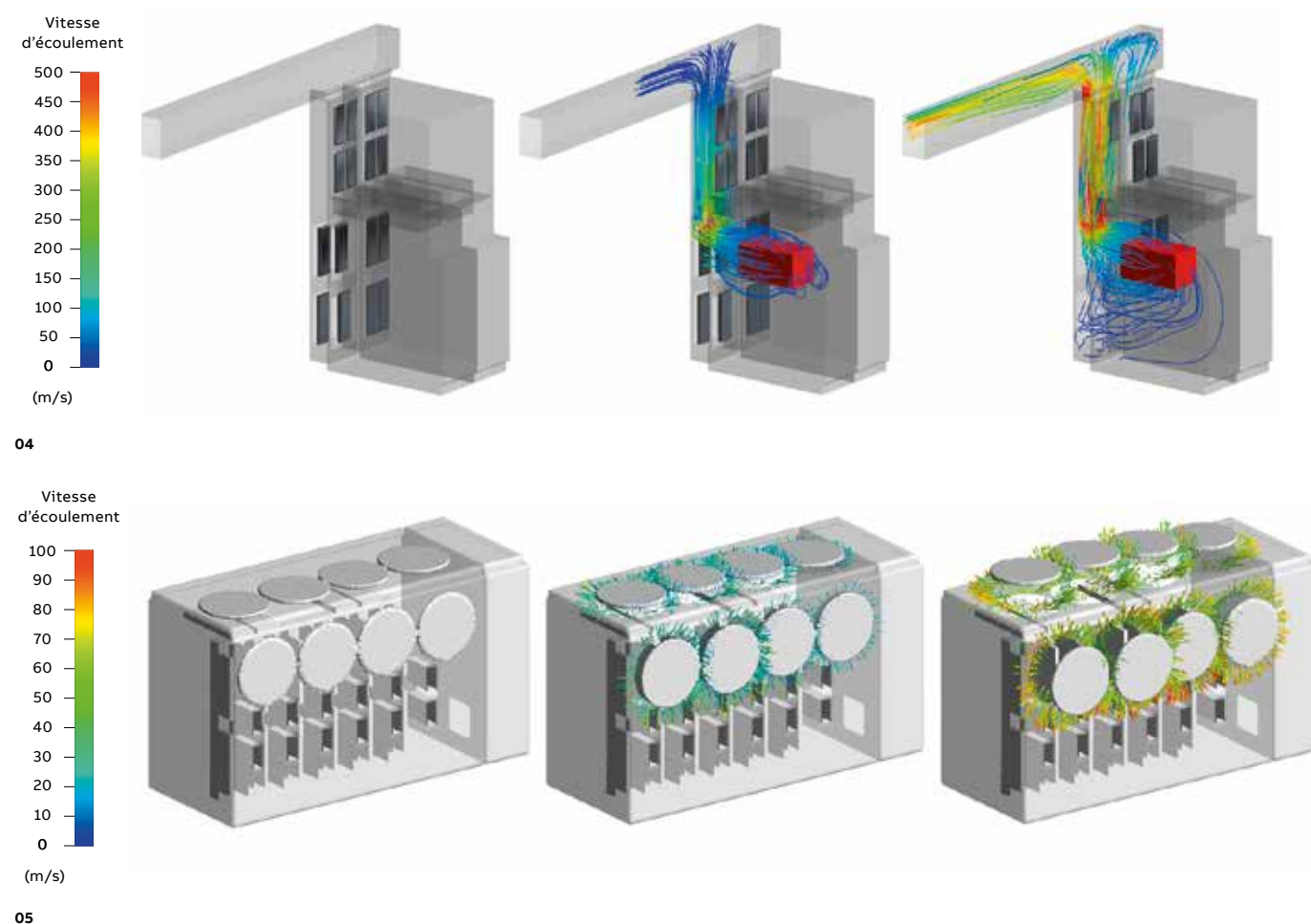
[4] Doiron, C., Hencken, K., « Calculation of thermodynamic and transport properties of thermal plasmas based on the Cantera software toolkit », *Proceedings of the XXII Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases*, Greifswald (Allemagne), 15–19 juillet 2014.

Rapidité et efficacité

Pour rare que soit un arc électrique, il peut avoir des conséquences gravissimes, voire mortelles. Les outils de simulation ABB aident à concevoir les enveloppes des appareils électriques sujets aux arcs internes de façon à réduire considérablement l'impact de ces incidents. Ils ont par exemple permis d'optimiser la conception d'une armoire redresseur ainsi que le dimensionnement d'un dispositif de décharge de pression. Les retours d'expérience ont montré que les calculs de surpression coïncidaient avec les mesures effectuées lors d'un essai d'arc interne sur le même appareil. L'avantage financier n'est pas le moindre des arguments en faveur de la plate-forme ABB : dans un cas, simuler l'élévation de la pression consécutive à un arc interne dans un appareil sous pression s'est avéré vingt fois moins cher qu'un essai en conditions réelles.

Dans un cas, simuler l'élévation de la pression consécutive à un arc interne dans un appareil sous pression s'est avéré vingt fois moins cher qu'un essai en réel.

La solution contribue aussi à raccourcir notablement les délais de développement. Un client devant arbitrer entre une remise à plat d'un appareil ou l'amélioration de son exécution a ainsi pu économiser des centaines de milliers de dollars. Enfin, elle vient appuyer en un temps record la démonstration auprès d'un client de l'intérêt et de l'efficacité de telle ou telle conception d'armoire, d'enveloppe ou de local. •

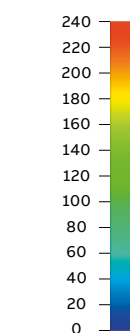


04 Simulation PRIAS des champs de vitesse d'écoulement à l'intérieur d'un appareillage de coupure, à trois moments différents

05 Simulation PRIAS détaillée des volets de décharge du redresseur, à trois moments différents

06 Simulation des déformations structurelles au moment du pic de pression induit par l'arc, à partir de la distribution de pression calculée par PRIAS (moyenne en surface)

Déformation (mm)
(176 mm maxi)



06

Productivité



Un produit conçu sur mesure est par définition dénué d'historique éclairant ses objectifs de performances : tout le contraire de l'efficacité et de la fiabilité industrielle ! Avec les procédés modulaires, par contre, les ingénieurs ont à leur disposition de solides blocs de construction qui réduisent nettement la durée et la variabilité des processus de développement, en particulier des systèmes automatisés. Une avancée dont ABB se fait l'ardent partisan.

72 Automatisation modulaire des procédés : concept et développement

AUTOMATISATION MODULAIRE DES PROCÉDÉS : 1^{RE} PARTIE

Concept et développement

ABB s'est associé à des industriels et des universitaires pour mettre au point une nouvelle architecture d'automatisation. Adaptée à l'industrie des procédés, elle se distingue de l'automatisation monolithique traditionnelle par une construction modulaire, orientée fonctions. *ABB Review* en expose ici les principes fondamentaux, avant d'en décrire les applications pilotes dans un prochain article.



—
01 La complexité des usines de transformation modernes impose de nouvelles règles d'ingénierie et d'exploitation. L'approche modulaire surmonte bien des inconvénients de l'automatisation des procédés continus.

—
02 Flux de développement d'un procédé modulaire

—
03 Architecture du système d'automatisation modulaire ABB

—
Katharina Stark
Mario Hoernicke
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

katharina.stark@de.abb.com
mario.hoernicke@de.abb.com

—
Axel Haller
ABB Automation GmbH
Industrial Automation
Mannheim (Allemagne)

axel.haller@de.abb.com

—
Ralf Jeske
ABB Automation GmbH
Industrial Automation
Minden (Allemagne)

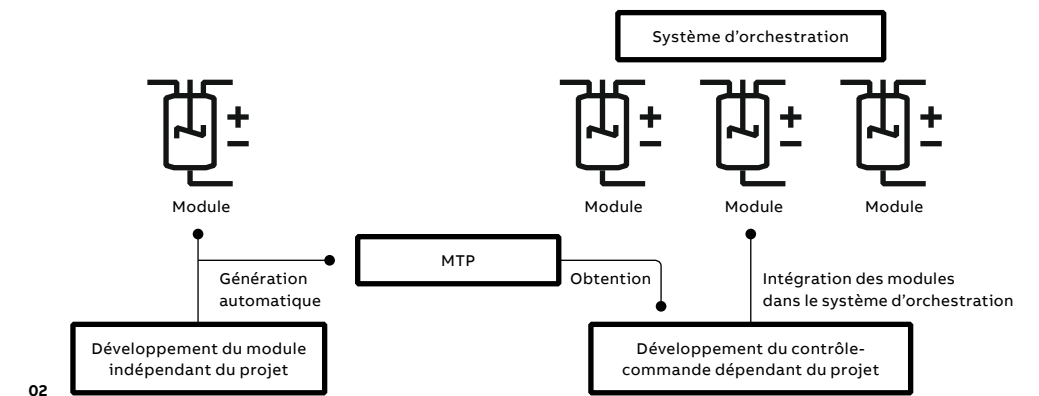
ralf.jeske@de.abb.com

—
Henry Bloch
Alexander Fay
Université Helmut-Schmidt de Hambourg
Hambourg (Allemagne)

—
Alexander Wittenbrink
INVITE GmbH
Leverkusen (Allemagne)

—
Torsten Knohl
Bayer AG
Leverkusen (Allemagne)

—
Stephan Hensel
Leon Urbas
Anna Menschner
Université technique de Dresde
Dresde (Allemagne)



Depuis 2014, le groupe ABB est membre d'un consortium réunissant le géant de la chimie et de la pharmacie Bayer, l'université technique de Dresde, la société INVITE (fruit d'un partenariat public-privé entre l'université technique de Dortmund et Bayer Technology Services GmbH) ainsi que l'université Helmut-Schmidt de Hambourg →5 pour travailler sur la modularisation des procédés continus.

Contrairement aux sites de fabrication traditionnels, les usines modulaires →1 ne consistent pas en une multitude d'entrées/sorties commandées par un automate central mais en de petits blocs de construction embarquant des fonctions « intelligentes » programmables, à l'image des logiciels orientés objet ou service. Mais qui dit nouvelle architecture d'automatisation implique de nouveaux principes de génie automatique et d'exploitation.

La modularisation promet de lever les obstacles auxquels se heurte la production continue.

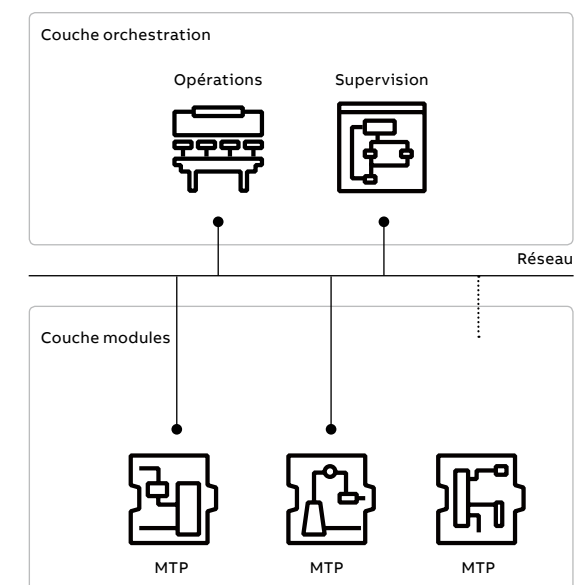
Tel est l'enjeu des recherches menées par ABB et ses partenaires, dont nous dressons ici un premier bilan. Les applications pilotes feront l'objet d'un second article publié dans un prochain numéro d'*ABB Review*.

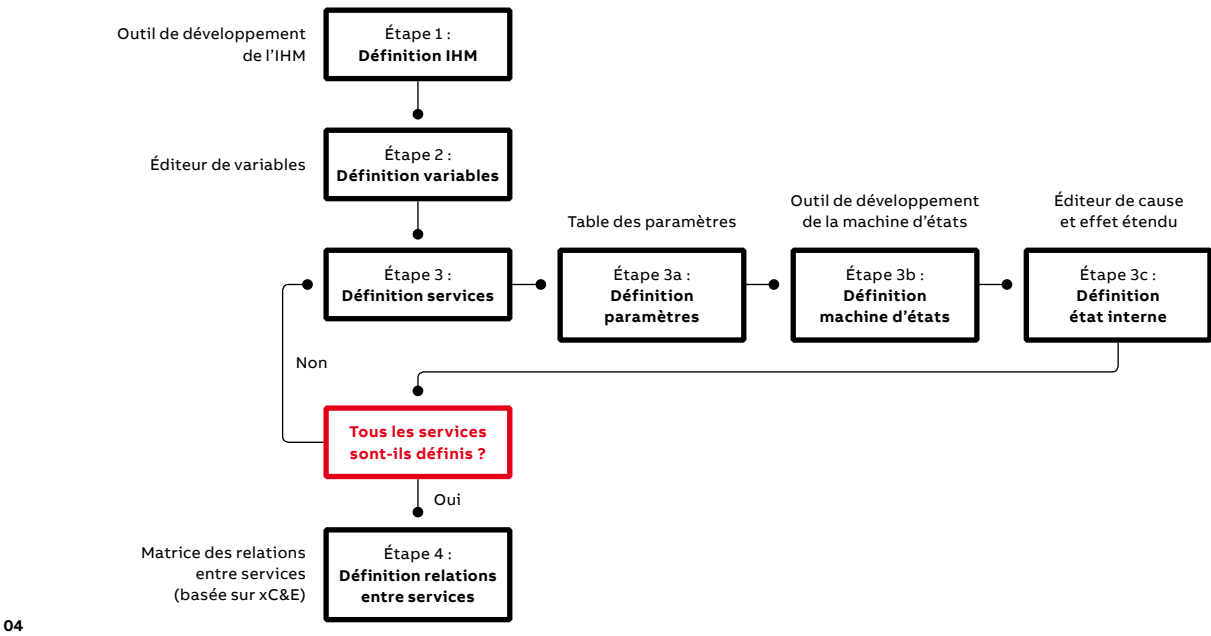
Quid des procédés modulaires ?

La modularisation des procédés promet de relever le double défi de l'usine du futur, à savoir une flexibilité accrue de la production et l'interopérabilité des actifs. D'où la constitution en Allemagne de plusieurs groupes d'étude au sein de la NAMUR (association internationale d'utilisateurs de technologie d'automatisation dans l'industrie de transformation) qui ont travaillé avec la ZVEI (fédération des

professionnels de l'automatisation) pour établir les exigences et principes directeurs de la production modulaire. Ces travaux [1] ont débouché sur la définition d'un sous-système de contrôle-commande « MTP » (*Module Type Package*) qui assure l'intégration transparente d'unités pré-automatisées autonomes, ou « modules de procédé », au système de commande de niveau supérieur, ou « système d'orchestration » →2.

Concrètement, MTP décrit les interfaces de communication entre les automatismes modulaires et ce système d'orchestration, mais aussi les modules eux-mêmes ainsi que leurs fonctionnalités et services intégrés. Il contribue pleinement à alléger l'effort de développement de nouveaux projets.





04

Portée du projet de recherche

Chaque partenaire du consortium s’est chargé d’un volet spécifique : les universités ont d’abord sélectionné les technologies et développé les fondamentaux de l’automatisation modulaire, socle conceptuel sur lequel s’est appuyé ABB pour mettre au point un prototype intégré à sa plate-forme d’automatisation étendue 800xA et son système de contrôle-commande décentralisé Freelance. En collaboration avec INVITE, le prototype a ensuite servi à une application pilote implantée chez Bayer pour démontrer la conformité de tous les concepts aux spécifications normatives.

En enchaînant correctement ces services pour accomplir la tâche requise, les modules intégrés répondent aux exigences d’interopérabilité et d’évolutivité de l’usine.

Le prototype a débouché sur la réalisation d’un produit directement exploitable par un système d’automatisation modulaire [2]. Les prescriptions des groupes d’études NAMUR, ZVEI et VDI/VDE ont donné lieu aux recommandations VDI/VDE/NAMUR 2658, qui spécifient le sous-système MTP [3–5].

Architecture

Un système d’automatisation modulaire se compose d’une « couche de modules », matérialisée par un petit contrôleur d’automatismes exécutant la logique de chaque module de procédé, et d’une « couche d’orchestration » qui intègre et fédère ces unités modulaires au sein de l’usine. Chaque couche a des systèmes d’automatisation différents. Un réseau interconnecte ces deux niveaux →3.

Les modules de procédé se distinguent des blocs d’E/S de l’industrie classique par un ensemble de fonctions logicielles encapsulées, ou « services », orchestrées par un système de supervision, chacune décrivant une opération du procédé (mélange, refroidissement, chauffage, etc.). En enchaînant correctement ces services pour accomplir la tâche requise, les modules intégrés répondent aux exigences d’interopérabilité et d’évolutivité de l’usine.

La démarche de développement est elle aussi différente. On commence par concevoir et décrire les types de modules pour ensuite les intégrer au système de supervision, avec la possibilité de créer des instances. La réutilisation des modules de même type écourte nettement la phase de développement →6.

04 Démarche de développement préconisée pour un module

05 L’université Helmut-Schmidt de Hambourg est l’un des partenaires d’ABB au sein d’un projet de modularisation des procédés continus. (Photo reproduite avec l’aimable autorisation de l’université)

06 Pouvoir réutiliser des modules de même type écourte nettement le développement des systèmes d’automatisation de la production continue.



05

L’interface MTP facilite l’intégration : si l’application pilote n’utilise pour l’instant que des composants ABB, il sera possible d’ajouter des modules tiers, en totale conformité avec les recommandations VDI/VDE/NAMUR 2658, parties 1–3.

La couche modules et la couche orchestration communiquent sous protocole standard OPC UA. Chaque module embarque un serveur OPC UA qui soumet les services et variables du module au superviseur connecté en amont ; ce dernier (client OPC UA) utilise le serveur du module pour envoyer ses ordres.

La réutilisation des modules de même type écourte nettement la phase de développement.

La couche modules se limitant à une poignée d’E/S décentralisées, elle peut se contenter d’un petit contrôleur de type ABB Freelance AC700F ou Système X20 de B&R Industrial Automation, par exemple.



06

La couche orchestration met en œuvre la plate-forme d’automatisation 800xA d’ABB, qui constitue pour l’instant le système de visualisation et de supervision de l’usine modulaire. Les futurs développements de la spécification MTP l’enrichiront sans peine de nouvelles fonctionnalités, comme la gestion des alarmes et événements, le traitement des informations et historiques, etc.

Couche de modules

Elle englobe les fonctions dont a besoin le procédé pour accomplir sa tâche. L'ingénieur procédé commence par sélectionner et assembler les différents types de modules nécessaires à l'application, qui sont développés suivant la méthode standardisée VDI/VDE/NAMUR [3–6], indépendamment du fournisseur. Puis il choisit le système d'automatisation.

Développement

Le développement des types de modules prend en compte les différents aspects de la spécification MTP. Les prescripteurs VDI/VDE/NAMUR ont à ce jour défini (en partie) :

- la communication avec un module [3] ;
- les interfaces homme-machine des modules [4] ;
- les variables et types de données [5] ;
- les services [6].

D'autres aspects sont à l'étude, comme la gestion d'alarmes, le traitement et le stockage sécurisés

des données, etc., auxquels devraient pouvoir s'appliquer les directives de cette première série de recommandations.

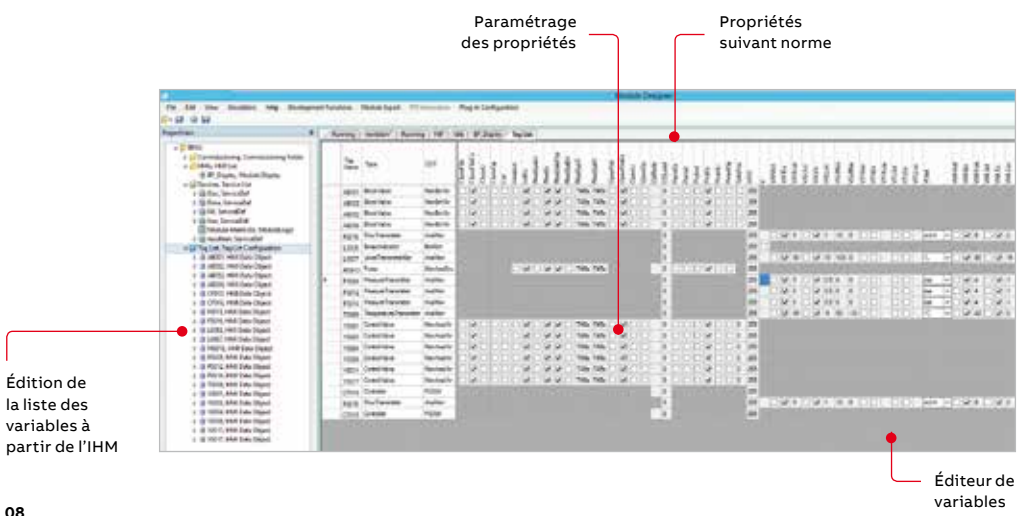
Le développement préconisé se déroule en quatre étapes, selon une approche descendante →4. Il prend le contre-pied de la méthode traditionnelle en commençant par définir l'IHM.

D'autres thématiques viendront enrichir les recommandations VDI/VDE/NAMUR, comme la gestion d'alarmes et la sécurité.

Celle-ci se compose de symboles et de lignes permettant de visualiser les équipements et le synoptique de production →7. La déclaration et le nommage des symboles génèrent automatiquement la liste des variables et des

— 07 Éditeur d'interface homme-machine

— 08 Éditeur de variables



08

Bibliographie

[1] Bernshausen, J., *et al.*, « NAMUR Module Type Package – Definition », 1^{re} édition, 58(1–2), p. 72–81, 2016.

[2] ABB launches world's first commercial modular enabled process automation solution, disponible sur : <https://new.abb.com/news/detail/5035/abb-launches-worlds-first-commercial-modular-enabled-process-automation-solution>.

[3] Recommandation VDI/VDE/NAMUR 2658, partie 1 : « Automation Engineering of Modular Systems in the Process Industry – General concept and interfaces », janvier 2018.

[4] Projet de recommandation VDI/VDE/NAMUR 2658, partie 2 : « Automation Engineering of Modular Systems in the Process Industry – Modelling of HMI's ».

[5] Projet de recommandation VDI/VDE/NAMUR 2658, partie 3 : « Automation Engineering of Modular Systems in the Process Industry – Base library ».

[6] Projet de recommandation VDI/VDE/NAMUR 2658, partie 4 : « Automation Engineering of Modular Systems in the Process Industry – Services ».

équipements process. Une fois l'IHM créée et la liste des variables complète, le paramétrage de toutes les variables requises →8 s'effectue à l'aide d'un éditeur dédié, comme pour une usine classique.

Vient ensuite la définition des services associés au type de module, chaque service remplissant une fonction. Un module peut ainsi embarquer un ou plusieurs services pour accomplir une ou plusieurs étapes ou sous-étapes du procédé.

Cette méthodologie permet de réaliser un programme automate pleinement fonctionnel sans effort manuel.

Ces informations permettent de générer automatiquement la logique automate du système cible (dans notre cas, Freelance) et l'interface MTP.

En l'occurrence, ce sont plusieurs portions de code qui peuvent être importées dans un projet Freelance et immédiatement chargées dans l'automate de destination.

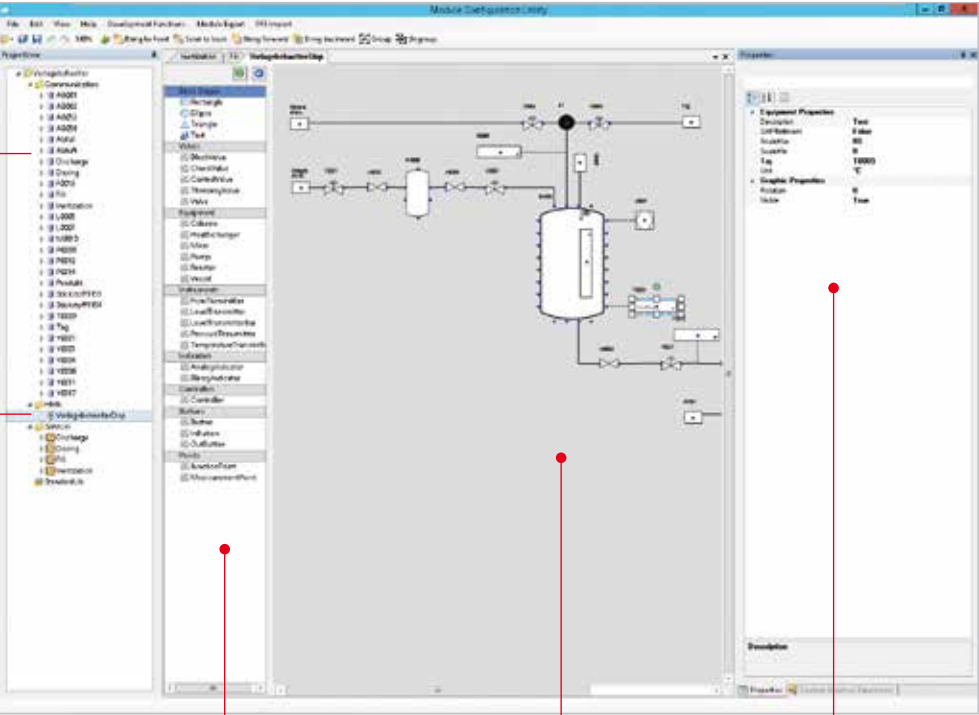
De cette définition des services sont déduites les fonctions logiques de Freelance. Chaque service génère une machine d'état qui implémente les états définis dans l'éditeur. Pour définir la logique exécutée dans chaque état, un éditeur de cause et effet (xC&E) étendu permet de déterminer le comportement du service.

La logique d'état est automatiquement générée et immédiatement exécutable après importation, sans autre intervention manuelle. L'IHM du module apparaissant dans la couche orchestration, il est inutile de créer une IHM pour le système d'automatisation des modules ; celui-ci se contente de piloter l'équipement et les services.

Cette méthodologie permet d'élaborer un programme automate pleinement fonctionnel sans effort manuel.

Perspectives

Les méthodes et outils présentés ici simplifient grandement la tâche des développeurs. Ce projet a fourni des données précieuses pour standardiser la méthodologie MTP. Les logiciels résultants faciliteront la modularisation des systèmes d'automatisation qui équipent de grands pans de l'industrie. Le dossier n'est pas clos ; bien d'autres questions sont à l'étude, comme la gestion des alarmes et des historiques, la commande avancée, la communication transversale entre modules, la gestion des changements, la simulation et la conduite de tests de production modulaire, etc. Autant de briques technologiques pour édifier l'usine du futur. ●



07



LE MOT DU MOMENT

Cloud, edge et fog

Entre *cloud* et *edge*, voici le *fog computing*, sujet de cette huitième édition du « Mot du moment » et au cœur de la plate-forme numérique ABB Ability™.



Christopher Ganz
Group Technology
Management
Zurich (Suisse)

christopher.ganz@ch.abb.com

Il fut un temps où l'informatique industrielle était implantée directement dans les capteurs et commandes (contrôleurs d'automatismes, robots, etc.) du procédé, qui devaient pour cela embarquer une grande puissance de calcul. L'avènement du

La plate-forme ABB Ability permet de mettre en œuvre des solutions numériques complexes en périphérie de réseau.

cloud a permis de déporter cette « intelligence » dans des datacenters haute performance et de réduire les besoins locaux. Une migration accélérée par l'explosion de l'informatique nomade, avec notamment les tablettes et smartphones, certes plus mobiles mais limités en capacités de stockage et de gestion de données.

Pour autant, le transfert massif des données et traitements vers le cloud n'est pas toujours pertinent. Qui dit déport, dit en effet temps de latence et donc retard potentiel dans la manœuvre des actionneurs pilotés par les données capteurs. Cela éloigne également la commande, au détriment de la sécurité et la stabilité du procédé. Enfin, la forte volumétrie des données transférées

consomme beaucoup de bande passante, sans garantie de confidentialité.

Autant d'arguments qui plaident en faveur d'une intelligence ramenée en périphérie de réseau, ou « *edge computing* ». Mais n'est-ce pas tout bonnement revenir à l'informatique « pré-cloud » ? En aucun cas, car il s'agit d'une informatique locale dans un environnement cloud →1.

ABB Ability

Élément central de la stratégie numérique d'ABB, la plate-forme ABB Ability englobe par définition tous les composants numériques d'une entreprise, de l'appareil au cloud, en passant par le système d'automatisation et les logiciels de production et de gestion. Elle fournit les ressources permettant de mettre en œuvre des solutions numériques complexes en bordure de réseau, moyennant des automatismes ABB, et de les coupler aux outils d'optimisation de l'atelier. Il est également possible de relier ces offres au cloud pour accroître la collaboration au sein de l'écosystème informatique du client.

Avantages cloud

Le choix entre *edge* et *cloud* s'opère parfois dès la conception. L'évolutivité est un critère déterminant : le cloud marque ici des points en termes de partage d'infrastructure, de mutualisation d'équipements

01 Orange Box de B&R (société du groupe ABB), présentée à la Foire de Hanovre 2017. Ce dispositif périphérique permet de collecter et d'analyser les données d'énergie et de process générées par n'importe quelle machine ou ligne de production non connectée, et de les adapter facilement à l'usine 4.0. L'automate récupère ces données opérationnelles par ses canaux d'E/S ou une liaison bus de terrain. Des composants logiciels intelligents en déduisent le taux de rendement synthétique et d'autres indicateurs de performance, qu'ils affichent et partagent avec des systèmes de niveau supérieur via OPC UA.

02|2019



01

ou de fourniture de logiciels à la demande (mode SaaS). Les ressources informatiques s'adaptent en dynamique à l'entreprise : un vrai plus lorsque les besoins de calcul sont très variables ! Le travail collaboratif, qui implique un ample partage des données entre organisations, fait aussi pencher la balance en faveur du cloud.

La combinaison de fonctionnalités hébergées dans ce dernier et d'une installation en périphérie de site fait « descendre » le cloud et son cortège d'avantages dans l'usine. Elle donne aussi naissance à un modèle opérationnel mixte, qui met le cloud au service des composants de l'outil industriel, ces derniers pouvant par exemple se charger en local du calcul des comparatifs de performance et passer le relais au nuage pour l'analyse, la comparaison et la visualisation. Le client fournit les données et reçoit les résultats sous forme de service. Idem pour l'analyse et l'optimisation.

Et le fog ?

Certaines tâches peuvent s'exécuter aussi bien dans le nuage qu'en périphérie de réseau. La portabilité logicielle entre cloud et edge doit être totale, avec des fonctionnalités proposées à distance ou en local. L'infrastructure sur site est alors un cloud de périphérie, également appelé « brouillard informatique ». Vous y voyez plus clair ? •

LE MOT DU MOMENT

79

Publication ABB

Rédaction

Bazmi Husain
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams
Senior Sustainability
Advisor

Christoph Sieder
Head of Corporate
Communications

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation

Roland Weiss
R&D Strategy Manager
Group R&D and Technology

Andreas Moglestue
Chief Editor, ABB Review
andreas.moglestue@ch.abb.com

Éditeur

ABB Review est publiée
par ABB Group R&D and
Technology.

ABB Switzerland Ltd.
ABB Review
Segelhofstrasse 1K
CH-5405 Baden-Dättwil
Suisse
abb.review@ch.abb.com

ABB Review paraît quatre
fois par an en anglais,
français, allemand et
espagnol. La revue est
diffusée gratuitement à
tous ceux et celles qui s'in-
téressent à la technologie
et à la stratégie d'ABB.

Pour vous abonner,
contactez votre
correspondant ABB
ou souscrivez en ligne
sur www.abb.com/abbreview.

L'impression ou la repro-
duction partielle d'articles
est autorisée sous réserve
d'en indiquer la source.
La reproduction d'articles
complets requiert l'autori-
sation écrite de l'éditeur.

Édition et droits
d'auteur ©2019
ABB Switzerland Ltd.
Baden (Suisse)

Impression

Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn (Autriche)



Maquette

Publik. Agentur für
Kommunikation GmbH
Ludwigshafen (Allemagne)

PAO

Konica Minolta
Marketing Services
WC1V 7PB Londres
(Royaume-Uni)

Traduction française

Cléa Blanchard
clea.blanchard@gmail.com

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

abb.com/abbreview

Fin de la version mobile

La publication d'ABB
Review sur tablette (iOS
et Android) s'est arrêtée
fin 2018. Nos lecteurs
sont invités à consulter les
versions PDF ou en ligne
disponibles sur abb.com/abbreview.

Gardez le contact

Pour ne pas manquer un
numéro, abonnez-vous
à la liste de diffusion sur
abb.com/abbreview.



Dès votre demande
enregistrée, vous
recevrez un e-mail
vous invitant à confirmer
votre abonnement.

Dans le numéro 03/2019

Systemes autonomes

Si l'usine est souvent le premier terreau du futur, le progrès n'y germe pas d'un bloc, du jour au lendemain, mais s'y sème graduellement, par petites touches. Internet industriel des objets, usine numérique, cloud, production autonome, informatique de périphérie, apprentissage automatique, intelligence artificielle : autant d'innovations qui s'enrichissent et se complètent pour nourrir le progrès. Le prochain numéro se penchera sur ces avancées et leurs applications temps réel.