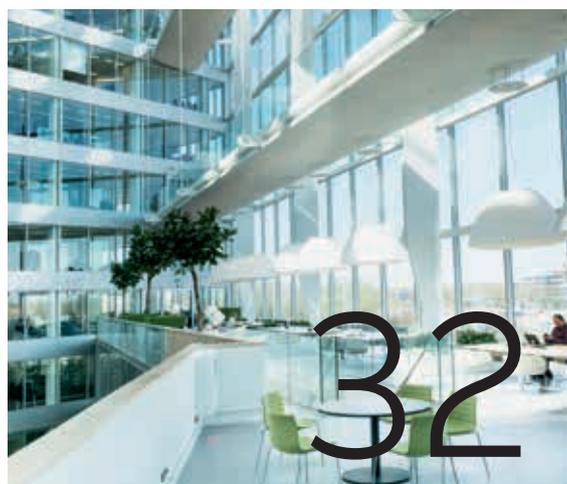


# review

Innovation

01|2017 fr



- 
- 08–17 Innovations ABB
  - 18–37 Protection et sécurité
  - 38–51 Mesure
  - 52–67 Service et fiabilité



09

Mesure de niveau sans contact par transmetteur laser LLT100



46

50 ans de contrôle de planéité



34

Isolation sèche pour traversées-condensateurs



Le plein de soleil pour des lendemains qui chantent





## Concevoir des alternateurs fiables



## Moderniser pour durer



## 05 Éditorial

---

### Innovations

- 08 À la une de l'innovation ABB 2017
- 16 Entretien : la révolution numérique

---

### Protection et sécurité

- 20 Emax 2 et Arc Guard System™ TVOC-2
- 25 La CEI 61850 en basse et moyenne tension
- 32 Éclairage d'urgence Guideway
- 34 Isolation sèche pour traversées-condensateurs

---

### Mesure

- 40 Mesure d'épaisseur de métaux non ferreux
- 46 50 ans de contrôle de planéité

---

### Service et fiabilité

- 54 Moderniser pour durer
- 60 Alternateurs pour puissance variable
- 65 Convertisseurs à IGBT pour locomotives Re460
  
- 69 Publication ABB

---

**À l'image des années précédentes, 2017 débute sur un impératif : celui d'innover pour résoudre les problèmes les plus urgents. Cette nécessité s'impose à tous sans distinction : entreprises, responsables politiques et citoyens. En toute logique, le premier numéro d'ABB Review de l'année s'intéresse donc à l'innovation. Cette dernière s'invite également au niveau de la publication même : en effet, notre nouvelle maquette fait la part belle à la convivialité, aux graphiques et à la pédagogie.**

**Nous restons à l'écoute de vos suggestions sur [abb.com/abbrevreview](http://abb.com/abbrevreview).**

---

ÉDITO

# Innovation



Chers lecteurs,  
Bienvenue dans ce premier numéro de la nouvelle mouture d'ABB Review. Nous avons non seulement complètement revu la maquette, mais aussi fait évoluer la structure même de la revue pour la rendre – nous l'espérons – plus accessible et plus lisible. Cette refonte de la revue s'inscrit dans un plus large contexte de mutation en profondeur du Groupe. ABB s'est donné pour mission d'aider sa clientèle à progresser dans trois domaines clés : la disponibilité, la rapidité et la rentabilité. La numérisation est l'un des plus importants leviers d'action pour atteindre ces objectifs. Par le passé, les bonds de productivité résultaient de progrès au niveau d'un appareil ou d'une technologie tandis que demain, c'est de la collaboration entre appareils et systèmes tout au long de la chaîne de valeur que viendra la nouvelle révolution. La numérisation autorise le partage et le traitement de l'information en temps réel.

Dans cette édition d'ABB Review, comme dans les prochains numéros, vous découvrirez en quoi l'avenir numérique est en train de devenir réalité. Bonne lecture,

A handwritten signature in red ink, appearing to read 'Bazmi Husain'.

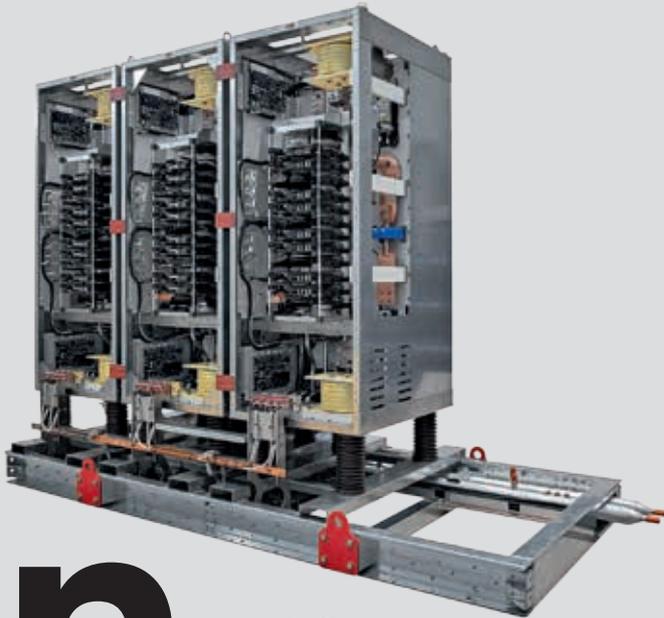
Bazmi Husain  
Directeur des technologies

---

# À la une de l'innovati ABB 2017



# e on



12

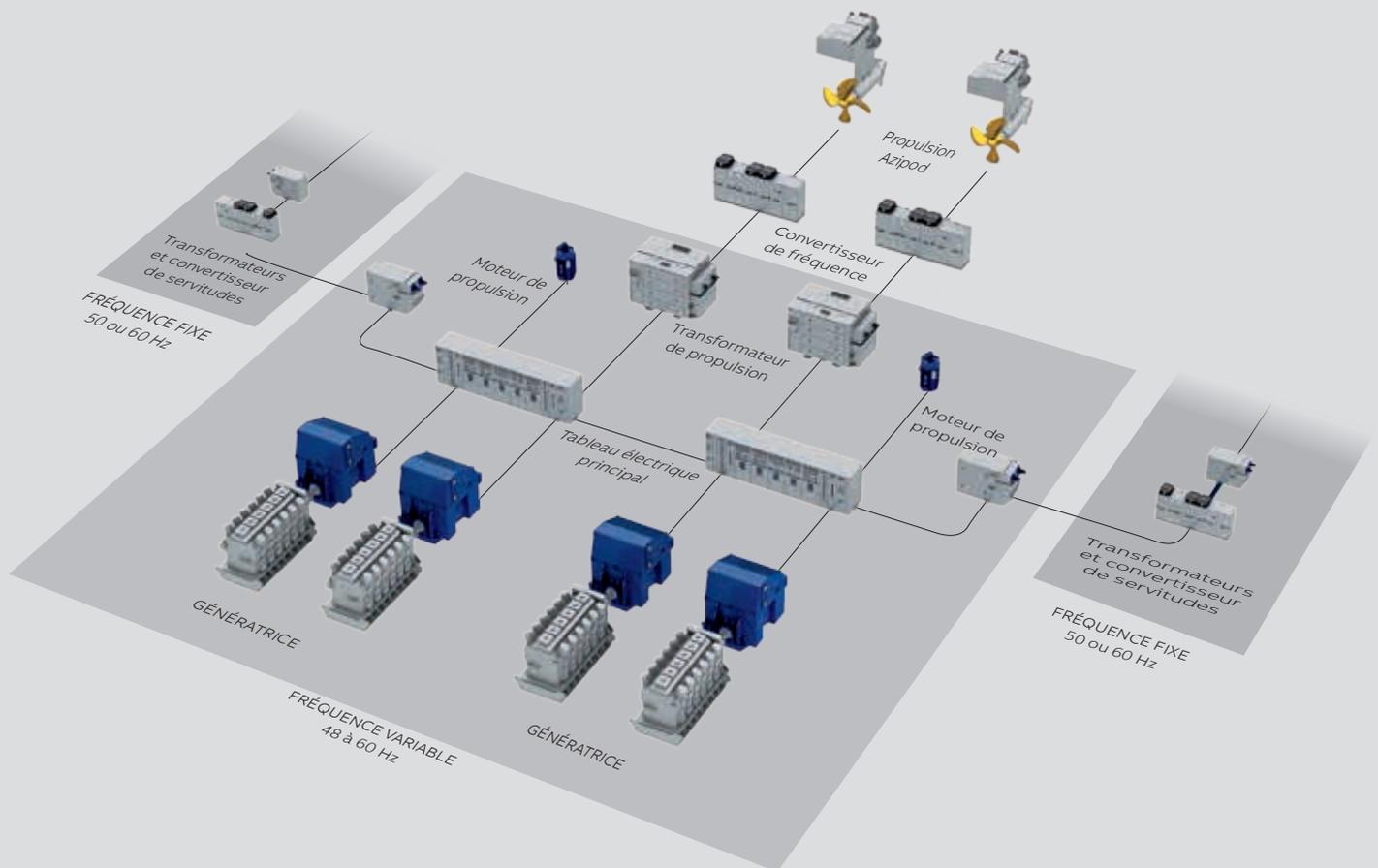
Le terme innovation est aujourd'hui sur toutes les lèvres et beaucoup d'entre nous y voient un synonyme de nouveauté.

Chez ABB, l'innovation revêt de multiples facettes : c'est par exemple l'emploi de méthodes audacieuses mettant en œuvre des outils brevetés et les mathématiques pour localiser les fuites de gaz, la mise au point d'un transmetteur de niveau capable de littéralement « visualiser » n'importe quelle situation, le stockage d'énergie facilité et sécurisé, ainsi que de nouveaux records de performance dans le transport électrique ou les transformateurs. L'innovation ABB est le vecteur de son leadership technologique, de son adéquation au marché et de la réussite de ses clients.



13

# Plus de puissance, moins de consommation pour la propulsion marine $\geq 20$ MW



Le Dynamic AC (DAC) d'ABB est une nouvelle solution d'optimisation des gros navires à propulsion électrique. Il autorise la variation de la vitesse de rotation du moteur principal en fonction des fluctuations de charge, sans perte de performances : de quoi économiser entre 4 et 6% de combustible. Le DAC est particulièrement efficace pour les bateaux assurant des parcours de différentes distances, à vitesses variables, pendant l'année ou sur toute leur durée d'exploitation. Cette solution d'optimisation ABB assure aux concepteurs et aux constructeurs navals la flexibilité accrue pour répondre aux exigences évolutives du marché mondialisé.

Sur une propulsion diesel-électrique classique, la production de puissance est à part et repose sur des groupes électrogènes pour équilibrer la production et la consommation énergétiques. Le DAC va plus loin en pilotant la vitesse de rotation des groupes : le système électrique est en effet conçu pour ajuster sa fréquence dans la plage

de 48 à 60 Hz. Les réglages de la vitesse moteur optimisent ainsi la consommation de combustible dans tous les régimes de marche.

La distribution de puissance aux auxiliaires et servitudes du navire (éclairage, climatisation, etc.) est fournie par des convertisseurs à fréquence fixe, à l'exception de certaines charges qui peuvent être directement alimentées par la fréquence variable. Tous les éléments de DAC s'intègrent pleinement aux solutions d'automatisation et d'assistance intelligentes d'ABB.

Ce nouveau concept d'efficacité énergétique vient avantageusement compléter le système ABB de réseau de bord en courant continu Onboard DC Grid pour l'optimisation de la production d'énergie sur les navires. Ses fonctionnalités évoluées ont été pensées pour les grosses unités alimentées par des réseaux électriques haute tension et développant une puissance supérieure ou égale à 20 MW, ce qui n'est pas le cas du système Onboard DC Grid destiné aux plus petits navires. ●

# Nouveau transmetteur laser ABB pour la mesure de niveau sans contact



ABB lance le transmetteur laser hautes performances LLT100 qui mesure avec précision le niveau, la distance et la position à courte ou longue portée. Destiné à l'ensemble des applications industrielles et à une utilisation dans des milieux agressifs, le LLT100 se substitue aux autres transmetteurs de niveau et capteurs radar à trajet ouvert. La jauge mesure le niveau de toute matière solide ou liquide, y compris les liquides clairs, quelles que soient leurs propriétés ou conditions d'emploi. Grâce à son étroit faisceau laser, le LLT100 se joue des obstacles et peut être installé près des parois de cuves ou dans des réservoirs dotés de lames de mélange, de grilles, ou encore obstrués ; il mesure en continu et assure un suivi rapide des changements de surface. En outre, sa fonction avancée de traitement des signaux fiabilise la mesure en pré-

sence de mélangeurs, ainsi que dans la poussière, le brouillard et les espaces exigus. Facilité de configuration, rapidité d'installation et alimentation par boucle de courant 4–20 mA ajoutent à sa convivialité. Protégé IP67 dans une enveloppe NEMA 4X, le LLT100 est approuvé en zones dangereuses et atmosphères explosives classe 1/division 1 (zone 1). Il convient parfaitement aux environnements industriels difficiles tels que l'exploitation minière, les agrégats, le pétrole et le gaz, la chimie, l'agroalimentaire, la production d'électricité, l'industrie papetière, la pharmacie, le traitement de l'eau et les eaux usées. Le LLT100 incarne la stratégie de conception ABB de la « Mesure rendue facile » : rapidité de démarrage et souplesse d'installation sans besoin de réétalonner l'appareil dans le temps ou quand l'environnement change. ●

# Détecter rapidement les fuites dans les gazoducs avec MobileGuard™

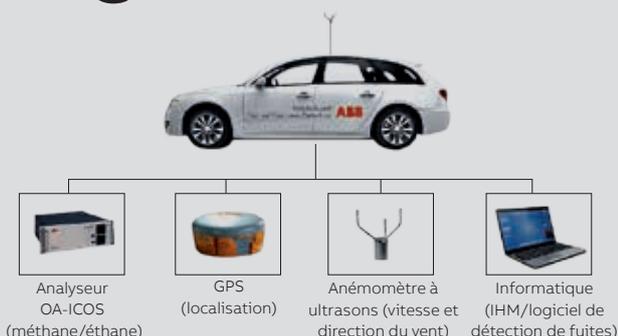
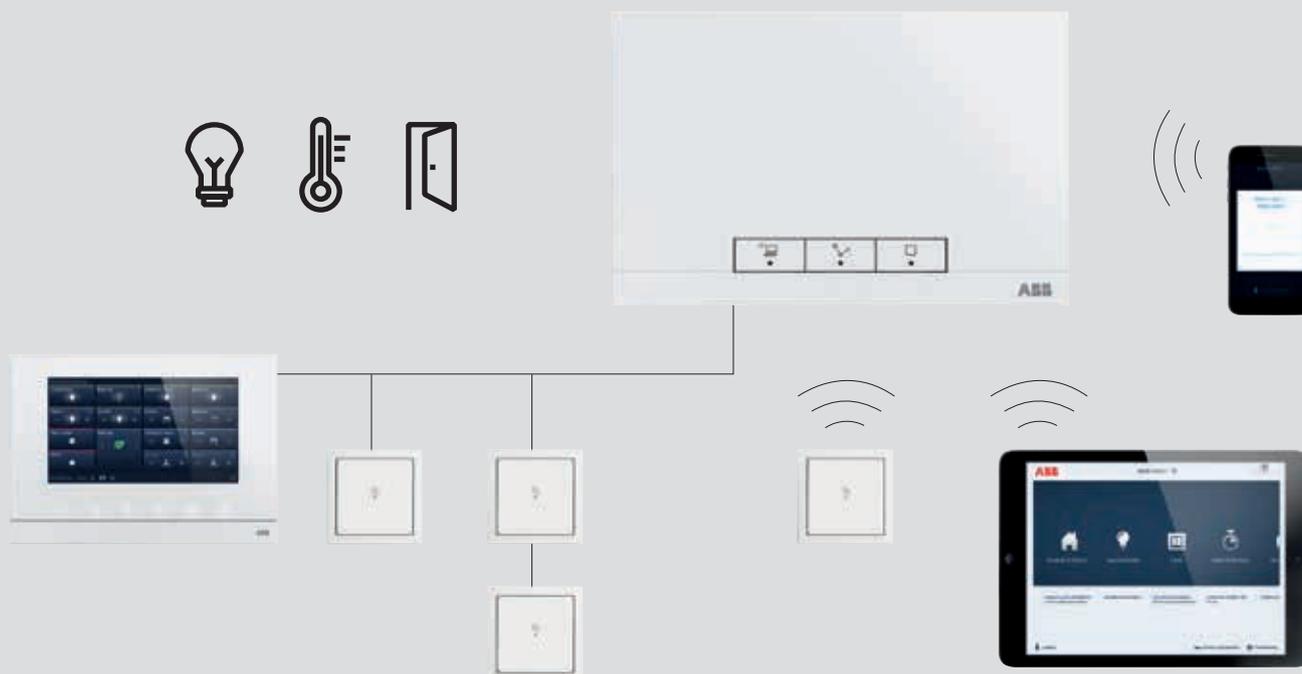


ABB a mis au point le système MobileGuard™ pour la détection rapide et écoperformante des fuites dangereuses et polluantes dans les conduites de distribution de gaz naturel. Grâce à sa technologie laser brevetée OA-ICOS™ (Off-Axis ICOS), l'analyseur au cœur du système mesure simultanément les concentrations en méthane et en éthane. Capable d'identifier le méthane dilué à une partie par milliard, il détecte les fuites à plusieurs dizaines de mètres, quand la portée des équipements de surveillance traditionnels atteint à peine un mètre.

Cet appareil, monté sur véhicule, facilite et accélère la surveillance des réseaux de gazoducs. Ses mesures (jusqu'à 5 Hz) permettent de détecter d'éventuelles fuites à une vitesse de près de 90 km/h. Doté de la capacité complémentaire de mesurer la concentration d'éthane, il sait distinguer le gaz acheminé dans les conduites de celui dégagé par d'autres sources de méthane (décharges, marécages, bétail, etc.), limitant ainsi les faux positifs.

Sur la base de ces mesures, combinées à des données anémométriques et GPS, des algorithmes d'analyse exclusifs ABB et très perfectionnés géolocalisent très précisément les fuites dans le réseau. Les clients reçoivent les rapports d'analyse en temps réel sur un espace cloud partagé, consultable depuis des systèmes d'information géographique (SIG). Cette innovation ABB procure aux entreprises de distribution de gaz naturel de nouvelles garanties de sécurité au quotidien (protection des populations, recherche d'odeurs, assistance d'urgence post-accident), évite les émissions de gaz à effet de serre indésirables et permet de réaliser des économies. ●

# La domotique plus facile que jamais avec la solution sans fil ABB-free@home®



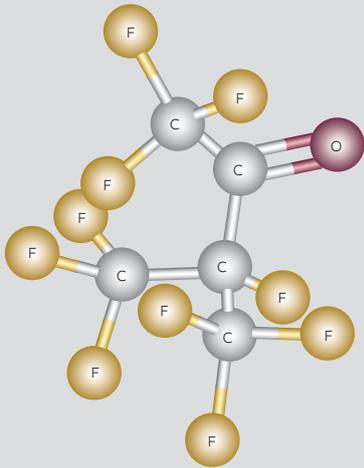
L'habitat « intelligent » repose sur une infrastructure de capteurs, d'actionneurs et de commandes interactives. La solution ABB-free@home sans fil permet de relier tout simplement ces différentes composantes domotiques dans un système particulièrement souple d'emploi.

Cette intégration sans fil est idéale pour réhabiliter d'anciens édifices en un habitat moderne et communicant, ou pour équiper des constructions récentes du dernier cri de la technologie d'automatisation du bâtiment.

Grâce à son réseau maillé, garant des meilleures liaisons radio, le sans-fil ABB-free@home ouvre de nouvelles possibilités aux projets de logements domotisés, en mariant simplicité et économie. Le sans-fil permet de ne pas toucher à l'ossature même du bâtiment : la totalité des systèmes

d'éclairage, d'ombrage, d'interphonie et de chauffage est mise aux derniers standards et normes domotiques. Au besoin, des composants câblés peuvent aussi s'intégrer à l'ensemble.

Pour l'électricien, l'installation d'ABB-free@home sans fil s'effectue très simplement et rapidement, sur PC, tablette ou mobile, et même par commande vocale (System Access Point). Cette offre domotique sans fil peut se combiner à une topologie de réseau ABB-free@home existante en bus mais aussi s'intégrer directement aux systèmes d'interphonie ABB et à l'accès distant sur le Cloud. ●



## La moyenne tension s'affranchit du SF<sub>6</sub>

Depuis des décennies, les industriels en quête de compacité, de fiabilité et de sécurité maximales plébiscitent les appareillages à isolation gazeuse (GIS), de préférence à l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>). Malgré ses caractéristiques exceptionnelles, le SF<sub>6</sub> a l'inconvénient d'être un puissant gaz à effet de serre. ABB est le premier fabricant à proposer des GIS moyenne tension (MT) écologiques, utilisant un nouveau gaz isolant.

En collaboration avec 3M, ABB a mis au point une solution alternative au SF<sub>6</sub>. Baptisée AirPlus™, elle approche les performances techniques du SF<sub>6</sub> sans en présenter le potentiel de réchauffement global. Exposées au rayonnement atmosphérique, les molécules d'AirPlus se décomposent en 16 jours en moyenne contre plus de 3000 ans pour le SF<sub>6</sub>.

AirPlus est un mélange gazeux composé à 80 % en volume d'air sec, les 20 % restants étant formés par le fluide diélectrique NOVEC 5110, une fluorocétone C5 fabriquée par 3M.

À la différence du SF<sub>6</sub>, l'utilisation d'AirPlus n'est soumise à aucune réglementation, ce qui simplifie sa manipulation et réduit les formalités administratives.

ABB a lancé deux appareillages MT utilisant AirPlus, ZX2 AirPlus et SafeRing AirPlus, respectivement destinés aux réseaux de distribution primaire et secondaire. Ces produits sont un tremplin pour élargir l'offre AirPlus et inaugurer une nouvelle ère pour les GIS moyenne tension. ●

## Emax 2, version numérique

En 2013, ABB a lancé l'Emax 2, disjoncteur basse tension le plus performant de sa catégorie et premier au monde à assurer une gestion intelligente des charges. Cette percée technologique a fait passer le disjoncteur du simple rôle d'interrupteur de courant à celui de gestionnaire d'énergie complet. Toutefois, les grandes tendances actuelles, telles que les énergies renouvelables, le stockage d'énergie et les microréseaux entraînent une évolution rapide de la distribution d'électricité, en plus de susciter de nouvelles demandes de la part des clients et des applications. Pour y répondre, ABB vient de dévoiler sa dernière innovation : l'Emax 2 tout-en-un, qui transforme le disjoncteur en une plate-forme multifonction capable de piloter la prochaine génération de centrales électriques, à savoir les microréseaux. La puissance de l'Emax 2 tout-en-un repose sur des caractéristiques numériques exceptionnelles :

- Commande : gestion optimale des ressources des microréseaux;
- Connectivité : intégration complète au monde numérique;
- Facilité d'utilisation : la complexité rendue accessible.

L'Emax 2 tout-en-un est le premier disjoncteur à satisfaire aux nouvelles exigences des réseaux et le seul à pouvoir tirer parti de la puissance des données : il peut ainsi communiquer directement avec la nouvelle plate-forme Ekip SmartVision de gestion d'énergie et d'informatique en nuage (cloud computing), une solution numérique ABB Ability™. Avec ses fonctionnalités automatiques « plug-and-play » et son intelligence intégrée, l'Emax 2 tout-en-un est simple d'emploi. Une fois de plus, ABB révolutionne le monde des disjoncteurs pour répondre aux enjeux d'aujourd'hui et de demain. ●



## Des centrales mieux protégées



Depuis les années 1950, les disjoncteurs d'alternateurs ABB protègent les centrales d'énergie et en simplifient le fonctionnement. ABB s'efforce en permanence d'améliorer la performance de ses produits et a ainsi développé le disjoncteur d'alternateur HEC 10-170 pour les centrales produisant jusqu'à 1600 MW.

Le HEC 10-170 est le successeur de la gamme HEC 7/8A, utilisée par des centaines de centrales dans le monde entier. Avec un courant assigné de 170 kA sous 31,5 kV, il se distingue par sa compacité, sa flexibilité et sa robustesse.

ABB a privilégié la simplicité de conception et a fait appel à ses fournisseurs pour mettre au point ce disjoncteur épuré. Le HEC 10-170 s'appuie sur une série d'innovations, à l'image de son sectionneur à faible course, de sa tige extrêmement simplifiée et de son concept de refroidissement hybride par caloducs. Le montage en usine a lui aussi été nettement rationalisé.

Commercialisation : premier trimestre 2017 ●

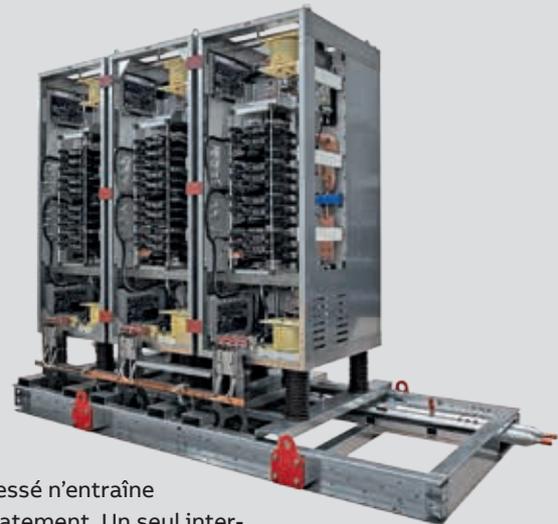
## Compensation statique SVC Light pour les moyennes puissances

Dans le cadre de son offre de compensation statique de puissance réactive SVC Light, ABB a développé un nouveau convertisseur modulaire multiniveau (MMC) à topologie chaînée pour les applications de compensation statique synchrone STATCOM.

Cette innovation ABB, qui vise la gamme des moyennes puissances jusqu'à environ 100 MVA, s'appuie sur une nouvelle plate-forme technologique destinée aux thyristors intégrés commutables par la gâchette à conduction inverse (RC-IGCT) de caractéristiques assignées 4,5 kV/3 kA et 6,5 kV/2,15 kA. Optimiser ce semi-conducteur de puissance pour des applications basse fréquence, comme les convertisseurs MMC couplés au réseau, permet d'obtenir les plus faibles pertes de l'industrie. Autres avantages des composants en boîtier pressé, dont les IGCT, par rapport notamment aux modules industriels à fils de métallisation : un cycle de mise en charge plus performant et un mode de défaillance en court-circuit intrinsèquement stable. Ces atouts confèrent une robustesse naturelle à la conception de la cellule ; une défaillance du compo-

sant en boîtier pressé n'entraîne ni explosion ni éclatement. Un seul interrupteur à thyristor protège la cellule des dommages catastrophiques, dans tous les modes de défaillance significatifs, et assure la continuité de fonctionnement du convertisseur chaîné après la défaillance d'une cellule. Qui plus est, le convertisseur a été conçu pour faciliter la maintenance et le remplacement des composants sur site.

Dans ce nouvel SVC Light destiné aux moyennes puissances, la conception durcie de la cellule de convertisseur se conjugue aux algorithmes de commande éprouvés d'ABB pour des applications comme l'atténuation des fluctuations de tension (flicker) dans les fours à arc, le soutien de la tension dans les énergies renouvelables, la compensation dans les réseaux d'énergie et le ferroviaire, entre autres. Enfin, pour maximiser les performances, le logiciel de commande de SVC Light est implanté sur la nouvelle plate-forme modulaire de conduite avancée MACH™3 d'ABB, également utilisée dans les applications de transport en courant continu haute tension (CCHT). ●



## SCARA : le meilleur bras droit



ABB a lancé sa toute première ligne d'automatismes SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm), l'IRB 910SC, pour compléter sa gamme de robots industriels. Vitesse, précision et rentabilité sont les points forts de cette nouvelle famille de petits automates.

SCARA désigne une catégorie de robots dotés de quatre axes mobiles : les deux premiers assurent le positionnement horizontal, le troisième les déplacements verticaux et le quatrième la rotation autour d'axes verticaux. Ce type d'automates est fréquemment utilisé pour des tâches limitées à des manipulations sur une surface horizontale. Il intéresse principalement les clients exigeant rapidité d'exécution (temps de cycle courts), haute précision et fiabilité maximale, pour des applications très variées, qui vont de l'assemblage de composants électroniques à l'inspection, le conditionnement, le test de médicaments et autres tâches de manutention de matériaux.

La nouvelle série d'automates SCARA d'ABB affiche une charge utile nominale de 3 kg et maximale de 6 kg, ainsi que trois longueurs de bras variables de 450, 550 ou 650 mm. Le client est ainsi en mesure de choisir la solution convenant le mieux à son application. Grâce à leur moindre nombre d'axes, les automates SCARA sont plus rapides et souvent plus économiques et performants que leurs concurrents 6 axes du marché.

Conformément à la stratégie d'ABB, les automates SCARA partagent avec le reste de la gamme robotique les mêmes organes de commande. Grâce à cette architecture de base logicielle et matérielle commune, les partenaires et clients évitent les coûts de possession inutiles. Ils bénéficient par ailleurs d'un système robotisé homogène, au sein duquel la programmation, l'exploitation et la maintenance sont similaires, quels que soient le type et la taille de l'automatisme. RobotStudio, Integrated Vision et PickMaster sont autant d'exemples de produits ABB fonctionnant avec les automates SCARA. ●

## Plein soleil même les jours de pluie !

ABB innove encore cette année dans le photovoltaïque (PV) avec un nouveau système résidentiel, baptisé REACT, qui permet aux propriétaires et bailleurs fonciers de stocker tout excédent d'énergie produit par leur installation PV pour une utilisation ultérieure. En se procurant ce système complet (onduleur PV + stockage) auprès d'ABB, le client a l'assurance d'un « guichet unique ». REACT se compose d'un onduleur monophasé ABB de 3,6 ou 4,6 kW, et d'une batterie lithium-ion de 2 kWh garantissant une capacité résiduelle d'au moins 60% après une fourniture d'énergie cumulée de 9 MWh avec des cycles de charge/décharge quotidiens ; d'où une longévité d'au moins dix ans !

REACT se démarque de la concurrence par sa configuration évolutive, avec une capacité utile de 2 kWh qui peut passer à 6 kWh, moyennant l'ajout de deux autres compartiments de batterie. La consommation énergétique est optimisée par un logiciel de gestion d'énergie embarqué qui s'interface également avec le compteur d'énergie (inclus dans la fourniture ABB), au point de raccordement avec le réseau. REACT est pourvu des outils de communication (Ethernet, wifi, etc.) permettant une surveillance locale ou distante des données à travers le Cloud, sans passer par des interfaces supplémentaires. L'application mobile MyREACT de suivi et de contrôle-commande du produit complète l'offre ABB. ●

---

# Nouveaux records de tension pour les transformateurs élévateurs

Lorsqu'ABB a inauguré la liaison en courant continu à très haute tension (CCTHT) Xiangjiaba-Shanghai en 2008, celle-ci affichait des caractéristiques assignées inédites pour une installation commerciale: 800 kV et 6400 MW. ABB s'apprête aujourd'hui à battre son propre record en fournissant des convertisseurs pour la liaison à 1100 kV qui transportera 12 000 MW entre Changji et Guquan, en Chine. L'élévation du niveau de tension pose un défi gigantesque en matière de conception diélectrique des transformateurs de convertisseur. Il ne suffit pas d'extrapoler l'expérience acquise lors du franchissement des précédents paliers technologiques. En effet, la performance de l'isolation est régie par des contraintes de champ électrique au comportement

non linéaire. Il a donc fallu revoir de A à Z la conception de l'isolation côté valve des transformateurs, traversées comprises.

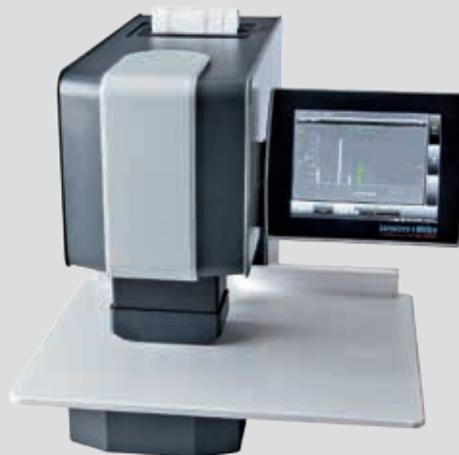
Exceptionnel par ses valeurs assignées de tension et de puissance, ce transformateur est aussi le plus grand au monde. Cela n'est pas sans conséquence sur les traversées qui doivent endurer des tensions extrêmes comme des courants très élevés. En 2012, ABB a achevé un ambitieux programme de recherche-développement qui a permis de valider la technologie utilisée par les premiers transformateurs de convertisseur de 1100 kV CC. Les solutions de l'installation commerciale en cours ont donc déjà fait la preuve de leurs capacités. ●

---

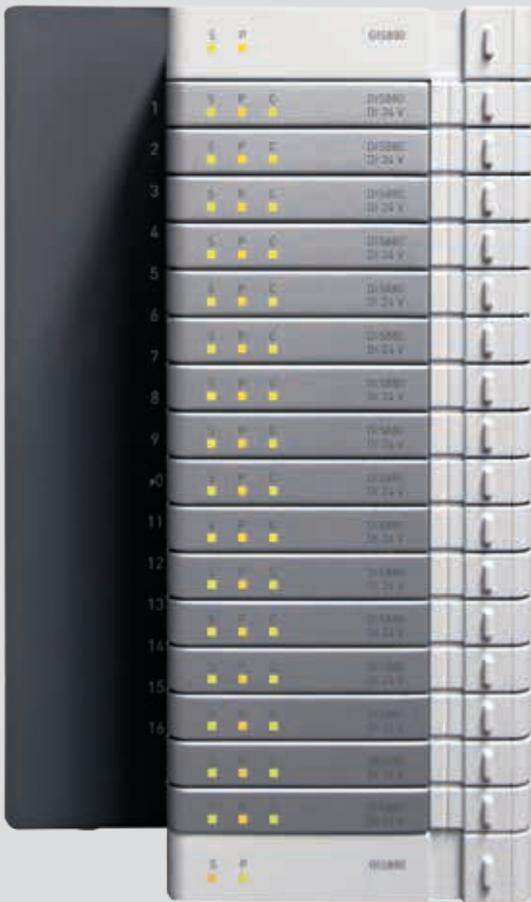
# La topographie optique fait bonne impression

Un nouvel instrument ABB analyse la topographie de surface des papiers et cartons pour permettre aux papetiers d'évaluer rapidement et avec précision l'imprimabilité du support, offrant ainsi à leur clientèle un produit à la hauteur de ses exigences de qualité. La topographie optique consiste à mesurer les infimes variations d'épaisseur et les cratères à la surface du papier. L'institut suédois Inventionia, à la pointe de la recherche mondiale sur le papier et la pâte à papier, a démontré que cette technique prédisait mieux la qualité de la couverture d'encre pour divers procédés (gravure, impression offset, flexographique ou hybride) que les méthodes classiques.

Comment fonctionne-telle? Deux faisceaux lumineux venant de sens opposés sont projetés à angle aigu sur un échantillon, créant une image stéréoscopique; les ombres formées révèlent les irrégularités de surface du papier, qui servent de base à une description mathématique de sa topographie. C'est sur ce principe que se fonde le L&W OptiTopo,



développé par ABB d'après une invention Inventionia. L'instrument mesure en effet les variations de surface et les propriétés des cratères du support d'impression avec une précision telle qu'il est capable d'en prédire l'imprimabilité, notamment les zones risquant de ne pas être encrées. ●



## — Les entrées/sorties Select I/O du système 800xA changent la donne des projets d'automatisation

Des décennies durant, les projets d'automatisation se sont construits autour de systèmes de contrôle-commande distribué centrés sur des contrôleurs d'automatismes. Or ces architectures ont l'inconvénient de multiplier les interdépendances entre les différentes tâches du projet, ce qui peut facilement se solder par des surcoûts et des retards importants en cas d'ordres de modification. ABB a développé pour cela une nouvelle gamme complète d'E/S, avec outils et méthodologies de développement, qui met un terme à ce scénario et dope l'efficacité du projet d'automatisation : fini les dépassements de budget ou d'échéances cruciales.

Il y a interdépendance du projet quand, par exemple, on décide de la configuration définitive ou « gel de la conception » avant l'achat du matériel qui, à son tour, doit précéder le développement de l'application, et ainsi de suite. Toute modification de conception (changer de types d'E/S, en ajouter ou les transférer à un autre automate, etc.) exige des ordres de modification potentiellement coûteux du fait de la somme de travail nécessaire pour réaliser ces changements après gel de la conception.

Pour y remédier, ABB a développé une extension à la gamme d'E/S de sa plate-forme de contrôle-commande 800xA, appelée Select I/O. Il s'agit d'une solution d'E/S monovoies pour les applica-

tions à la fois d'automatisation de procédé et de sécurité, qui communique avec le système sur un réseau d'E/S Ethernet industriel redondant.

Ces E/S peuvent être raccordées sur site, à un stade précoce du projet, sans passer par les encombrantes armoires de câblage. Il est possible de définir les types de signaux bien plus tard, en ajoutant des modules individuels de traitement de signal, réduisant l'impact financier de toutes modifications tardives.

Grâce à ces multiples « grappes » Select I/O communiquant sur Ethernet redondant, les E/S peuvent être automatiquement scrutées, configurées et vérifiées sur le terrain, parallèlement au développement de l'application effectué au service projet d'ABB. Cette démarche de parallélisation, baptisée xStream, inclut des possibilités de regroupement logique qui font automatiquement converger les deux livrables du projet (développement applicatif et configuration des E/S du procédé), juste avant la mise en service finale.

Résultat, l'automatisation est retirée du déroulement global critique du projet : le meilleur moyen de limiter les aléas, surprises et modifications, et d'accélérer la mise en service... pour le plus grand bonheur de l'exploitant ! ●

## ENTRETIEN

# La révolution numérique de l'industrie



## Guido Jouret

Guido Jouret, Directeur de la transformation numérique chez ABB, explique comment cette mutation technologique transformera les métiers du Groupe et de ses clients.

**AR** **ABB Review (AR)** : Qu'entend-on par « révolution numérique » ? La numérisation de la société n'est-elle pas déjà une réalité depuis bien longtemps ?

**GJ** **Guido Jouret (GJ)** : À vrai dire, il n'y a rien de vraiment novateur dans la capacité à communiquer à distance avec un capteur dans une usine, par exemple. Mais c'est le coût de raccordement du dispositif – et pas seulement le composant de connexion du capteur lui-même mais aussi le réseau, les serveurs, les logiciels, etc. –, qui est aujourd'hui beaucoup plus abordable, grâce aux progrès accomplis dans des domaines comme les télécommunications mobiles.

Les appareils numériques sont déjà légion dans l'industrie : tous produisent des données, dont beaucoup sont hélas laissées pour compte. S'il était possible de collecter, de stocker et d'analyser cette mine d'informations, les industriels pourraient optimiser leurs opérations. Ces données permettraient également à ABB de fournir des services et d'améliorer la fiabilité et le fonctionnement des équipements. Et plutôt que d'effectuer ce stockage et cette analyse sur un serveur local, le client a tout intérêt à les faire migrer dans le Cloud.

**AR** Mais n'y a-t-il pas là un risque de perdre la main sur ses données ?

**GJ** Aucun stockage dans le « nuage » n'est parfaitement sûr. Pour autant, les données y sont généralement plus sécurisées que sur un serveur d'entreprise. Les prestataires de services informatiques dans le cloud savent fort bien que leur réputation est en jeu si les données d'un client sont piratées.

Qui plus est, dans d'autres domaines, la majorité des entreprises a d'ores et déjà accepté ce stockage déporté. Par exemple, elles utilisent probablement Microsoft Office 365. Si elles peuvent confier au cloud des documents commerciaux sensibles, pourquoi n'en serait-il pas de même pour les données de production ?

**AR** De quel type d'analyse de données parle-t-on ?

**GJ** Grâce à des bibliothèques fournies par Microsoft et Google, entre autres, nous pouvons par exemple effectuer de la reconnaissance d'images ou analyser des flux de données en se fondant sur l'expérience passée.

**AR** S'appuyer sur les algorithmes de prestataires externes n'érode-t-il pas la supériorité technologique d'ABB? Car après tout, la concurrence peut utiliser les mêmes bibliothèques.

**GJ** C'est effectivement ce qu'elle fait et fera encore. Mais voyons-le sous un autre angle: des entreprises comme Microsoft et Intel fournissent nos systèmes d'exploitation et processeurs. Nous n'imaginerions plus développer nous-mêmes ces composants. De la même façon, l'apprentissage automatique et le stockage dans le cloud ne sont que des outils. Notre avantage concurrentiel réside dans ce que nous en faisons.

Utiliser des solutions « maison » pour nous protéger n'est pas une stratégie judicieuse à long terme. Le marché évolue vers toujours plus de choix. Des normes comme la CEI 61850 sur l'automatisation des postes électriques permettent aux clients de choisir et de panacher en toute liberté des équipements multiconstructeurs. Cette liberté de choix est bonne pour le client comme pour ABB. Plutôt que de vouloir augmenter notre part du gâteau, mieux vaudrait faire grossir le gâteau tout entier.

**AR** Qu'en est-il de la numérisation des dispositifs eux-mêmes?

**GJ** Les appareils sont de plus en plus numériques. Le tableau de bord d'une Tesla, par exemple, ne comporte plus que deux boutons « physiques » échappant à tout logiciel: l'allumage des feux de détresse et l'ouverture de la boîte à gants.

Un constructeur peut profiter de l'installation d'un nouveau logiciel pour ajouter des fonctionnalités ou améliorer les performances de son produit,

même après livraison. Pour reprendre l'exemple de Tesla, un incident s'est récemment produit sur un véhicule en mode autopilotage. On a donc modifié l'algorithme pour éviter que cela se reproduise et installé à distance un nouveau logiciel sur toutes les voitures de la marque. Résultat, la totalité des clients en a bénéficié. C'est là un virage radical par rapport à la situation présente où un produit reste inchangé durant toute sa durée de fonctionnement.

**AR** Pouvez-vous nous éclairer sur les technologies ouvrant de nouvelles perspectives?

**GJ** Citons, par exemple, la technologie Blockchain, qui a donné naissance à la monnaie électronique bitcoin. Il s'agit fondamentalement d'une technique de stockage et de transmission de transactions sécurisées, sans organe central de contrôle et dans le domaine public, qui peuvent être ajoutées, mais pas facilement effacées. Transparence et conformité sont primordiales dans la conduite des affaires. Pour toute prestation, qu'il s'agisse de la remise d'un devis ou de la livraison de marchandises, il importe que l'opération soit acquittée pour garantir la sécurité des deux parties.

L'automatisation et la numérisation remontent la chaîne de valeur. Voyez les réseaux électriques: au niveau opérationnel, ils sont déjà numérisés. La manœuvre d'un disjoncteur en est un exemple. Mais au niveau supérieur de la planification de la production, il faut toujours quelqu'un pour décrocher le téléphone. La révolution numérique irriguera tous les échelons de la chaîne de valeur.

**AR** Merci de nous avoir accordé cet entretien. ●





# Protectio et sécurit



34





# n é

L'électricité est la source d'énergie privilégiée pour alimenter nos foyers, nos usines et nos moyens de transport, sans oublier les infrastructures qui assurent le bon fonctionnement des réseaux et les échanges de données, aussi vitaux que croissants. La demande mondiale en électricité va s'envoler au cours des dix prochaines années. Il faudra donc accroître la capacité des réseaux actuels et déployer de nouveaux équipements dans les zones encore vierges. Avec la sollicitation augmentent les risques ; c'est pourquoi la sécurité demeure l'un des grands axes de l'innovation ABB dans la production, le transport, les services et les usages de l'électricité.

- 20 Protection combinée
- 25 La CEI61850, à la croisée de la basse et de la moyenne tension
- 32 Éclairer le chemin avec ABB
- 34 Des traversées-condensateurs au top et au sec



## PROTECTION ET SÉCURITÉ

# Protection combinée

L'amorçage d'un arc électrique dans une armoire de commande est un événement indésirable et extrêmement dangereux. L'association de l'Arc Guard System™ TVOC-2 et des disjoncteurs Emax 2, deux produits ABB, constitue une stratégie efficace pour limiter les dégâts causés par un arc sur l'installation.



**Marco Carminati**  
ABB Electrification  
Products, Protection and  
Connection

Bergame (Italie)  
marco.carminati@  
it.abb.com



**Andreas von-Lako**  
ABB Electrification  
Products, Protection and  
Connection

Västerås (Suède)  
andreas.von-lako@  
se.abb.com

L'amorçage d'un arc dans l'enveloppe d'un appareillage électrique, accompagné de températures pouvant atteindre 20 000 °C et de puissantes ondes de surpression, est un événement aussi indésirable que dangereux. Les causes peuvent en être l'erreur humaine, un raccordement défectueux ou encore l'absence de mesures empêchant la pénétration de petits animaux. Au fil des ans, de nombreux efforts ont été accomplis pour atténuer l'impact des arcs électriques. ABB propose depuis plusieurs décennies des produits efficaces, dont l'Arc Guard System TVOC-2 est la dernière génération. L'association du TVOC-2 avec les disjoncteurs Emax 2 →1 crée un système capable de diminuer significativement les conséquences d'un arc. Cette combinaison peut revêtir plusieurs formes afin de maîtriser les amorçages d'arc mais aussi de réduire les temps d'immobilisation du site.

La plupart des amorçages d'arc sont imputables à l'erreur humaine (dans 65% des cas, intervention d'un opérateur sur l'appareil au moment de l'arc), à des raccordements défectueux ou à la pénétration d'animaux. Les accidents se produisent le plus souvent lors de la maintenance ou du montage de l'appareillage, porte de l'armoire ouverte. Le premier rempart de protection contre les arcs, à savoir une porte robuste, est alors inopérant.

Les accidents sont heureusement rares ; par contre, lorsqu'ils se produisent, ils peuvent entraîner des blessures graves, voire mortelles, et d'énormes dégâts matériels. Le remplacement et la réparation de l'appareil imposent un long arrêt de la production, si bien qu'un accident d'arc, en plus d'être dramatique, s'avère coûteux.

C'est pourquoi les industriels cherchent à tout prix à éviter les amorçages d'arc ou, du moins, à en minimiser l'impact. Tout appareillage électrique se doit donc d'intégrer un système de protection contre les arcs. L'Arc Guard System TVOC-2, qui utilise un ensemble de capteurs optiques pour détecter les

—  
**Les arcs se produisent fréquemment lors de la maintenance ou du montage de l'appareillage électrique, avec la porte de l'armoire ouverte.**

arcs, est l'héritier de plus de 35 années de technologie ABB dans la protection des personnes et des appareils électriques contre ces dangers. C'est le compagnon parfait du disjoncteur Emax 2 d'ABB ; ensemble, ils constituent un système de protection très réactive qui limite l'impact des arcs internes.



01

— 01 L'Arc Guard System™ TVOC-2 d'ABB, associé à ses disjoncteurs Emax 2, pose les bases d'une stratégie ultraperformante de limitation des dégâts occasionnés par un arc.

— 02 Exemple d'emplacement des détecteurs lumineux sur les jeux de barres horizontaux/verticaux et dans l'armoire du disjoncteur

### Explications

L'arc électrique est un phénomène qui se produit en réponse à une décharge, à savoir lorsque la différence de potentiel entre deux points dépasse le pouvoir isolant du gaz qui les sépare. Les gaz, qui sont de bons isolants en temps normal, peuvent devenir conducteurs suite à une modification de leurs propriétés physico-chimiques. Lorsque les conditions sont réunies, il se produit alors un plasma, qui conduit le courant par ionisation thermique tant que le dispositif de protection côté réseau ne déclenche pas.

De plus, un effet thermo-ionique entraîne l'émission d'électrons depuis le côté cathode de l'arc : les ions qui se forment dans le gaz à cause des collisions provoquées par la chaleur sont accélérés par le champ électrique. En percutant la cathode, ils libèrent de l'énergie et entraînent un échauffement localisé à l'origine de l'émission électronique. Le fort courant de défaut observé pendant un arc échauffe les câbles ou les jeux de barres jusqu'à leur point de fusion. Dès que le conducteur fond, les conditions présentes sont les mêmes qu'en cas d'ouverture du circuit : production d'un arc qui perdure jusqu'à l'intervention des dispositifs de pro-

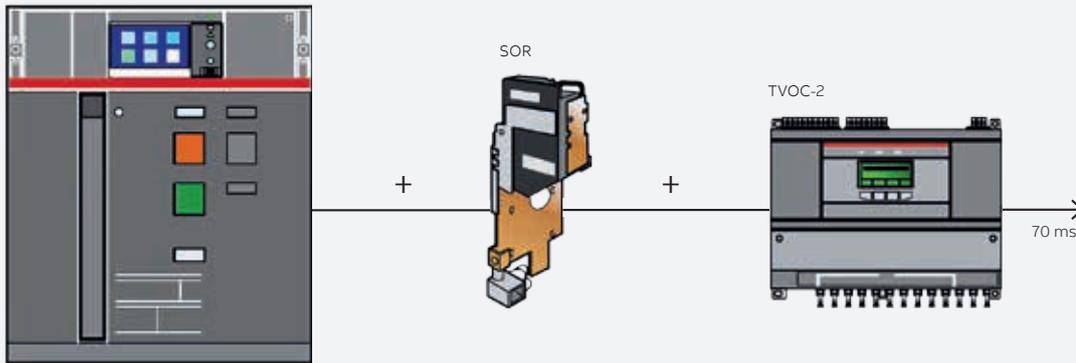
— Un arc peut facilement atteindre la température de 7000 à 8000 °C, voire 20 000 °C.

tection ou la disparition des conditions nécessaires à son existence. Un arc se forme lorsque l'air ambiant est fortement ionisé, que les tensions à l'anode et à la cathode chutent et que la densité de courant au milieu de la colonne grimpe (de l'ordre de 100 A/cm<sup>2</sup>). De plus, la température atteint plusieurs milliers de degrés Celsius au milieu de la colonne de courant, sur un diamètre allant de quelques micromètres à plusieurs centimètres dans les appareillages basse tension (BT).



02 a Jeux de barres horizontaux/verticaux b Armoire du disjoncteur

Emax 2



03

### Impact matériel

Les premiers moments de l'apparition d'un arc dans une armoire électrique se décomposent en quatre phases :

- Compression : l'énergie fournie en continu par l'alimentation provoque un échauffement excessif du volume d'air occupé par l'arc. L'air résiduel dans l'armoire s'échauffe aussi par convection et rayonnement. Au début, la température et la pression ne sont pas homogènes.

—  
Le TVOC-2, associé au disjoncteur Emax 2, constitue un système ABB de protection active à réponse rapide qui limite l'impact des arcs internes.

- Expansion : dès que la pression interne augmente, elle perce un orifice dans la paroi de l'armoire, par lequel l'air surchauffé commence à s'échapper. Au cours de cette phase, la pression atteint son maximum, puis commence à diminuer au fur et à mesure que l'air chaud s'évacue.
- Émission : l'énergie générée en continu par l'arc expulse la quasi-totalité de l'air.
- Échauffement : une fois l'air expulsé, la température à l'intérieur de l'appareillage atteint presque celle de l'arc. À cet ultime stade, qui dure jusqu'à extinction de l'arc, l'érosion attaque les matériaux en contact avec ce dernier, produisant gaz, fumées et particules en fusion.

Si l'arc survient dans un espace non confiné, certaines de ces phases ne se produiront pas ou auront un effet moindre. Il y aura cependant toujours une onde de pression et une élévation de température dans la zone de l'arc.

### Impact humain

Les effets de l'arc électrique rendent son voisinage dangereux :

- Pression : pour un défaut d'arc de 20 kA, on estime que la force exercée sur le corps d'une personne située à 60 cm de l'arc atteint 225 kg. L'onde de pression peut endommager irrémédiablement le tympan.
- Température : elle grimpe facilement à 7000–8000 °C et même 20 000 °C dans certains cas.
- Bruit : le niveau sonore peut atteindre 160 dB (à titre de comparaison, un coup de fusil ne fait que 130 dB) et endommager l'ouïe.
- Projections : les éclats projetés à grande vitesse sont un danger évident, surtout pour les yeux.
- Rayonnement : le rayonnement ultraviolet et infrarouge est nocif pour la cornée et la rétine.
- Gaz toxiques : les fumées produites par la combustion des matériaux isolants ainsi que par la fusion ou la vaporisation des métaux sont potentiellement toxiques.

Autant dire que les dommages d'un arc électrique s'apparentent à ceux d'une explosion.

### Protection active et passive

Il existe trois stratégies pour garantir la sécurité de l'opérateur et de l'installation en cas d'amorçage d'arc dans un appareillage BT :

- Construction mécanique à même de résister à l'arc électrique (protection passive) ;
- Ajout de dispositifs limitant l'impact d'un arc interne (protection active) ;
- Ajout de disjoncteurs limiteurs de courant.

Ces trois solutions, que l'on peut panacher, sont plébiscitées par les grands fabricants d'appareillages de commutation et de commande BT. L'association du TVOC-2 et de l'Emax 2 d'ABB constitue une protection active. Dans cette configuration, les effets destructeurs de l'arc peuvent être limités de deux manières.

—  
03 Disjoncteur Emax 2 en série avec un déclencheur d'ouverture à émission (SOR) et un TVOC-2

—  
04 L'utilisation d'un déclencheur Ekip Touch/Hi-Touch pour Emax 2 associé à un module Ekip Signalling 2K réduit le temps de déclenchement.

### Détection de l'onde de surpression par capteurs de pression

Des capteurs peuvent signaler le pic de pression associé à l'amorçage de l'arc et ainsi agir sur le disjoncteur réseau sans avoir à attendre le déclenchement de la protection sélective, plus long par nature. Le temps de réaction est de 10 à 15 ms.

Ce dispositif n'exige aucune électronique puisqu'il agit directement sur le déclencheur d'ouverture à émission (SOR) du disjoncteur réseau. Il va de soi que le seuil de déclenchement doit être fixe. Toutefois, sachant que la surpression engendrée par un défaut d'arc dans une armoire électrique est un phénomène non déterministe, il n'est pas toujours aisé de définir cette valeur à l'avance.

### Détecteurs lumineux

Deuxième possibilité, installer des détecteurs de flux lumineux associé au phénomène d'arc, qui envoient un signal de déclenchement au disjoncteur. Dans ce cas, le temps de réaction est d'environ 1 ms. C'est sur ce principe que repose l'Arc Guard System TVOC-2. La figure →2 illustre les

## L'Arc Guard System TVOC-2 d'ABB utilise des capteurs optiques pour détecter les arcs.

emplacements possibles des détecteurs. Idéalement, il en faudrait au moins un par colonne; de plus, leur positionnement judicieux évitera les interférences entre zones de détection. Ces appareils sont étalonnés de manière à présenter la même sensibilité lumineuse. Leur orientation n'a guère d'importance dans la mesure où leur lentille ultra-grand angle assure un vaste champ de vision.

Afin d'éviter les déclenchements intempestifs causés par le soleil ou le flash d'un appareil photo, le détecteur d'arc peut être associé à un capteur de

## Un TVOC-2 peut commander indépendamment trois contacts de sortie différents, chacun pouvant être associé à un groupe d'entrées de détecteurs lumineux.

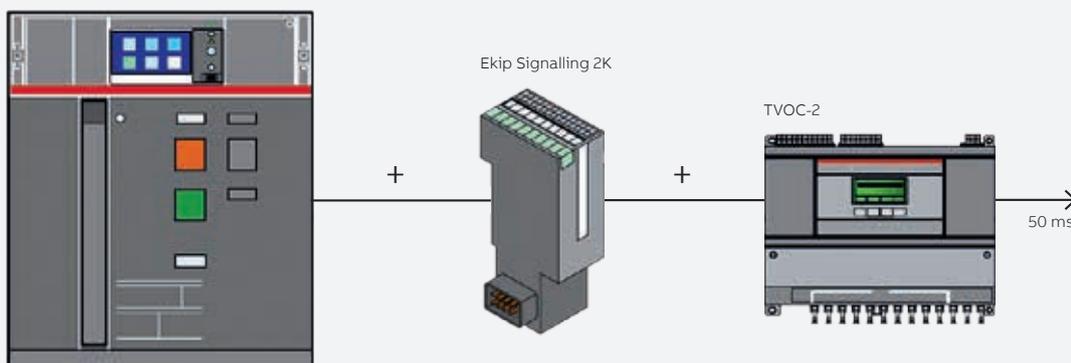
courant qui ne déclenchera qu'en cas de surintensité. Le recours à des câbles à fibres optiques minimise encore les risques d'interférences électromagnétiques. En effet, la fibre optique est non seulement gage de vitesse mais aussi d'immunité aux perturbations électromagnétiques qui accompagnent le défaut d'arc.

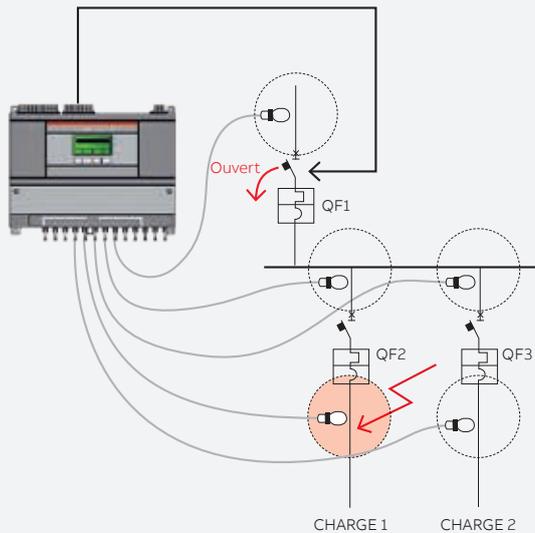
Le disjoncteur Emax 2 est le compagnon idéal du TVOC-2. D'un courant assigné de 6300 A maximum, il est équipé d'un relais de protection avec régulateur de puissance intégré. Ce dernier mesure et estime la consommation énergétique, et gère les charges pour maintenir ou réduire la puissance crête. En plus d'être facile à utiliser, l'Emax 2 offre de nombreuses possibilités de connexion qui facilitent son intégration dans les réseaux électriques intelligents (smart grids), les bâtiments et les usines. Il se raccorde donc facilement au TVOC-2, tous deux assurant une élimination rapide des arcs.

### Duo de choc

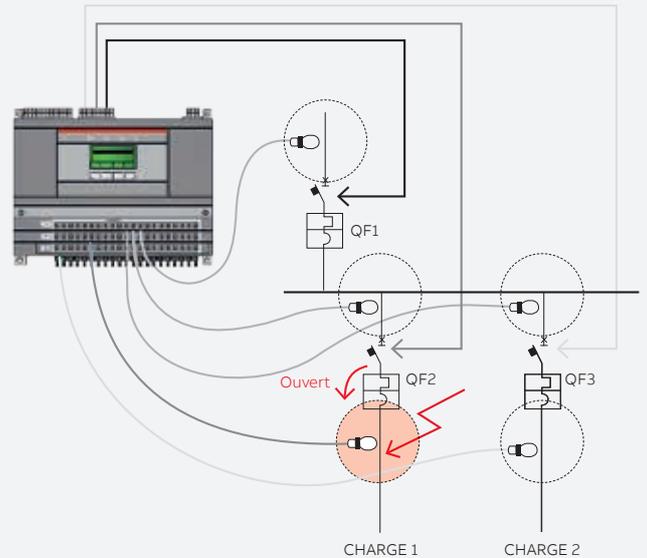
La figure →3 illustre une configuration d'Arc Guard possible: TVOC-2, Emax 2 et SOR. Il est toutefois possible de nettement réduire le temps de coupure en utilisant les déclencheurs Ekip Touch/Hi-Touch pour l'Emax 2 avec un module Ekip Signalling 2K →4.

Emax 2





QF1 ouvert : CHARGE 1 et CHARGE 2 non alimentées



QF1 et QF3 fermés : CHARGE 2 alimentée  
QF2 ouvert : CHARGE 1 isolée

05

— 05 Dans une configuration non sélective, un déclenchement peut mettre à l'arrêt toute l'usine.

— 06 L'association d'un groupe de détecteurs lumineux à certaines sorties du TVOC-2 autorise un déclenchement sélectif du disjoncteur.

Le déclencheur Ekip Touch/Hi-Touch, facile à programmer et à lire, est une nouvelle génération de dispositifs de protection. Programmable par son interface homme-machine ou le logiciel Ekip Connect installé sur un ordinateur portable, il effectue une mesure précise de la puissance et de l'énergie, et enregistre les derniers événements, alarmes et mesures pour protéger l'installation des défauts et déclencher quand la situation l'impose. Cette configuration réduit notablement le temps de coupure total puisque ce dernier ne dépend plus du SOR mais de l'ouverture, directement commandée par l'électronique.

#### Logique de fonctionnement à la carte

Un TVOC-2 peut commander un à un trois contacts de sortie différents, raccordés à plusieurs disjoncteurs. Chacun des contacts peut être associé à un groupe donné d'entrées de détecteurs lumineux. Cette sélectivité est un atout majeur pour le

— On peut nettement réduire le temps de coupure en utilisant les déclencheurs Ekip Touch/Hi-Touch pour l'Emax 2 avec un module Ekip Signalling 2K.

déclenchement des disjoncteurs : au lieu qu'un arc entraîne l'arrêt de toute l'usine →5, seules les parties touchées par l'arc sont isolées →6. Pour simplifier, les figures ne comportent que 5 des 30 détecteurs lumineux pouvant être installés.

06

#### Une protection essentielle

Les dispositifs de protection contre les arcs sont devenus incontournables dans l'architecture d'une armoire électrique. Comme ils diminuent les coûts

— Le tandem TVOC-2 et Emax 2 offre une protection complète contre les arcs électriques et assure la sécurité du personnel même lorsque la porte de l'armoire est ouverte.

d'immobilisation et les dégâts, certaines compagnies d'assurance offrent même une réduction de primes aux sociétés qui s'en équipent. La réglementation incite elle aussi de plus en plus à mettre en place une telle protection ; la Directive européenne Basse Tension, par exemple, impose des mesures pour éviter les dégâts causés par l'échauffement lié à l'amorçage d'arc.

Le TVOC-2, associé au disjoncteur Emax 2, assure une protection environnante complète contre les arcs électriques et garantit la sécurité du personnel, même lorsque la porte de l'armoire est ouverte. Les trois dispositifs (Emax 2, Ekip et TVOC-2) peuvent communiquer par protocole Modbus RTU et fournir rapidement à l'utilisateur des informations précises sur les défauts et les déclenchements, de même que leur emplacement. Le tandem TVOC-2 et Emax 2 constitue l'une des solutions d'élimination des arcs les plus fiables du marché. ●

## PROTECTION ET SÉCURITÉ

# La CEI 61850 en basse et moyenne tension

La norme internationale CEI 61850 peut s'appliquer aux dispositifs électroniques intelligents IED (intelligent electronic devices) basse tension d'ABB, comme les relais de protection REF et les disjoncteurs Emax 2, pour concevoir et exploiter un système de protection et de supervision totalement intégré, couvrant les domaines de la basse et de la moyenne tension.



**Enrico Ragaini**  
ABB Electrification  
Products, Protection and  
Connection

Bergame (Italie)  
enrico.ragaini@it.abb.com

Déjà bien implantée dans la protection électrique haute tension (HT) et moyenne tension (MT), la CEI 61850 s'invite de plus en plus en basse tension (BT), élargissant d'autant son champ applicatif →1. Les IED de protection et de contrôle-commande ABB de postes électriques, tels que les relais MT de la gamme REF et les disjoncteurs BT Emax 2, figurent parmi les équipements désormais pourvus de fonctionnalités CEI 61850. Ces deux types

d'appareillage permettent de concevoir et de mettre en œuvre une solution de protection et de supervision parfaitement intégrée, unifiant BT et MT. Cette approche globale s'appuie sur le socle normatif de la CEI 61850 pour créer des fonctions avancées de sélectivité logique fondée sur la communication inter-équipements, de diagnostic temps réel, de développement et de configuration bâtis sur un langage commun. Le récent déploie-

01



**Damiano Benedetti**  
ABB Electrification  
Products, Distribution  
Automation

Dalmine (Italie)  
damiano.benedetti@  
it.abb.com



—  
 01 L'adoption de la norme CEI 61850 en basse tension a considérablement amélioré les systèmes de protection et de supervision. En photo, l'appareillage BT et MT sur un site client d'ABB.

—  
 02 Schéma unifilaire de la messagerie GOOSE

—  
 03 Diagnostics BT/MT au format GOOSE

ment d'un imposant système de protection BT/MT normalisé CEI 61850, dans une usine de crème glacée en Italie, fait la démonstration de cette technologie de progrès.

La CEI 61850 s'impose aujourd'hui en référentiel de communication des automatismes de postes. Pour autant, au-delà de la simple compilation d'un ensemble de règles strictes, la norme peut aussi être au fondement d'une solution électrique complète mariant protection, contrôle-commande et supervision. À la différence des autres protocoles de communication industrielle, la CEI 61850 a été définie pour les besoins spécifiques des automatismes de postes, de plus en plus complexes. Elle remplit également le critère d'interopérabilité qui vise fondamentalement à intégrer en un même système des équipements multiconstructeurs tout en s'affranchissant des passerelles propriétaires ou autres développements « métier », très gourmands en ressources.

Pensée à l'origine pour l'automatisation de postes, la CEI 61850 étend son champ d'application aux systèmes de protection de toutes les installations électriques, y compris dans l'industrie et le tertiaire: une fiabilité accrue, une sélectivité plus fine, des temps de réaction sur défaut écourtés et la possibilité de mettre en œuvre des fonctions de tolérance aux pannes et des diagnostics intégrés en font le protocole de choix d'une multitude de systèmes de contrôle-commande de procédés

critiques dans les secteurs, entre autres, de la chimie, du pétrole, de l'hébergement de données (datacenters) et de la marine.

**Messagerie GOOSE**

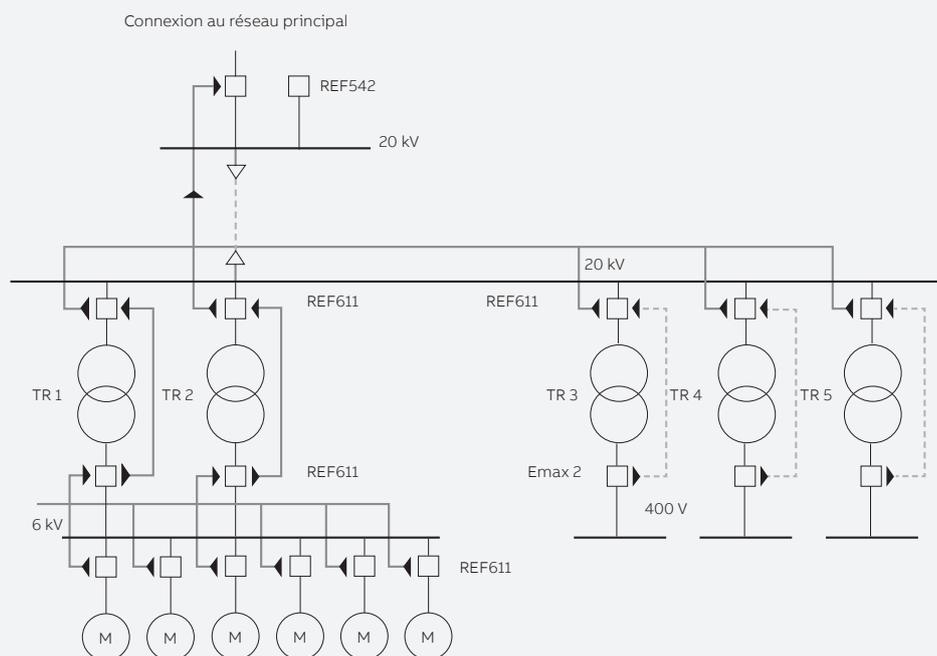
Du point de vue de la communication, la norme CEI 61850 a été conçue pour répondre aux besoins de la protection électrique. Ce domaine se dis-

—  
 La norme CEI 61850 peut être le socle d'une conception électrique complète englobant protection, contrôle-commande et supervision.

tingue du contrôle-commande de procédé par quelques différences élémentaires qui influent sur le déroulement des échanges.

Le contrôle-commande de procédé met classiquement en œuvre des boucles de régulation: les mesures échantillonnées, remontées des capteurs, sont transmises à un automate qui exécute des algorithmes de commande et envoie des ordres aux actionneurs. Ces actions se répètent de façon cyclique, selon une fréquence d'échantillonnage et un temps de cycle impérieux.

- Protection/Disjoncteur
- ◀ Flux de données
- GOOSE MT -> MT
- - GOOSE BT -> MT



Lorsqu'un réseau ou un bus de terrain fédère des contrôleurs d'automatismes, des capteurs et des actionneurs, quantité de boucles de régulation imbriquées se partagent tour à tour la bande passante. Concevoir ce type de système oblige souvent à ordonnancer et à « caser » le plus grand nombre possible de paquets de données cycliques dans la bande disponible.

À chaque cycle, la lecture des données capteurs et la commande des actionneurs se font à intervalles fixes, chaque créneau temporel étant dicté par la durée du cycle. Ce temps de cycle, déterminé en

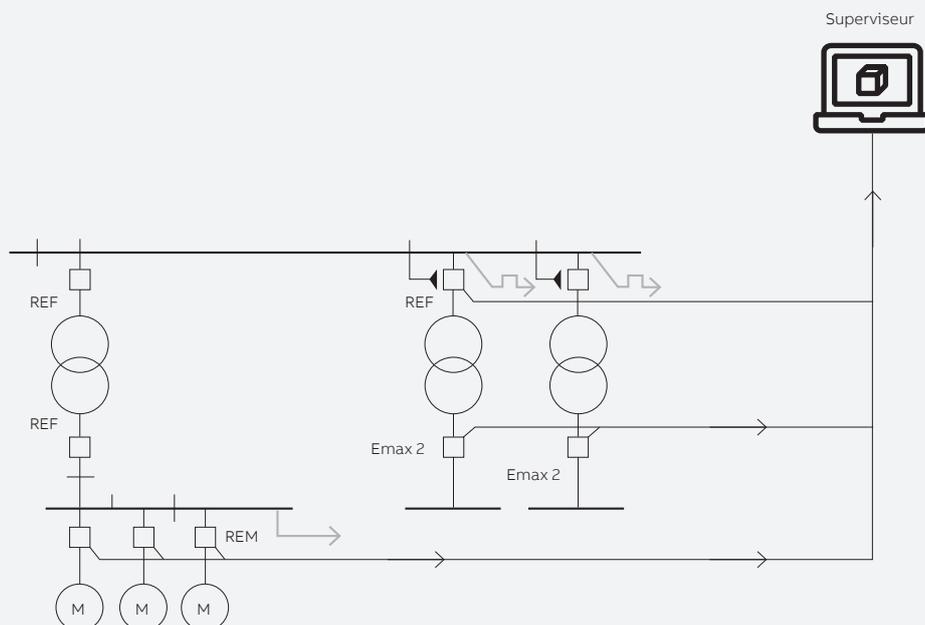
—  
**Le traitement efficace de la communication événementielle, non planifiée, est l'un des atouts différenciateurs de la CEI 61850 qui s'appuie sur des paquets de données spéciaux ou « messages GOOSE ».**

phase de conception du système, provoque un retard entre la détection d'un changement de valeur par le capteur et l'exécution de la commande par l'actionneur. Ce délai n'est pas un souci tant qu'il est compatible avec les constantes de temps du procédé piloté.

Dans le domaine électrique, la protection et la supervision suivent un principe différent : les grandeurs électriques sont mesurées par le superviseur au cours de cycles relativement lents et ces mesures ne sont normalement pas utilisées dans les boucles de régulation. Pour autant, sur apparition d'un défaut, les dispositifs de protection qui l'ont détecté doivent brusquement pouvoir diffuser l'information le plus vite possible puisque d'autres équipements en ont besoin pour décider du disjoncteur à déclencher. Organiser ces échanges selon un principe séquentiel ou cyclique, qui veut que chaque équipement attende son tour pour accéder au support de transmission, introduirait des retards inacceptables. Le traitement efficace de cette communication événementielle, non planifiée, est l'un des atouts différenciateurs de la CEI 61850 ; il s'appuie sur la messagerie dédiée GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Events) qui substitue au temps de cycle des échanges entre équipements industriels un temps de latence représentant le délai entre l'apparition d'un événement et la transmission de l'information correspondante sur le réseau →2.

Autre spécificité GOOSE : à la communication classique verticale entre appareils de terrain et superviseur s'ajoute la possibilité de flux inter-équipements, d'égal à égal.

— État normal



—  
04 Installation sur site client

—  
05 Vue d'ensemble de l'appareillage BT et MT fourni par ABB au site client.

Ainsi, une sélectivité logique ou un interverrouillage entre deux disjoncteurs peut être exécuté par échange direct entre équipements concernés, sans passer par une unité centrale de traitement de l'opération. Cette communication horizontale améliore à la fois les performances (temps de réaction

—  
**L'interopérabilité vise fondamentalement à intégrer en un même système des équipements de différents constructeurs, sans passer par des passerelles propriétaires ou autres développements spécifiques, très gourmands en ressources.**

global plus court et meilleur usage du canal de transmission) et la fiabilité, une défaillance de l'unité centrale ne compromettant pas le plan de protection de l'ensemble.

Outre ces fonctions de signalisation des défauts, les messages GOOSE peuvent servir à implanter un mécanisme de diagnostic intégré dans le système de protection. Chaque équipement est configurable pour envoyer un message GOOSE à intervalles réguliers (toutes les secondes, par exemple) afin d'informer ses congénères de son fonctionnement normal. En l'absence de réception de ce message, les destinataires ont la possibilité d'émettre une alarme, de passer dans un mode sécurité prédéfini ou d'agir en conséquence →3. Ces diagnostics empruntent le même support de transmission que les autres paquets de données, sans nécessiter de matériel supplémentaire.

#### Développement et configuration

Les autres avantages de la CEI 61850 ont trait aux processus de développement et de configuration. Vu la complexité et le nombre d'équipements en jeu, impossible de concevoir un système de protection sans structure informatisée ! L'ingénieur serait en effet submergé par la masse de détails de configuration et d'exploitation, qui sont autant de sources d'erreur. La parade CEI 61850 tient dans la standardisation des objets et types de données, ainsi que la formalisation des descriptions électroniques d'équipements.





05

Les IED de protection peuvent être très complexes. La norme lève cette difficulté en décrivant chaque équipement sous la forme d'un ensemble d'objets logiques qui peuvent être publiés dans l'application. Ces objets sont assez abstraits pour convenir à des équipements de différents types ou constructeurs, mais aussi suffisamment réalistes pour coller au développement en cours. C'est le cas, par exemple, de la protection contre les surintensités, de la mesure de courant et de tension, de la commande d'un appareillage de coupure, etc.

La modélisation CEI 61850 s'appuie sur un catalogue d'objets logiques normalisés, assortis de significations précises et de paramètres et données applicables. Tous les équipements normalisés CEI 61850 utilisent les mêmes objets pour exécuter la même fonction, ce qui permet de les combiner et de les mettre en commun dans l'application finale.





06

—  
06 Panneau de transformateurs sur site client

—  
07 Sélectivité de déclenchement de disjoncteur basée sur GOOSE

Cette standardisation va jusqu'au nom des objets (« PTOC », par exemple, représentant toujours une protection de surintensité) pour faciliter leur reconnaissance et leur utilisation par l'ingénieur d'études. Les types de données sont également

—  
**Point fort de la messagerie GOOSE : ses performances de communication inter-équipements, d'égal à égal.**

fixés par la CEI 61850 afin que le résultat d'une mesure, par exemple, soit systématiquement défini par son nom, ses unités, ses indicateurs qualité, etc., réduisant la probabilité d'erreurs.

Pour parfaire cette standardisation, la norme définit un format électronique commun de description des équipements et systèmes.

Tout dispositif (IED dans notre cas) s'accompagne d'un fichier de description de configuration de poste en langage SCL (Substation Configuration description Language), qui énumère la totalité de ses propriétés et objets logiques.

Les fichiers SCL peuvent être lus et traités par les outils de développement logiciel CEI 61850 pour fluidifier le processus et limiter les erreurs. Ce langage électronique formalisé facilite l'interopérabilité des équipements multiconstructeurs ; tant que les objets mis en œuvre ont leur descriptif SCL, l'utilisateur n'a pas à se soucier de leur fonctionnement interne.

#### **Nouveaux horizons**

Les IED existants sont pour la plupart des relais de protection utilisés dans des installations MT. Pourtant, la CEI 61850 a toute sa place en BT. En témoignent les disjoncteurs Emax 2 d'ABB, premiers appareils à coupure dans l'air à être nativement dotés d'une interface 61850.

Il en va de même pour l'unité de protection numérique Ekip d'ABB, qui peut équiper des disjoncteurs Emax 2 de 800 A à 6300 A et communiquer avec un

—

## Les disjoncteurs Emax 2 d'ABB sont les premiers appareils à coupure dans l'air à être nativement dotés d'une interface 61850.

large choix de protocoles. On peut ainsi pleinement intégrer les systèmes de supervision et de protection BT/MT, en bénéficiant d'une fiabilité d'installation nettement améliorée et d'un interfaçage plus transparent et unifié avec la supervision.

### La crème de la crème

L'appareillage BT et MT récemment installé par ABB sur un site client, à Ferentino (Italie) est un excellent exemple de cette démarche d'intégration. L'usine, l'une des plus imposantes de sa catégorie, fournit quelques-unes des marques de crème glacée les plus réputées d'Italie.

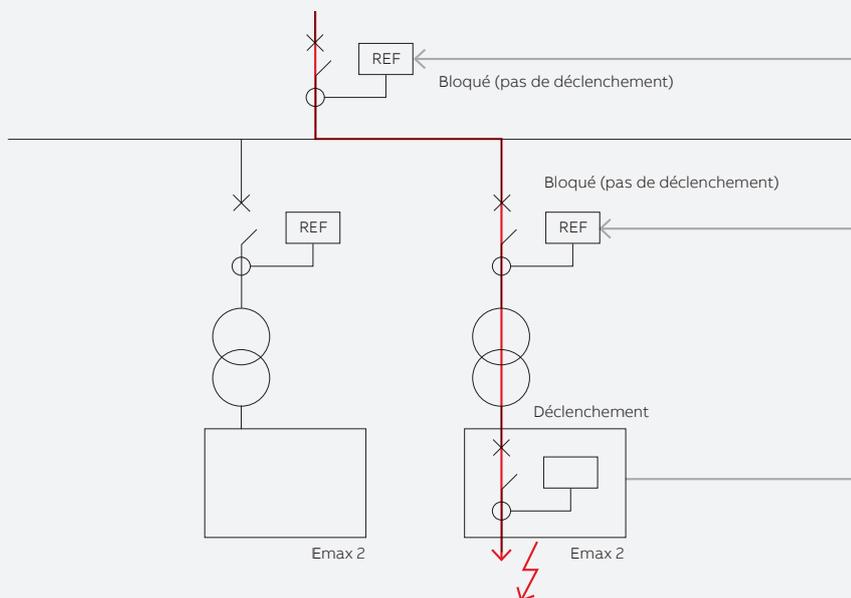
L'installation comporte un tableau principal de 20 kV doté d'un appareillage de distribution secondaire UniSec pour le raccordement au réseau électrique et d'un second tableau alimentant plusieurs transformateurs de 4 MVA et 3 MVA. Ceux-ci sont à leur tour reliés à un tableau de 6 kV qui alimente les moteurs du procédé et les principaux appareillages BT. De fourniture tierce, ces derniers utilisent

des disjoncteurs Emax 2 d'ABB. Tous les relais MT (REF611, REF542+, RIO600) et les protections moteurs REM sont connectés par un bus CEI 61850, qui relie également les trois Emax 2 servant d'arrivées principales à la partie BT →4-6.

La mise en œuvre de la CEI 61850 sur les systèmes de protection BT/MT autorise un certain nombre de fonctionnalités avancées, dont la plus importante est la sélectivité logique sur apparition de court-circuit. En cas de court-circuit sur l'une des alimentations des moteurs MT, son relais envoie immédiatement un message GOOSE aux protections amont (relais REF de protection des transformateurs et interfaces) pour les empêcher de déclencher ; seul le disjoncteur installé au plus près du défaut reçoit l'ordre d'ouverture →7. On évite ainsi la perte inutile de puissance dans les autres parties de l'usine tout en maximisant la disponibilité du process.

De même, en cas de court-circuit côté BT, le disjoncteur Emax 2 concerné, tout en éliminant le défaut, envoie un message GOOSE aux relais REF pour éviter tout déclenchement inutile du disjoncteur MT.

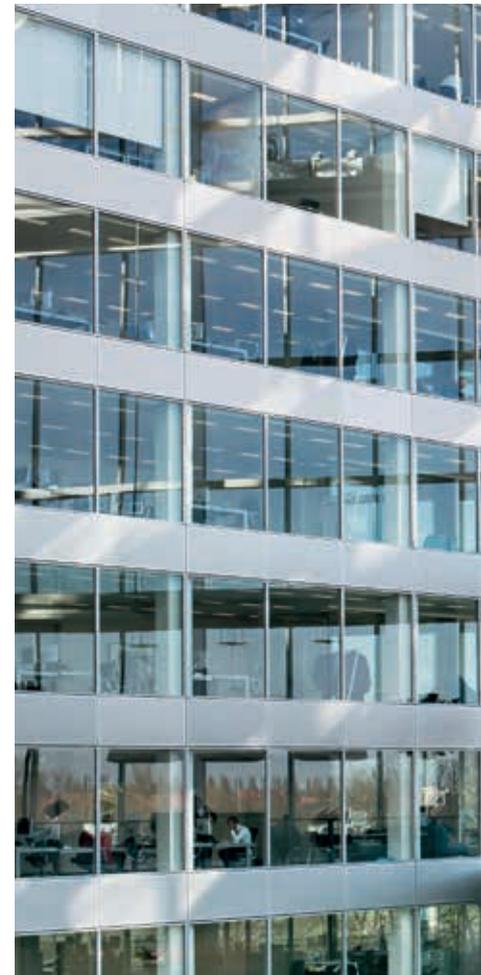
Au-delà d'une sélectivité logique améliorée et d'une fiabilité globale renforcée, l'utilisation d'un protocole unique offre une interface commune à la supervision et à la surveillance du site, et fournit aux opérateurs davantage de données de meilleure qualité pour faire tourner l'usine à son optimum. ●



PROTECTION ET SÉCURITÉ

# Éclairer le chemin avec ABB

L'éclairage d'urgence Guideway d'ABB améliore la sécurité dans l'immeuble le plus écologique au monde et réduit la facture énergétique et le budget maintenance de 57% sur 12 ans.



02



**Barbara Brokken**  
ABB Electrification Products,  
Installation Products  
Emergency Lighting

Barendrecht (Pays-Bas)  
barbara.brokken@tnb.com

Comment l'architecture de demain peut-elle concilier sécurité renforcée et faible consommation d'énergie? The Edge, bâtiment le plus « vert » au monde, situé à Amsterdam (Pays-Bas), établit une nouvelle référence en matière d'éclairage d'urgence avec la solution ABB Guideway. Les appliques lumineuses à pictogramme vert sont tout à fait visibles à la lumière du jour et consomment 57% d'énergie en moins que les tubes fluorescents classiques, grâce à leurs ampoules LED de forte puissance. Leur conception allie discrétion et grande visibilité. Cette signalétique dépourvue de cadre se fond dans l'environnement →1.

C'est le principal atout de l'éclairage d'urgence d'ABB. Il attire l'attention seulement en cas de besoin. Les grandes baies vitrées, très prisées des architectes contemporains, induisent de nouvelles exigences en matière de signalétique de sécurité.

—  
Les appliques lumineuses à pictogramme vert sont parfaitement visibles à la lumière du jour et leurs ampoules LED de forte puissance réduisent la consommation d'énergie de 57%.



01

En cas d'évacuation d'urgence dans la journée, les appliques doivent clairement indiquer aux occupants de l'immeuble le chemin le plus rapide vers la sortie!

Les appliques lumineuses à pictogrammes Guideway d'ABB montrent la voie à emprunter avec une luminance de 500 candela/m<sup>2</sup> (à comparer aux 200 à 300 cd/m<sup>2</sup> d'un écran LCD d'ordinateur portable).

#### Pleins feux sur le design

En décembre 2014, The Edge a reçu la note exceptionnelle de 98,4%, la meilleure jamais attribuée



—  
01 Version murale de l'éclairage d'urgence Guideway d'ABB

—  
02 Grâce à ses grandes baies vitrées, The Edge est baigné de lumière. La luminance de 500 cd/m<sup>2</sup> de Guideway y est donc capitale.

—  
03 QR code pour vidéo sur le produit Guideway (en anglais)

—  
04 QR code pour vidéo sur l'installation de Guideway (en anglais)

—  
**Bibliographie**  
[1] BREEAM-NL, The Edge Amsterdam, disponible en ligne sur : <https://www.breeam.nl/projecten/edge-amsterdam-0> (consulté le 6 avril 2016)

avec la méthode BREEAM-NL (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) [1]. Un tel résultat en matière de respect de l'environnement exigeait bien évidemment un d'éclairage d'urgence à la hauteur. Guideway a répondu à ces attentes.

—  
**La durée de vie de la source lumineuse étant de 100 000 heures, la probabilité de devoir la remplacer est divisée par 10 sur 12 ans**

#### Une sécurité accrue

Tim Sluiter, chef du projet The Edge chez Deloitte explique : « Ce bâtiment est tout en transparence, fait de lignes claires et de matériaux sophistiqués ; les gros luminaires n'y ont donc pas leur place →2. Nous étions à la recherche d'une solution élégante

et bien conçue, en accord avec notre vision du bâtiment : un vaste atrium, des passerelles ouvertes et de généreux espaces très lumineux. Des open spaces qui, avec la lumière du jour ou les reflets, nuisent à la visibilité des chemins d'évacuation. Nous avons finalement opté pour les luminaires Guideway avec leur plaque extra plate et leur cadre en acier très fin. Mais l'atout distinctif de la solution ABB, c'est sa très grande qualité visuelle. Si vous vous trouvez à l'extrémité d'une passerelle, vous pouvez voir votre chemin jusqu'à l'autre bout, où la signalétique est clairement visible. Ce luminaire se conforme bien entendu à toutes les réglementations et se voit facilement jusqu'à 32 mètres de distance.

Chez Deloitte, la sécurité et la santé de nos collaborateurs, notre capital humain, sont essentielles. Nous devons prendre soin d'eux. L'éclairage d'urgence est primordial dans ce domaine. »

#### Une solution économique

L'applique à pictogramme émet une lumière forte et homogène sur toute sa surface grâce à une technologie LED de pointe qui réduit la consommation d'énergie et la maintenance de 57% par rapport à un tube fluorescent. Sa durée de vie étant de 100 000 heures, la probabilité de devoir remplacer la source lumineuse est divisée par 10 sur 12 ans. ●



03



04

## PROTECTION ET SÉCURITÉ

# Des traversées au top et au sec

Composants essentiels de tous les réseaux électriques, les traversées-condensateurs haute tension peuvent être le siège de fortes contraintes électriques entraînant leur défaillance et, dans le pire des cas, leur explosion. D'où le soin particulier apporté à la conception et à la fabrication des traversées exploitées sous 800 kV.



Lars Jonsson  
Roger Hedlund  
ABB Insulation and  
Components, Bushings

Ludvika (Suède)  
lars.y.jonsson@se.abb.com  
roger.hedlund@se.abb.com

Les traversées-condensateurs haute tension (HT) sont des pièces maîtresses des réseaux électriques. Or cet environnement les soumet à de fortes contraintes électriques qui peuvent entraîner leur défaillance et des conséquences catastrophiques allant jusqu'à l'explosion. Pour minimiser ces risques, les énergéticiens ont tout intérêt à spécifier dans leur cahier des charges une isolation de type sec avec isolateur externe en matériau non cassant. Pour atteindre l'objectif de fonctionnement zéro défaut, les traversées destinées à des tensions réseau de 800 kV et au-delà exigent une conception et une fabrication des plus soignées qui ne se confinent pas au franchissement de nouveaux paliers de tension mais doivent multiplier les innovations technologiques →1.

Les traversées-condensateurs sont des équipements familiers de la haute tension. Malgré leur apparente simplicité, ces composants indissociables du réseau électrique sont le fruit de techniques de conception et de fabrication très pointues.

Les traversées-condensateurs ont principalement trois constituants : à l'extérieur, un isolateur qui minimise les courants de fuite et évite les contournements ; à l'intérieur, une structure à répartition capacitive constituée d'une interposition de couches conductrices et de papier, ou « corps condensateur », pour distribuer et stabiliser le

champ électrique ; enfin, un cylindre massif servant de conducteur de courant →2. Pour renforcer sa rigidité diélectrique, l'isolant interne est imprégné d'huile de transformateur (Oil-Impregnated Paper, OIP) ou de résine polymérisable (Resin-Impregnated

—  
Depuis les années 1980,  
le caoutchouc de silicone a peu  
à peu détrôné la céramique.

Paper, RIP). Les traversées OIP, apparues dans les années 1950, dominent encore le domaine des plus hautes tensions, c'est-à-dire supérieures à 735 kV. Si les traversées RIP ont peu à peu investi la haute tension, elles ont mis plus de temps à franchir le cap de la très haute tension, freinées en cela par des obstacles techniques mais aussi par le conservatisme de la filière électrique.

Le matériau de prédilection de l'isolateur externe fut longtemps la céramique. Plusieurs types de polymères furent testés au fil des ans mais leur sensibilité à la lumière du soleil avait pour inconvénient d'abrèger leur durée de vie. Cela n'a pas empêché le caoutchouc de silicone de détrôner peu à peu la céramique dans les années 1980. Ce matériau atteint son maximum d'absorption énergétique à des longueurs d'onde inférieures

—  
01 Les traversées à isolation sèche destinées à des tensions de 800 kV et au-delà exigent une conception et une fabrication des plus soignées. En photo, les essais électriques individuels de la première livraison commerciale ABB.

à celles du rayonnement solaire, ce qui lui confère une longévité très supérieure à celle des autres polymères.

#### Avantages de l'imprégnation de résine

La technologie RIP minimise les conséquences d'une défaillance de traversée. Si un contournement phase-terre peut avoir bien des causes (défaut de la traversée elle-même ou contraintes électriques, mécaniques ou thermiques du réseau), dans une traversée OIP, il déclenche

—  
**L'étude mécanique de la traversée isolée à sec de 800 kV a demandé beaucoup d'efforts, notamment pour répondre aux exigences sismiques.**

presque toujours une explosion avec éclatement des isolateurs et projection d'huile. Les conséquences sont catastrophiques quand les transformateurs prennent feu [1]. L'absence d'huile hautement inflammable et énergétique dans les traversées RIP élimine amplement ce risque d'incendie. D'autres critères plaident pour cette technologie [2], [3]. Outre le fait qu'ils n'éclatent pas en cas de défaillance, les isolateurs composites en caoutchouc de silicone extrudé sur tube à enroulement filamentaire ont bien d'autres vertus :

- La structure chimique du silicone les rend hydrophobes; l'eau perle en surface sans pénétrer dans le matériau, réduisant les courants de fuite (et donc l'érosion) et les risques de contournement dans les conditions climatiques extrêmes.
- La continuité du procédé de fabrication crée une liaison chimique entre le tube et l'isolateur: ces deux constituants étant dénués de joints, la répartition du champ électrique y est homogène et continue, sans grand risque de pénétration d'humidité. Il n'y a pas non plus de lignes de joint pour éviter toute accumulation de sel et de polluants →3.
- L'extrusion est l'occasion d'optimiser le profil de la jupe d'isolateur pour différentes applications, ce qui permet de réduire encore le champ électrique et diminue d'autant le risque de cheminement en surface et d'érosion [2].
- L'isolant polymère est un caoutchouc vulcanisé à haute température (HTV), mélange savamment dosé de silicone pur chargé au trihydrate d'aluminium (ATH). Outre sa tenue mécanique, la charge ATH offre une bonne résistance à la chaleur et au feu; le matériau recouvre rapidement son hydrophobicité (après une forte pluie, par exemple), si l'on utilise une quantité optimale d'ATH. Sur le terrain, le caoutchouc HTV fait preuve d'une excellente résistance à l'érosion tout en préservant durablement ses propriétés hydrophobes [4].
- Ce type d'isolateur est nettement plus léger et mécaniquement plus résistant que ses homologues en céramique: des avantages qui se

01





02

—  
02 Principaux constituants d'une traversée : isolateur externe (à gauche), isolant interne, bride de montage et conducteur (à droite)

—  
03 Fabrication de l'isolateur externe

—  
04 Détails de l'analyse de la bride de montage par la méthode des éléments finis

—  
05 Calculs par éléments finis des jupes de silicone

traduisent par une amélioration de la tenue sismique et aux courts-circuits, et une limitation des dommages lors du transport ou de la manutention.

### Prérequis sous 800 kV

Le développement de traversées à isolation sèche pour le niveau de tension de 800 kV impose de prendre en compte

- la tenue au choc de manœuvre sous pluie qui, dans une large mesure, détermine la longueur de la traversée et constitue un important facteur de coût. Ce critère est surtout important pour les traversées RIP dont la longueur est étroitement liée aux processus complexes de moulage et de durcissement, aux dimensions de l'enceinte du procédé, aux spécifications des machines d'usinage, etc. ;
- les exigences de tenue sismique dans certaines régions du monde : en phase de développement, les fabricants de transformateurs et leurs clients énergéticiens doivent se concerter pour évaluer, entre autres, les angles de montage et les éléments de renfort structuraux sur le lieu d'installation de la traversée ;
- les conditions locales, comme la température ambiante ;
- la souplesse de conception qui permet d'adapter les caractéristiques dimensionnelles aux équipements en place, quel que soit le constructeur.

### Aspects mécaniques

L'étude mécanique de la traversée isolée à sec de 800 kV a demandé beaucoup d'efforts, surtout au regard des règles de conception parasismique.

Pour cela, elle a grandement bénéficié de la solide expérience acquise lors des essais sismiques menés sur les traversées GSB d'ABB, notamment dans les domaines de la modélisation et de l'ana-

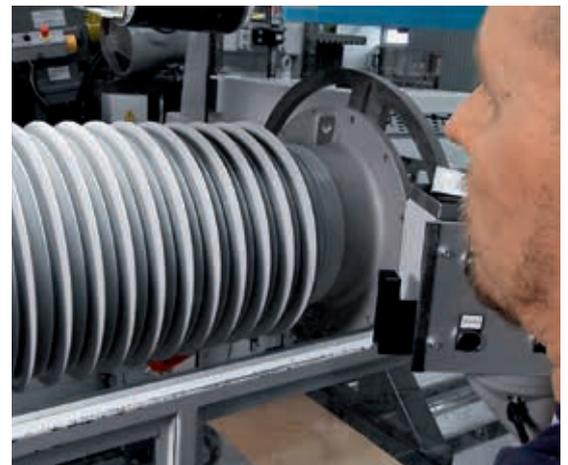
lyse de l'amortissement et de la fréquence naturelle. Pour autant, plusieurs analyses par la méthode des éléments finis (MEF), aussi bien linéaires que non linéaires, ont été effectuées, suivies d'essais de vérification de composants critiques. Les analyses dynamiques ont été réalisées aussi bien avec des spectres de réponse spécifiés que des spectres de réponse d'essai. Les résultats des calculs, vérifiés par tests sur table vibrante en vraie grandeur, sont conformes aux exigences du standard international IEEE 693-2005 et d'autres spécifications locales encore plus contraignantes →4.

Le système à tige de traction utilisé par ABB depuis les années 1970 pour simplifier l'installation et le remplacement sur site des traversées a soulevé des problèmes mécaniques qui ont entraîné une refonte partielle de la solution. Comparées aux traversées imprégnées d'huile à isolateurs céramiques utilisées aux mêmes niveaux de tension, les traversées RIP présentent une plus grande dilatation thermique qui ne permet pas de conserver la force de contact entre les différents éléments conducteurs de courant sans remettre à plat la conception. Des études mécaniques approfondies, portant sur les cas de voilage, la force de court-circuit, les forces de contact, etc., ont été réalisées avec l'apport des analyses MEF et des essais correspondants.

Les traversées sèches ayant généralement du mal à dissiper la chaleur, il fallut parfois combiner de nouveaux matériaux à faible résistivité pour réduire les pertes. Ce ne fut pas sans poser des problèmes de protection anticorrosion en milieu industriel difficile et en bord de mer. Qui dit nouveaux matériaux, dit aussi nouveaux systèmes d'étanchéité. Tous ces développements, y compris ceux ayant trait à la corrosion, ont été vérifiés par des essais.

### Aspects thermiques

L'échauffement diélectrique de l'isolant interne peut être significatif. Pour parer aux pertes diélectriques et résistives, les traversées isolées dans



03

— Cet article est tiré de la communication « Development of dry-insulated 800 kV transformer bushings » donnée par les auteurs au colloque CIGRÉ-CEI 2016, à Montréal (Canada).

#### Bibliographie

[1] Tenbohlen, S., et al., « Development and Results of a Worldwide Transformer Reliability Survey », CIGRÉ SC A2 Colloquium, Shanghai (Chine), 2015.

[2] Jonsson, L., et al., « Dry transformer bushings with composite insulators – the obvious combination for increased reliability », TechCon Asia-Pacific, 2013.

[3] Jonsson, L., « Fire and safety aspects on high-voltage bushings », World Congress on Insulators, Arresters and Bushings, 2009.

[4] Gutman, I., et al., « Long-term service experience and inspection results of HV equipment made of silicone rubber insulators », réf. 412, session CIGRÉ, Auckland (Australie), 2013.

l'huile sont refroidies par convection, ce qui n'est pas le cas des traversées RIP. Cela impose une étude théorique poussée de leur conception pour garantir la stabilité thermique dans toutes les conditions d'essai et de fonctionnement, et la tenue aux surcharges.

Lors des essais de cyclage thermique, la température ambiante varie de  $-50$  à  $+40$  °C, suivant des rampes de montée et de descente soigneusement spécifiées. La principale difficulté réside ici dans les gradients thermiques élevés et les contraintes mécaniques associées, qui résultent de la masse froide du corps condensateur et des hausses de la température ambiante.

Des analyses détaillées par calorimétrie différentielle à balayage et analyse thermomécanique dynamique, par exemple, furent nécessaires pour comprendre le détail des phénomènes de cristalli-

## La nouvelle gamme de traversées ABB a donné lieu à une toute nouvelle installation de production.

sation à différentes températures de refroidissement et les modes d'apparition des contraintes dans les matériaux. On procéda à des analyses MEF approfondies des processus de refroidissement et de cristallisation dans différentes parties de l'isolant, puis à des vérifications et des essais sur les composants, avant les essais finaux en vraie grandeur sur la traversée complète. Ces analyses permirent, entre autres, d'optimiser certaines étapes de la fabrication de l'isolateur externe →5.

#### Fabrication

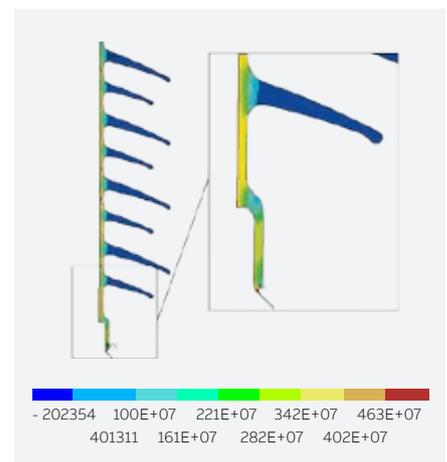
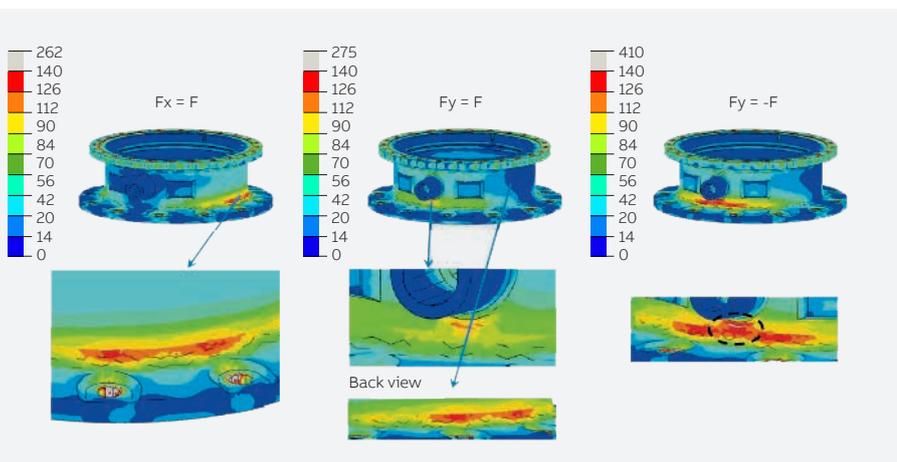
Les traversées HT nécessitant généralement de très faibles niveaux de décharges partielles, l'un des plus grands défis de la fabrication de traver-

sées RIP est l'imprégnation et le durcissement de l'isolant interne. L'aptitude à gérer la complexité des procédés de fabrication avec un minimum de dérive est à ce stade décisive. Il fut également difficile de tirer directement parti de l'expérience acquise sur les produits existants destinés à de plus faibles tensions car bon nombre de leurs paramètres critiques n'évoluent pas de manière linéaire, mais sont de nature quadratique ou même cubique. Il en résulte une démultiplication des exigences sur les équipements de production par rapport aux spécifications de départ : une traversée sèche de 800 kV, par exemple, pèse plus du double d'un produit correspondant à 500 kV et est 40 % plus longue côté air !

À ces niveaux de tension, la difficulté réside beaucoup dans la maîtrise des techniques d'enroulement et d'interposition des différentes couches conductrices du corps condensateur. Les variations dimensionnelles apparaissant au séchage altèrent davantage le plan axial que le plan radial. Les phénomènes thermiques en présence font également que les outils de production doivent être dimensionnés pour parer à d'importantes modifications de longueur en cours de moulage.

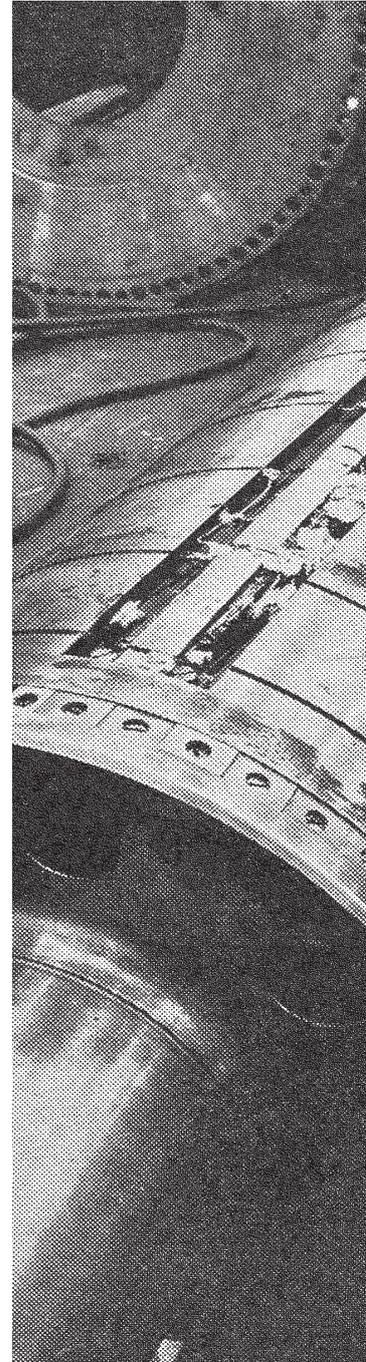
Ce sont en l'occurrence près de 2000 kg de résine époxyde qu'il faut injecter dans le corps en cellulose, puis faire durcir sans former de cavités gazeuses, sièges de décharges électriques lors des essais individuels finaux, conduisant à la mise au rebut de la traversée. D'où l'importance d'une étroite surveillance du processus de durcissement.

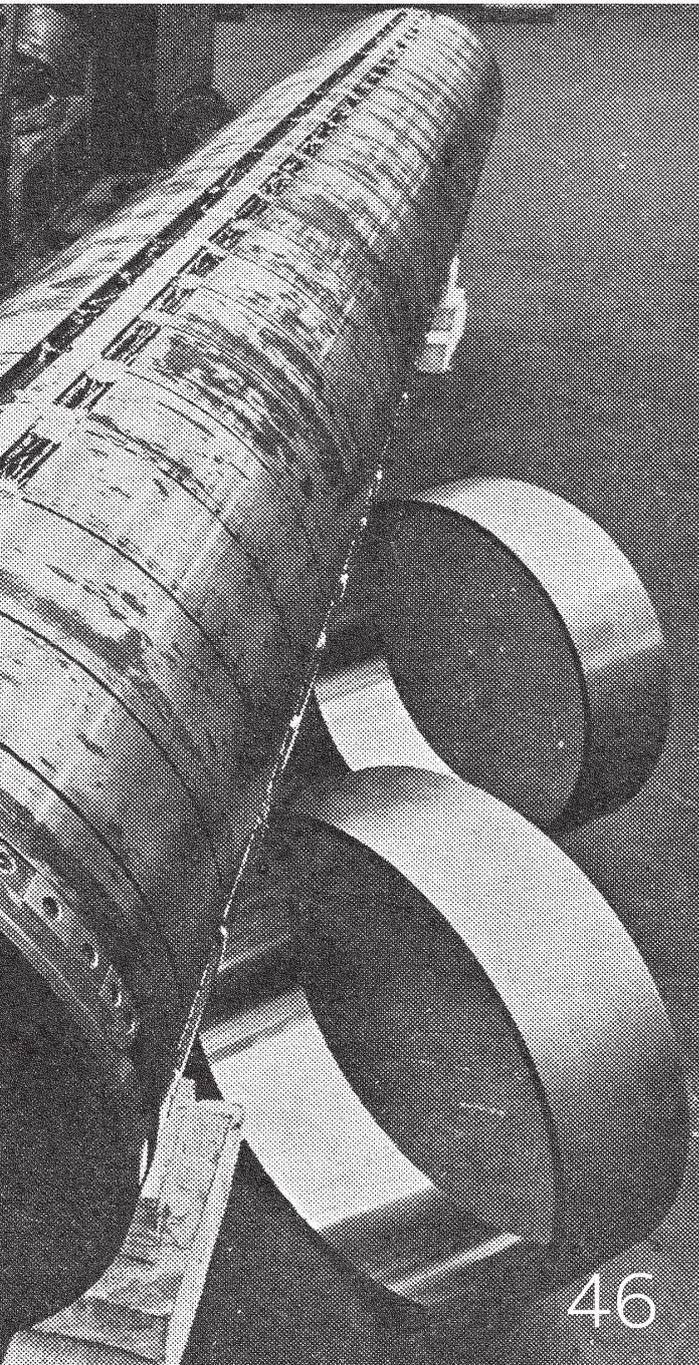
La fabrication de cette nouvelle gamme de traversées ABB, commercialisée depuis 2015, a donné lieu à la construction d'une toute nouvelle usine dotée de moyens de production et de contrôle ultramodernes. ●





# Mesure





Collecter les informations d'un laminoir métallurgique en fonctionnement pose bien plus de défis que la récupération et l'agrégation des données utilisateurs d'un téléphone mobile. C'est là toute la différence entre les exigences de performance de l'industrie et celles des technologies grand public !

Concrétiser cette ambition dans l'usine est aussi compliqué que primordial, car c'est ce qui procure aux clients les leviers de progrès leur permettant d'accroître la qualité, le rendement et la productivité, en milieu sécurisé. Pionnier de la mesure de planéité avec Stressometer®, il y a un demi-siècle, ABB n'a eu de cesse d'innover dans ce domaine, tout comme dans celui du contrôle d'épaisseur. Pour preuve, sa toute nouvelle jauge micrométrique MTG Box est elle aussi fondée sur les dernières avancées technologiques.

Ces deux outils sont accessibles par smartphone.

- 40 Mesure d'épaisseur à courants de Foucault pour métaux non ferreux
- 46 Stressometer® fête ses 50 ans

## MESURE

# Mesure d'épaisseur à courants de Foucault pour métaux non ferreux

Les jauges d'épaisseur micrométrique MTG (Millmate Thickness Gauges) d'ABB, basées sur la technologie des courants de Foucault pulsés, fiables et optimisent la mesure et le contrôle des produits de laminage en bandes, tout en écartant les dangers pour la santé, la sécurité et l'environnement.



**Lennart Thegel**  
**Eva Wadman**  
ABB Industrial Automation  
Measurement & Analytics

Västerås (Suède)  
lennart.thegel@se.abb.com  
eva.k.wadmann@se.abb.com

Les systèmes de mesure d'épaisseur micrométrique MTG d'ABB associés à la technique des courants de Foucault pulsés (CFP) répondent parfaitement aux besoins des producteurs de métaux non ferreux en bandes. Qu'il s'agisse du système de jauges MTG à cadre en C ou du boîtier de mesure « gapless » MTG Box, ABB présente le dernier cri de l'instrumentation de mesure d'épaisseur capable de fonctionner dans les conditions difficiles des laminoirs tout en s'affranchissant des dangers que font peser les techniques radiométriques sur la santé, la sécurité et l'environnement. La jauge MTG gapless permet des mesures au cœur du procédé de laminage, là où les autres méthodes sont inopérantes. Avec ses capteurs de haute technologie, ABB satisfait aux attentes de fiabilité, d'efficacité et d'économie des producteurs de bandes de métal non ferreux, tel que l'aluminium, pour les industriels de l'emballage et de l'automobile →1.

C'est grâce à sa légèreté, à sa recyclabilité et à son esthétique que l'aluminium s'est imposé comme matériau incontournable dans de nombreux secteurs de la grande consommation et de l'industrie. Cela se traduit aujourd'hui par une demande mondialisée de produits laminés et des investissements massifs dans les capacités de production pour répondre à un usage en forte progression au cours de la dernière décennie, dans l'emballage (canettes) et l'automobile (éléments de structure, pièces de carrosserie et panneaux extérieurs),

notamment les segments du haut de gamme et des grands volumes →2.

Dans ce dernier secteur, l'aluminium « brille » par sa faible densité et sa résistance relativement élevée, idéales pour remplacer l'acier. Il procure au véhicule une légèreté, elle-même gage de réduction de la

—  
**La demande mondialisée de produits laminés amène à investir dans les capacités de production.**

consommation de carburant et des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour faire face à cette augmentation de la production d'aluminium en bandes, il faut moderniser les installations en les équipant des derniers progrès de l'instrumentation. ABB cumule à cette fin plus de 15 ans d'expertise dans le développement des mesures d'épaisseur de grande précision et dans l'optimisation des coûts de production.

## De la mesure avant toute chose

Depuis la révolution industrielle, les capteurs de mesure précis sont indispensables au contrôle-commande des procédés de fabrication. Pourtant, les contraintes et les difficultés inhérentes au milieu industriel, comme les laminoirs, peuvent dégrader leur fonctionnement, entraînant des

—  
01 Exploitation d'une  
jauge MTG Box d'ABB en  
milieu industriel

retards, des arrêts techniques et, partant, une hausse des coûts de production. C'est pourquoi ABB investit dans la recherche-développement de

—  
**Dans l'industrie de l'aluminium, l'épaisseur est l'une des premières propriétés à mesurer et à contrôler.**

capteurs non seulement adaptés à la grande variété de contraintes d'espace du laminoir, mais aussi insensibles aux conditions ambiantes et aux variations de composition du matériau, toujours en vue d'améliorer la production et de réduire les coûts.

#### Méthodes classiques

Dans l'industrie de l'aluminium, l'épaisseur est l'une des premières propriétés à mesurer et à contrôler. Le respect de tolérances étroites est primordial aussi bien pour le procédé que le produit lui-même. Les jauges radiométriques (à isotopes et à rayons X, par exemple), sont couramment utilisées depuis des décennies. Les jauges à rayons X exploitent le phénomène d'atténuation du rayonnement traversant la bande métallique :

un détecteur mesure l'intensité du rayonnement émis depuis une source située de l'autre côté de la bande ; l'épaisseur est calculée en sachant que cette intensité est affectée par les changements de densité dans l'écart de mesure.

Cette méthode a ses avantages, notamment la tolérance d'entrefers importants, mais aussi ses inconvénients : au-delà des dangers que la radiométrie fait peser sur la santé, la sécurité et l'environnement, elle pose également, dans le cas de l'aluminium, un problème de précision de la mesure. Qui dit faible densité, dit faible coefficient d'absorption ; des facteurs environnementaux comme la poussière, la vapeur et la température de l'air peuvent fausser les mesures qu'il faut alors corriger. De même, l'aluminium est généralement composé de plusieurs alliages pour obtenir les propriétés recherchées, dont la résistance. La présence d'autres métaux, comme le cuivre, influence l'absorption du matériau, compliquant la mesure par rayons X. Cette dépendance nécessite des corrections d'épaisseur allant jusqu'à 50 %, ce qui peut facilement représenter une dérive de 1 % manifestement très préjudiciable à la production d'aluminium en bandes.



**Innovations ABB**

Pour pallier ces lacunes, ABB a poursuivi sa recherche de la jauge parfaite pour les producteurs d'aluminium en bandes. L'année 2001 marque l'avènement de la jauge MTG à cadre en C pour la mesure d'épaisseur de métaux non ferreux laminés à froid. Ce capteur est destiné aux clients

---

En 2001, ABB introduit la jauge MTG à cadre en C pour la mesure d'épaisseur de bandes de métal non ferreux laminées à froid.

exigeant des mesures d'épaisseur précises pour l'aluminium, de même que le cuivre, indépendamment des conditions ambiantes du laminoir et des propriétés de l'alliage. Ce nouveau système est fondé sur la technologie brevetée CFP, qui s'affranchit des restrictions de la mesure radiométrique.

La technologie CFP utilise des bobines électriques qui créent des champs magnétiques générant des courants de Foucault lorsqu'on approche un métal non ferreux. Ces champs induisent une impulsion de tension dans la bobine; après brusque coupure du courant d'excitation constant alimentant la bobine, le champ magnétique est mesuré sous la forme d'une tension transitoire →3.

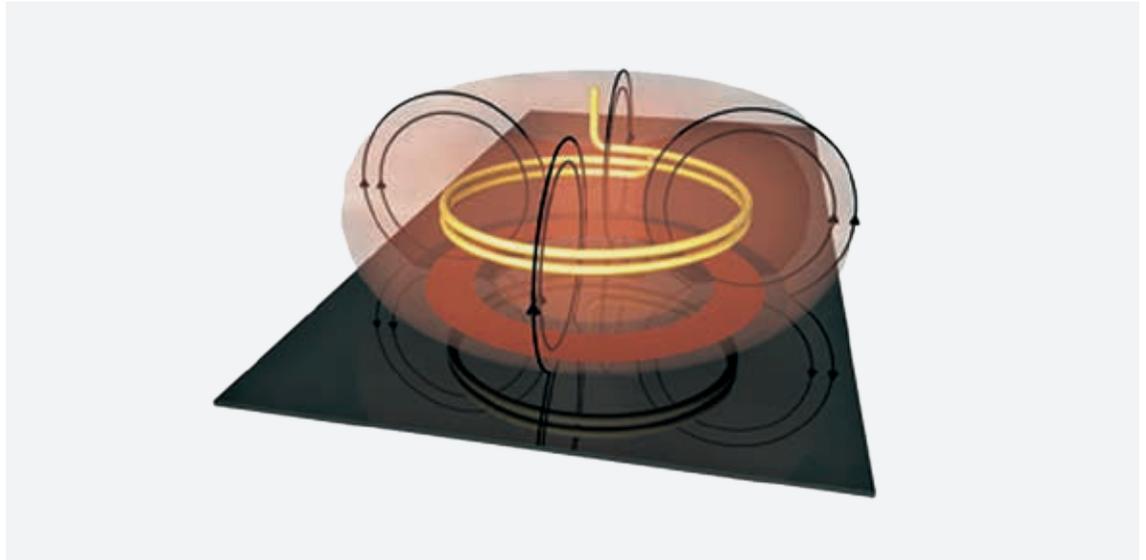
Les lamineurs sont désormais capables de mesurer des paramètres tels que la distance, la résistivité et l'épaisseur d'une bande de métal non ferreux, et ce avec une précision exceptionnelle, sans se soucier des propriétés de l'alliage ou des conditions ambiantes. L'utilisation de jauges MTG, de préférence aux jauges radiométriques, sécurise également le lieu de travail et évite de devoir former ou certifier le personnel, sans compter éliminer les matériaux et déchets radioactifs.



—  
02 La tendance est à l'augmentation du nombre de carrosseries automobiles en aluminium.

—  
03 La technique brevetée des courants de Foucault pulsés (CFP) repose sur de faibles champs magnétiques pour effectuer la mesure.

—  
04 Niveaux de précision obtenus dans la production d'aluminium en bandes



03

### Étalonnage

Dans l'idéal, les producteurs veulent des capteurs dix fois plus précis que les tolérances du produit; dans les faits, la précision des appareils courants ne dépasse guère trois à quatre fois cette valeur. De même, les mesures du matériau de référence servant à l'étalonnage doivent être trois à quatre fois plus précises que le capteur utilisé, soit au moins dix fois plus que les tolérances produit imposées à des canettes et à d'autres types de bandes d'aluminium →4. Conscient de ces exigences fortes, ABB a investi dans la technologie pour perfectionner l'étalonnage en simplifiant ses procédures.

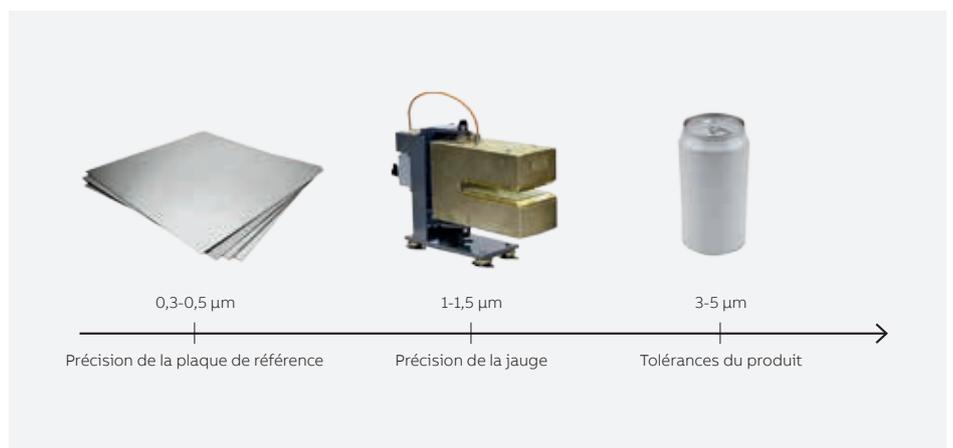
### Procédures d'étalonnage MTG

ABB fournit aux producteurs d'aluminium une instrumentation performante, fiable et précise pour compenser la présence de plusieurs alliages et éviter les vicissitudes de l'étalonnage (matériaux et procédures), surtout avec les jauges à rayons X: autant d'obstacles levés avec la mesure d'épaisseur MTG par courants de Foucault pulsés. L'application d'un faible champ électromagnétique donne lieu à

une mesure d'épaisseur sans contact, libérée de l'inconvénient du faible coefficient d'absorption de l'aluminium. Les mesures d'épaisseur n'étant pas subordonnées aux facteurs environnementaux ni aux propriétés du matériau, les plaques d'étalonnage aux spécifications client sont inutiles, ce qui

—  
Les clients peuvent mesurer la distance, la résistivité et l'épaisseur avec une précision exceptionnelle, sans se soucier des propriétés de l'alliage ou des conditions ambiantes.

minimise les temps d'arrêt pour étalonnage. Les systèmes MTG d'ABB sont livrés étalonnés et prêts à l'emploi. L'étalonnage a lieu tous les six mois, en 20 minutes. ABB livre le système avec 12 plaques d'étalonnage sur site nécessaires à la traçabilité métrologique et à la précision du capteur en place.



04

L'opération se déroule en deux étapes →5: la première étalonne les plaques de référence conservées chez ABB, et la seconde, les plaques d'étalonnage sur site incluses dans la fourniture MTG.

Les plaques de référence ABB sont étalonnées par comparaison avec des cales étalon assurant une traçabilité métrologique conforme aux organismes de normalisation NIST, PTB et NMIJ. ABB a pour cela mis au point une machine de mesure dimensionnelle précise. Les mesures de référence sont effectuées avec une sonde laser holographique, d'une résolution de 0,01 micromètre.

Seconde étape: les plaques d'étalonnage sur site sont étalonnées par comparaison directe avec les plaques de référence de mêmes épaisseur et propriétés de matériau, à l'aide d'une jauge MTG qui est à la fois étalonnée et stabilisée en température. À ce stade, les plaques sur site sont mesurées avec

—  
**La jauge MTG Box, brevetée ABB, se distingue par sa compacité, sa robustesse et l'utilisation de faibles champs magnétiques selon le principe de la mesure CFP.**

le capteur MTG et directement comparées aux plaques de référence. La précision est ici de 0,3 à 0,5 µm. Le client n'a pas besoin de plaques spécifiques ou de fréquentes opérations d'étalon-

nage pour atteindre les tolérances d'épaisseur si cruciales pour les producteurs d'aluminium.

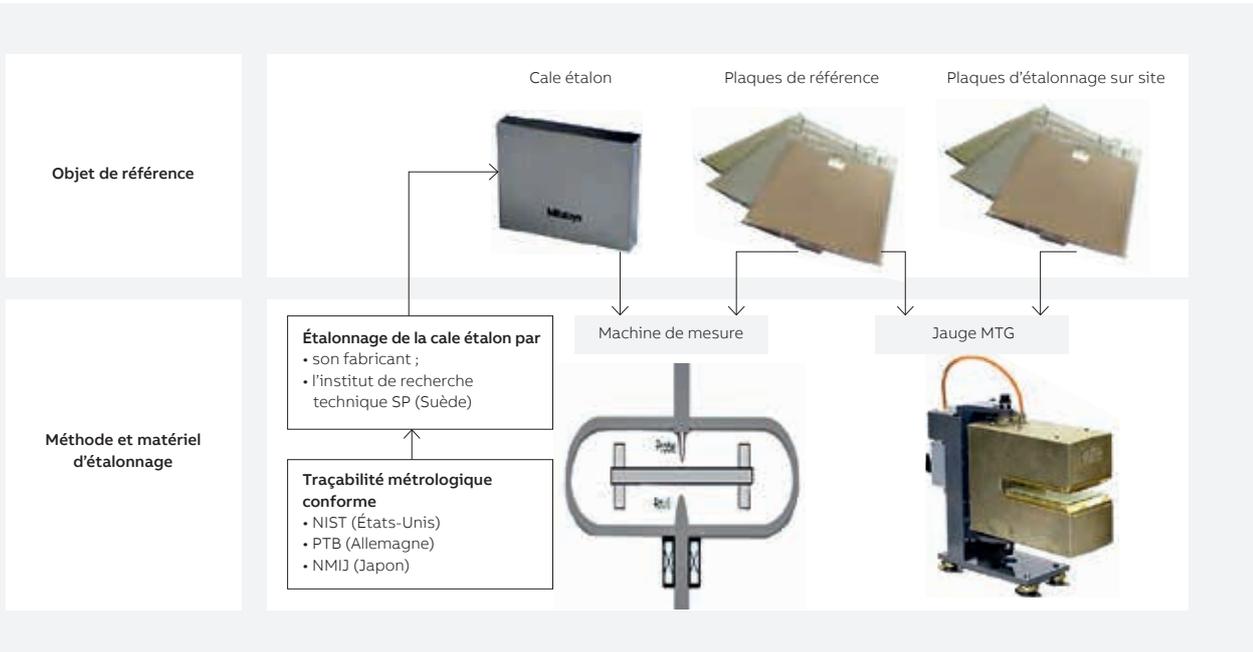
**Solution d'exception**

En 2016, ABB ajoute à sa panoplie de systèmes MTG pour la mesure de bandes d'aluminium dans les installations de laminage et de coulée conti-

—  
**This unique invention can be placed in the center of the production process.**

nue →6 une invention brevetée MTG Box, qui se singularise par sa compacité, sa robustesse et l'utilisation de faibles champs magnétiques selon le principe de la mesure CFP. La jauge est sûre et résistante aux chocs mécaniques. Autre atout de choix, le nouveau capteur est « sans écart » (gapless): rien au-dessus de la ligne de passe ne risque d'obstruer le passage de la bande en cours de mesure. Cette innovation ABB peut être implantée au cœur du process.

Habituellement installée sous la table de laminage, la MTG Box assure la protection en cours d'engagement et de dégagement de la tôle, et de rupture de bande. Tout comme le système MTG à cadre en C, ce nouveau capteur est insensible à tout ce qui se situe dans la zone de mesure, exception faite de la bande d'aluminium. L'épaisseur effective de la bande est mesurée par le dessous, avec une précision de 0,05%. Compacte, la jauge peut être





06

— 05 Procédure MTG d'étalonnage de la plaque sur site

— 06 Principaux constituants de la jauge MTG Box: tête, système hydraulique, régulateur d'air, commande et interfaces opérateur

placée à proximité de l'écartement entre cylindres ou intercages puisqu'elle n'est pas perturbée par l'environnement de production. Elle est insensible aux variations de composition du matériau, évitant toute compensation de la teneur en alliage ou tout étalonnage approfondi.

L'étalonnage sur site ne prend que 20 minutes tous les 6 mois. Avec la jauge MTG Box d'ABB, la mesure et le contrôle d'épaisseur gagnent en précision, et le producteur de bandes d'aluminium en réactivité.

—  
Un système de positionnement hydraulique permet à la jauge de mesurer dès que se produit la tension de bande.

La MTG Box est constituée d'une tête PMGG201-H en boîtier aluminium et bronze monté sur un cadre mobile à la verticale. Ce capteur robuste ajuste automatiquement sa position pour optimiser les

mesures. Un système de positionnement hydraulique lui permet de mesurer dès que la bande se tend. La commande PMGA201, en version coffret mural ou armoire au sol, communique avec la jauge pour traiter les mesures, erreurs et données d'état. Des interfaces de communication sous protocoles VIP (Vendor Internet Protocol), OPC DA, Modbus TCP et bus de terrain Profibus-DP sont possibles pour intégrer la jauge à d'autres systèmes de commande de laminoirs. Les opérateurs sont en mesure d'observer et de piloter des fonctions telles que les diagnostics de fonctionnement, la maintenance et les paramétrages.

La facilité d'emploi du système de contrôle-commande ainsi que les nombreux atouts de la MTG Box gapless et sa technique des courants de Foucault pulsés en font l'outil idéal pour la mesure d'épaisseur haute précision dans les laminoirs d'aluminium. L'indépendance du matériau, l'élimination des facteurs environnementaux, la sécurité et la rapidité de mise en service et d'étalonnage sur site augmentent les temps de production et la productivité, tout en minimisant la maintenance. ●

MESURE

# Stressometer® fête ses 50 ans

Voilà un demi-siècle que le système Stressometer® d'ABB contribue aux gains de productivité et de qualité des lamineurs. Cette technologie a énormément progressé au fil des innovations permettant de relever les nombreux défis du métier.



**Lars Jonsson**  
Force Measurement,  
Measurement and Analytics

Västerås (Suède)  
lars.oj.jonsson@se.abb.com

Le 14 avril 1967, Asea, l'une des sociétés à l'origine du groupe ABB, commercialisait le premier système de mesure de planéité Stressometer pour équiper le laminoir d'un grand producteur d'aluminium en bandes, Alcan (aujourd'hui Novelis), au Canada. Fruits de nombreuses améliorations technologiques depuis cette époque, Stressometer et son parc installé de plus de 1200 systèmes

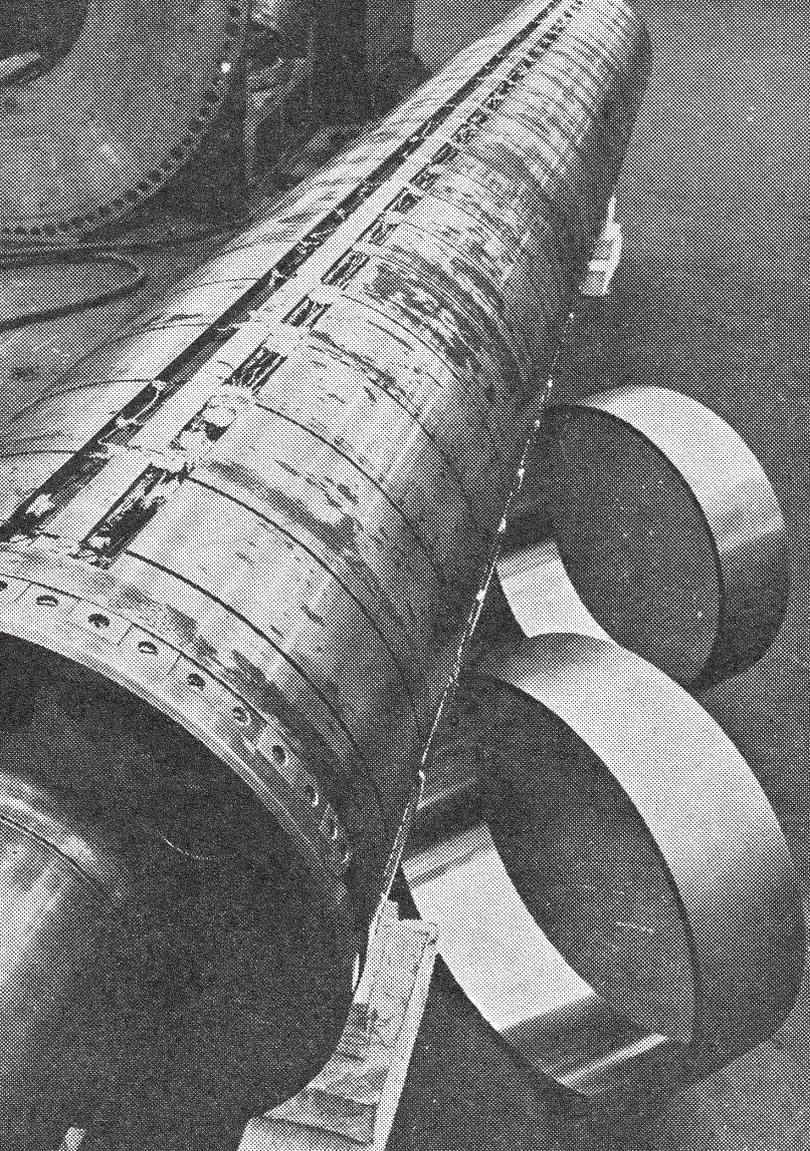
fêtent cette année un demi-siècle d'évolution réussie vers toujours plus de productivité, de profitabilité et de qualité →1.

Stressometer puise ses origines dans la technologie Pressductor®. Ce capteur de force, mis au point par Asea et breveté en 1954, fonctionne sur le principe de la magnéto-élasticité, selon lequel les propriétés magnétiques de certains matériaux varient en fonction des efforts mécaniques qui leur sont appliqués. Les capteurs Pressductor ne dépendent ni d'un déplacement ni d'une déformation, ils



Au milieu des années 1960, le Canadien Alcan et le Suédois Asea développent conjointement un capteur de mesure de planéité de bande.

allient une grande sensibilité et une tolérance exceptionnelle aux surcharges, avec un nombre quasi illimité de cycles de charge. Cette instrumentation ABB délivre des signaux en courant alternatif de haute puissance et faible impédance, très



02

— 01 Voilà 50 ans que le système Stressometer d'ABB participe aux gains de productivité et de qualité des opérations de laminage. En photo ci-contre, la salle de commande d'un train tandem à froid équipé de deux Stressometer.

— 02 Premier rouleau Stressometer, fourni au Canadien Alcan, à Kingston (ASEA VECKO-bladet, 14 avril 1967)

résistants aux perturbations électriques et aux défauts de terre.

Face à la demande croissante de produits en bandes dans les années 1960, les métallurgistes ont cherché un moyen de mesurer la planéité des tôles au laminage à froid en vue d'une régulation

Dès le départ, les concepteurs décident d'équiper de capteurs Pressductor un rouleau de mesure de planéité pour le laminage.

automatique de cette grandeur géométrique qui, jusque-là, devait se contenter des observations visuelles et des contrôles acoustiques manuels de l'opérateur.

Au milieu des années 1960, le Canadien Alcan et le Suédois Asea nouent un partenariat pour réaliser ce capteur. Dès le départ, les concepteurs décident de s'appuyer sur un rouleau déflecteur de mesure équipé de capteurs Pressductor. Le premier sys-

tème est installé en 1967 sur le laminoir à froid d'Alcan à Kingston (Canada) pour y subir une batterie d'essais →2.

L'idée était de contrôler la distribution des contraintes transversales dans la bande pour en améliorer la planéité; une répartition maîtrisée de ces efforts était ainsi supposée accroître la qualité du produit et la productivité du laminoir. Une hypothèse avérée: grâce à la mesure Stressometer et à un système de régulation, Alcan a considérablement amélioré la planéité de la bande laminée, dopé le rendement métallique, minimisé les ruptures de bande et accru la productivité en augmentant la vitesse de laminage et en raccourcissant les temps de passe. Bref, un succès sur toute la ligne!

### Une relation de 50 ans

Depuis cette première installation, les utilisateurs de bandes laminées et les opérateurs d'autres types de laminoirs n'ont eu de cesse de vouloir perfectionner cette régulation de la planéité. En partenariat avec ses clients, ABB a donc développé en permanence le système Stressometer →3. Ces améliorations permettent aux lamineurs d'exploiter à fond leurs installations pour produire des bandes de haute qualité avec un maximum de rendement et un minimum de maintenance.

Aujourd'hui, Stressometer se prête au laminage à chaud et à froid d'une gamme de produits et d'épaisseurs comprises entre 0,005 mm (feuilles alu) et 12 mm (tôles inox).

### « Réguler » la planéité en laminage ?

L'opération consiste à régler l'écartement des cylindres de laminage pour correspondre exactement au profil d'épaisseur de la tôle en entrée. À défaut, qui dit mauvais ajustements dit problèmes de planéité →5.

Le capteur Stressometer mesure la répartition des forces ( $F_i$ ) sur le rouleau →6 et calcule, à partir de quatre grandeurs caractéristiques de la bande (tension  $T$ , largeur  $w$ , longueur  $L$  et épaisseur  $t$ ), la répartition des contraintes dans celle-ci. En divisant cette valeur par le module d'élasticité de Young, on en déduit la planéité ou non-planéité de la bande. Cette mesure est donnée en unités I, qui correspondent à la distribution relative de l'allongement multipliée par 100 000, 1 unité I représentant donc un allongement de 1 mm sur une bande de 100 m.

$$\text{Contrainte: } \Delta\sigma_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times \frac{T}{w \times t} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\text{Non-planéité: } \frac{\Delta L_i}{L} = \frac{-\Delta\sigma_i}{E} \quad [x10^5 = \text{unités I}]$$

Introduite par ABB dans les années 1960, l'unité I s'est depuis imposée comme la référence industrielle pour la mesure de planéité.

---

**50 ANS DE DÉVELOPPEMENTS STRESSOMETER**

<b>1967</b>	Premier système de mesure de planéité fourni à Alcan (Kingston, Canada) →4	<b>1994</b>	Nouveau capteur et rouleau de mesure de feuilles
<b>1970</b>	Amélioration de la résolution : de 84 mm, la zone de mesure passe à 52 mm.	<b>1998</b>	Première IHM à navigateur web industriel
<b>1976</b>	Premier système à microprocesseur (Intel 8080)	<b>2001</b>	Nouvelle génération de système bâti sur l'architecture FSA (Future-Safe Architecture)
<b>1977</b>	Premier système au monde de régulation numérique de planéité (Kobe Steel, Japon)	<b>2002</b>	Rouleau à enveloppe continue, sans zone de mesure apparente, pour applications exigeant un excellent fini de surface
<b>1980</b>	Premier système de régulation de planéité pour un laminoir à six cylindres (Outokumpu)	<b>2006</b>	Régulation prédictive
<b>1982</b>	Amélioration de la résolution, de 52 mm à 26 mm	<b>2007</b>	Rouleau pour feuilles de résolution 26 mm
<b>1989</b>	Interface homme-machine (IHM) graphique en couleur	<b>2011</b>	Régulation de planéité avec identification automatique du procédé
<b>1989</b>	Première régulation de planéité basée sur des modèles d'actionneurs	<b>2013</b>	Commande et coordination optimisées par ESVD des laminoirs à six cylindres
<b>1990</b>	Nouveau système de mesure de la largeur et de positionnement des rives MSS (Millmate Strip Scanner)	<b>2014</b>	Transmission numérique des signaux sans maintenance par DTU
<b>1993</b>	Mesure et compensation de température de bandes pour aciéries	<b>2017</b>	Système 100 % numérique conforme à la directive européenne RoHS interdisant l'emploi de certaines substances dangereuses

---

03

**Principe de fonctionnement**

Le rouleau Stressometer est la clé du succès de la mesure et de la régulation de planéité. Il consiste en un cylindre massif à quatre rainures axiales dans lesquelles sont disposés de nombreux capteurs Pressductor. Chaque zone de mesure en travers de la bande comporte donc quatre capteurs. C'est là une caractéristique constructive fondamentale qui confère d'origine au système l'avantage d'une compensation physique et automatique de la flexion du cylindre comme des variations de température, sans passer par une compensation logicielle, et garantit un temps de réponse très court de la mesure.

Ce rouleau se divise en zones de mesure de 26 ou 52 mm. Un anneau en acier trempé est emmanché sur chacune d'elles pour protéger les capteurs et offrir une surface de contact appropriée à la bande métallique en cours de laminage. Une unité DTU (Digital Transmission Unit) assure la transmission numérique sans contact de l'alimentation et des signaux avec les capteurs du rouleau →7. Chaque zone mesure indépendamment les contraintes radiales exercées par la bande sur le rouleau.

On obtient ainsi 4 mesures par tour de rouleau, à des vitesses de rotation de 1 à 4000 tours/minute. Stressometer mesure l'ensemble des forces sur la bande, rives comprises. La planéité effective de la bande est donnée en unités I.

**Innovations Stressometer**

Dès le début, les concepteurs de Stressometer ont respecté six grands principes de développement pour garantir une mesure de planéité fiable, précise et rapide :

- Rigidité de la mesure de force : la déformation de la bande et du capteur de force doit être négligeable. La mesure est directe et fiable,

sans aucun filtrage des contraintes dues à la déformation de la bande ;

- Emploi de capteurs ayant le même coefficient de dilatation thermique que le matériau avoisinant de façon à minimiser l'incertitude de mesure due aux effets thermiques ;
- Fiabilité et précision de l'instrumentation durant les nombreuses années d'exploitation dans un laminoir, sans besoin de réétalonnage ;
- Mesure instantanée de la répartition totale des forces en travers de la bande, c'est-à-dire sans glissement des efforts vers le corps du cylindre ;

—  
**Les lamineurs peuvent produire des bandes de haute qualité avec un maximum de rendement et un minimum de maintenance.**

- Principe des quatre capteurs : on mesure ainsi la répartition des forces sur toute la largeur, quatre fois par tour de rouleau, le signal de mesure n'étant pas faussé par les variations de température ni par la flexion du cylindre ;
- Linéarité de la mesure : le signal délivré par une zone de mesure doit être directement proportionnel à la couverture de la bande de façon à mesurer avec précision les rives.

**Exigences d'un système de mesure de planéité moderne**

Pour faire la différence en termes de rendement, de temps de passage et de limitation des ruptures de bande, un système de régulation de planéité doit répondre à plusieurs exigences fortes :

- Fiabilité (critère le plus important) : le système ne doit pas provoquer d'arrêts intempestifs du

—  
03 Évolution du système Stressometer d'ABB au cours des 50 dernières années

—  
04 Interface homme-machine de mesure de planéité datant de 1967; de nos jours, l'IHM est informatisée (ordinateur) ou mobile (téléphone).

laminoir, seuls les arrêts planifiés étant acceptables. Stressometer a pour cela deux atouts: un temps moyen entre réparations (MTBR) supérieur à 20 ans et une transmission des signaux du rouleau sans contact et sans maintenance;

- Précision de mesure de 0,5 unité I: il ne peut y avoir de bonne régulation de planéité sans mesure précise de la répartition complète des efforts;
- Absence de mesure faussée par les perturbations du laminoir (tension de bande variable, par exemple);
- Efficacité opérationnelle de la mesure à toutes les vitesses de laminage, y compris en rives, en tête et en queue de bande, quelle qu'en soit l'épaisseur;
- Exactitude des mesures transmises au système de régulation de planéité, à la milliseconde près et plusieurs fois par mètre de bande laminée;
- Visualisation intuitive de la planéité effective par l'opérateur;
- Prise en compte d'un large éventail de produits, sans aucun réglage du système ni détérioration de la surface de la bande;
- Mise en œuvre simultanée et efficace, sans aucune commande manuelle, de tous les actionneurs du laminoir, dans tous les cas de figure et

pour tous les produits. Plusieurs associations d'actionneurs pouvant avoir le même effet sur la planéité, le système doit être capable de sélectionner la combinaison la plus efficace. Stressometer dispose à cette fin de fonctionnalités de

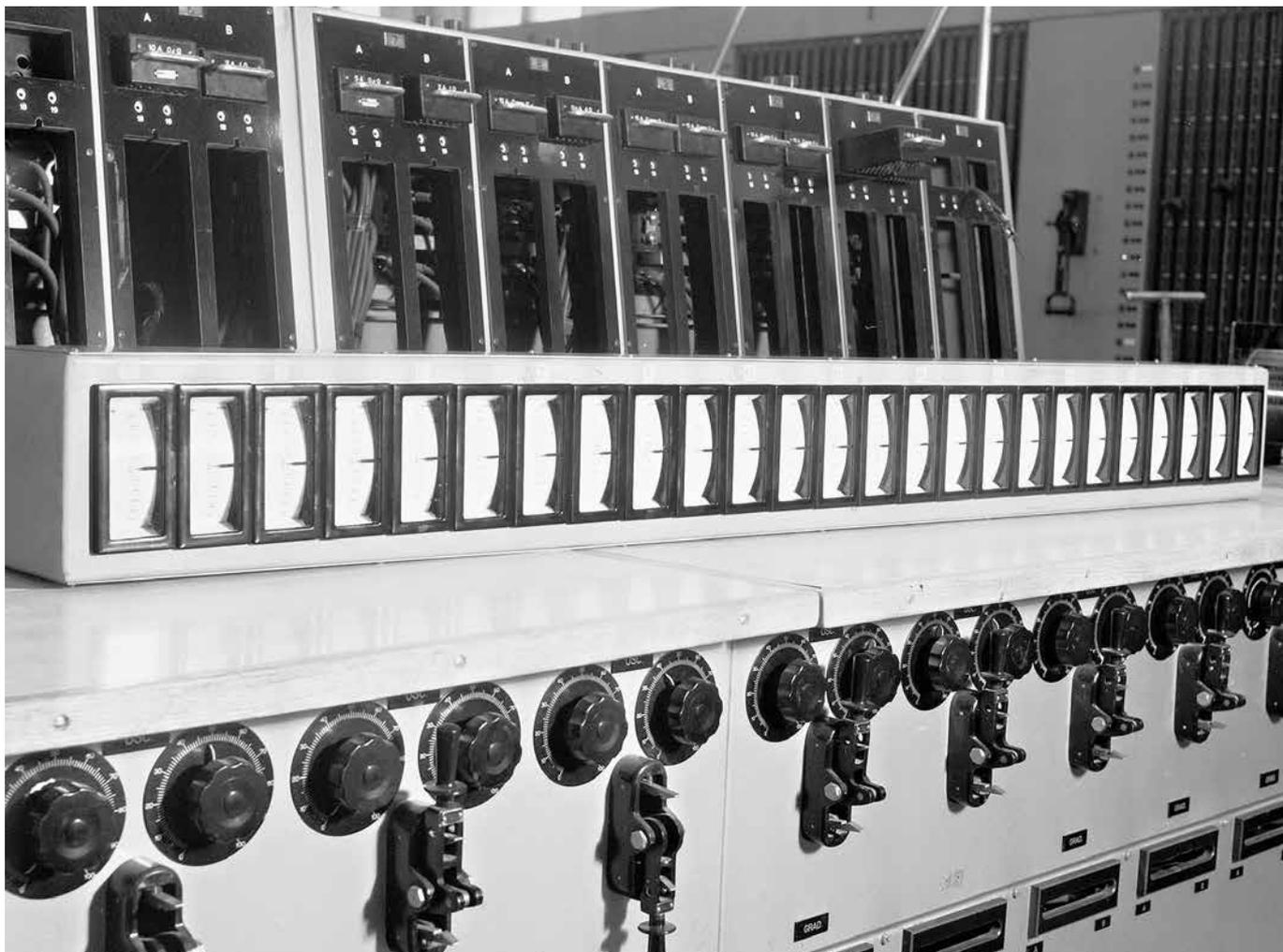
—  
**Stressometer se prête au laminage à chaud comme à froid d'une grande variété de produits et d'épaisseurs comprises entre 0,005 mm (feuilles alu) et 12 mm (tôles inox).**

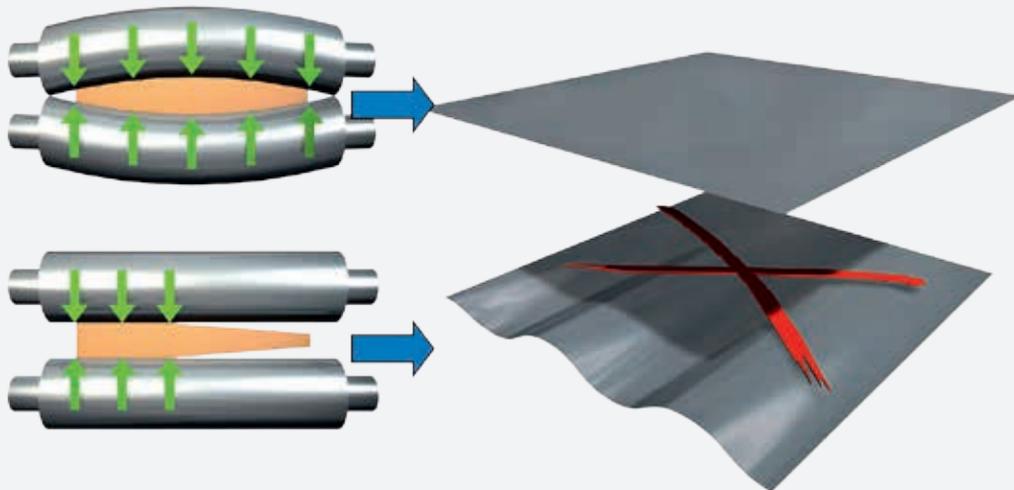
commande avancée, dont la décomposition en valeurs singulières étendue ESVD (Extended Singular Value Decomposition) ainsi que la régulation adaptative-prédictive →8.

#### Enjeux et perspectives

L'industrie du laminage a relevé bien des défis au cours des 50 dernières années, qui devraient encore se multiplier à l'avenir. L'un des premiers enjeux est de « produire durable » de façon à minimiser l'empreinte écologique et climatique du

04





05

secteur. Le système Stressometer d'ABB entend améliorer qualité et rendement, ce qui revient à consommer moins d'énergie par tonne de produit fini.

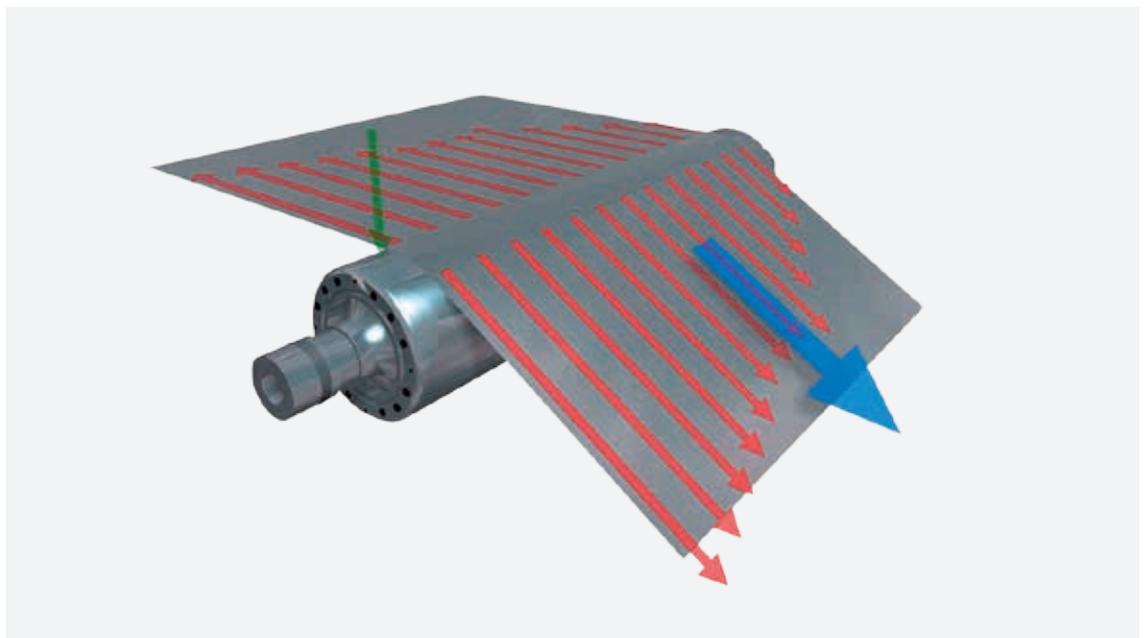
Autre ambition: fournir des installations aptes à réagir dans de courts délais à la demande accrue de produits et alliages diversifiés, proposés dans une large gamme de dimensions, mais aussi en petites séries et sur mesure. Il faut pour cela être capable de basculer en quelques secondes d'un type de produit à l'autre, sans perte de qualité ou de productivité.

La baisse des coûts est un domaine dans lequel Stressometer offre un grand potentiel: la productivité du laminoir est directement tributaire du ren-

dement de production, des temps de passe et de la durée d'immobilisation de l'outillage en cas de rupture de bande. En laminage à froid de l'alumi-

—  
Stressometer affiche un MTBR supérieur à 20 ans et une transmission numérique des signaux sans contact et sans maintenance.

nium, une rupture de bande se chiffre habituellement pour l'entreprise à 10 000 dollars de perte nette, à 150 000 dollars par 0,1% de rendement et



06



07a



07b

—  
05 Un écartement des cylindres correspondant à l'épaisseur de tôle donne une bonne planéité; à l'inverse, un mauvais positionnement entraîne un allongement irrégulier en travers de la bande et, donc, des défauts de planéité.

—  
06 Mesure de distribution des forces sur le rouleau

—  
07 Unités de traitement des signaux Stressometer

07a En 1967, il fallait trois cartes analogiques pour traiter les signaux d'une seule zone de mesure.

07b De nos jours, il suffit d'une carte numérique DTU pour traiter en parallèle 80 zones de mesure.

—  
08 Régulation de planéité avec décomposition ESVD

08a Actionneurs

08b Effet de planéité

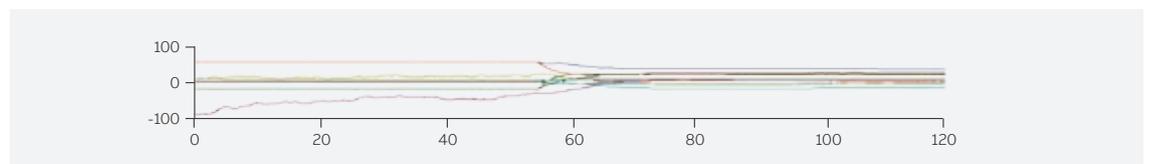
08c Planéité moyenne et stratégie de contrôle-commande.

à 100 000 dollars par seconde de temps de passe. Au vu de ces montants astronomiques, la moindre amélioration vaut son pesant d'or!

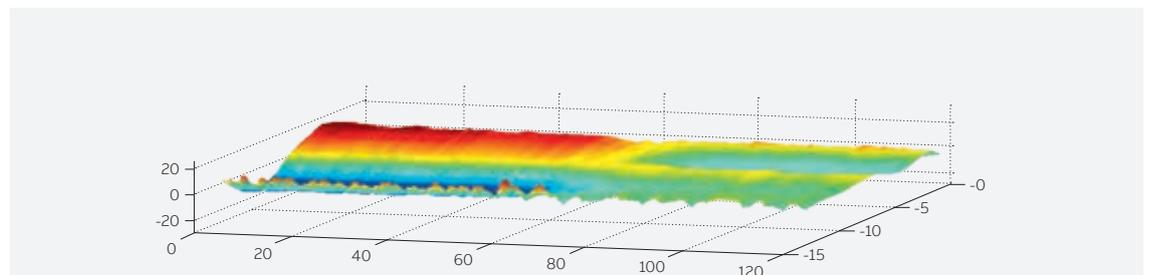
Les 50 années de développement Stressometer ont beaucoup fait progresser la technologie:

- Utilisation aussi bien en laminage à chaud et à froid;
- Fiabilité extrême (MTBR > 20 ans);
- Amélioration de la résolution, de la précision, du temps de réponse et de la visualisation;
- Extension de la régulation de planéité à une offre générique adaptée à tous les types existants de laminoirs avec optimisation des actionneurs disponibles.

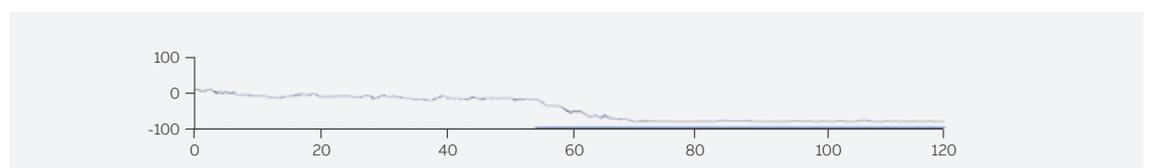
La poursuite des partenariats ABB avec ses clients ouvrira de nouvelles pistes de progrès de la qualité et de la productivité. L'une d'elles consiste à étendre la régulation de planéité aux opérations amont et aval: il s'agit de maîtriser le profil de la bande en cours de laminage à chaud de façon à obtenir une planéité homogène et maîtrisable en aval. Les systèmes de demain seront également connectés en toute sécurité à l'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP): de quoi permettre à ABB d'assister ses clients à distance pour optimiser et pérenniser les performances opérationnelles de leur train de laminage. ●



08a



08b



08c



# Service et fiabilité



54

Le concept de « fonctionnement non-stop » a un sens particulier dans les domaines de l'industrie et des infrastructures. Pour les entreprises qui veulent augmenter les performances et la rentabilité de leurs actifs, c'est un objectif ; pour les services critiques tels que l'électricité, c'est une exigence.

Le monde, de plus en plus connecté, est toujours plus suspendu au bon fonctionnement de ces liaisons et interconnexions. Appareils et réseaux doivent pouvoir redémarrer rapidement après une perturbation et, mieux encore, prévenir celle-ci.

ABB innove pour exploiter le plein potentiel du parc installé mais aussi fiabiliser et fédérer les appareils d'ancienne et de nouvelle génération.



60

- 54 Donner un second souffle en modernisant
- 60 La production d'énergie à l'épreuve de l'intermittence
- 65 Des convertisseurs à IGBT pour un lifting des locomotives Re460

SERVICE ET FIABILITÉ

# Donner un second souffle en modernisant

Pour ses variateurs, ABB propose un nouveau modèle d'optimisation du cycle de vie permettant d'améliorer immédiatement les performances et la longévité des installations existantes.



**Marjukka Virkki**  
Country Service Manager,  
Finland

Helsinki (Finlande)  
marjukka.virkki@fi.abb.com

Dans une entreprise disposant d'un parc de variateurs vieillissants, les services de maintenance nécessaires à ces machines tout au long de leur cycle de vie occupent une place croissante au sein des opérations. Cette maintenance n'est pas seulement destinée à éviter les pannes ; elle permet aussi d'améliorer la productivité des actifs et la fiabilité des variateurs concernés, ainsi que l'efficacité opérationnelle globale de l'entreprise. La modernisation est l'une des offres de service qui peuvent prolonger la durée de vie des variateurs en améliorant leurs performances.

## L'importance d'une offre de service

À l'heure où les entreprises se concentrent de plus en plus sur leur cœur de métier, les prestations de service de la part des fournisseurs de variateurs font l'objet d'une demande croissante et deviennent une composante majeure de leur activité. Les variateurs jouent un rôle essentiel dans de nombreux procédés industriels, garantissant efficacité énergétique, productivité accrue et haut rendement des moteurs électriques dans un large éventail d'applications. Aussi la panne inopinée de l'un d'eux peut-elle conduire à un arrêt des opérations et s'avérer très problématique.

La meilleure parade est donc de prévenir la panne, ce qui implique généralement des interventions régulières de maintenance préventive au cours du cycle de vie du produit. Cependant, lorsqu'un varia-

teur industriel arrive en fin de cycle, la remise à niveau ou le remplacement est la meilleure solution pour minimiser le risque de panne, obligeant à arrêter intempestivement la production →1. Conjointes, ces deux offres de service permettent souvent d'améliorer les performances des appareils →2.

—  
La modernisation est l'une des offres de service qui peuvent prolonger la durée de vie des variateurs vieillissants en améliorant leurs performances.

Dans le cadre de sa réflexion sur la gestion du cycle de vie, ABB a mis au point un modèle pour garantir les performances et la disponibilité d'un variateur sur toute sa durée de vie →3. Ce modèle divise le cycle en quatre phases : active, classique, limitée et obsolète. Dans les deux premières, ABB propose une gamme complète de prestations de service et d'assistance. En phases limitée et obsolète, par contre, les seuls services généralement disponibles, et donc recommandés, sont le remplacement et la modernisation qui, au-delà de la remise à niveau des variateurs, présentent l'avantage de les faire repasser en phase active.



01



—  
01 Une solution de modernisation est souvent sur mesure pour répondre à des besoins spécifiques.

Devant la diversité des stratégies de maintenance observées par les industriels en matière d'investissements, ABB offre une gamme étendue d'interventions pour répondre au mieux aux besoins de leur parc de variateurs. Dans son modèle de gestion du cycle de vie et son offre de service, la modernisation vient en appui du remplacement et d'autres solutions pour élargir la palette des options de maintenance des variateurs de la clientèle ABB.

#### Rétrospective

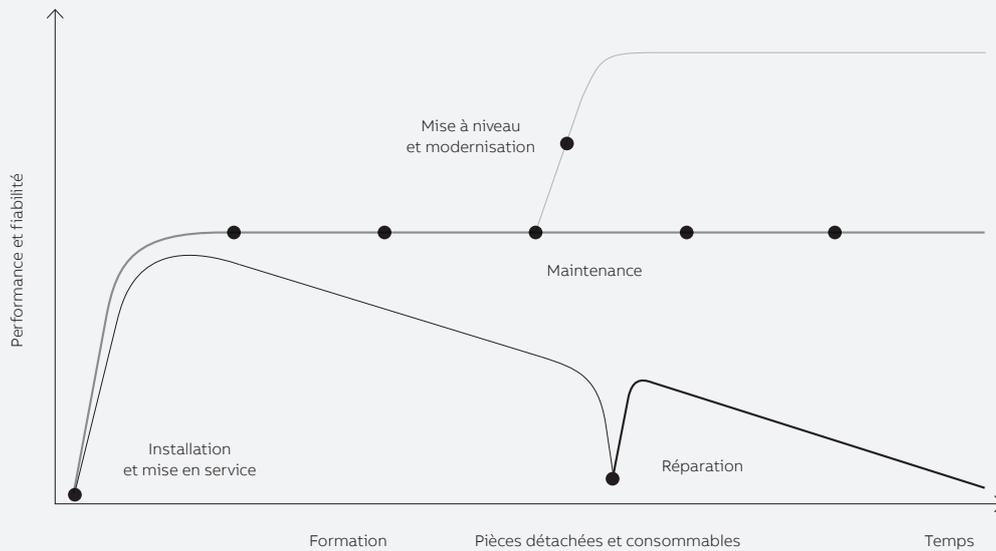
Au départ, concevoir une offre de modernisation est généralement compliqué car l'opération fait appel à des compétences techniques de haut vol pour intégrer et déployer les plus récents progrès dans des variateurs de diverses générations, tout en veillant aux exigences du client que sont une installation rapide, des besoins « métier » et le respect de conditions spécifiques au site. À la fin des années 2000, ABB a lancé un projet de standardisation de son offre de modernisation visant à proposer à ses clients le meilleur rapport qualité/coût. En 2007, Marjukka Virkki, aujourd'hui responsable Service pour la Finlande, pilotait la recherche-développement sur la maintenance des variateurs ainsi que ce projet ABB :

« Quand j'ai commencé cette mission en 2007, j'ai réalisé que pour pouvoir proposer des prestations de modernisation de haute qualité à grande échelle,

et ce à tous nos clients potentiels, nous ne pouvions pas vendre nos solutions au cas par cas. Certes, une telle approche garantit une parfaite adéquation aux besoins, mais elle induit un risque sur la qualité de la documentation et sur le temps de mise en œuvre après la vente. Par ailleurs, notre logistique n'aurait pas pu être optimisée au point d'atteindre les objectifs de coût de produits fixés. D'après les retours de nos clients, il nous fallait réduire nos délais de livraison, ce qui, couplé à une augmentation des quantités, aurait été impossible sans standardisation. De plus, nous devons augmenter notre capacité de maintenance sur site au

—  
**ABB procure aux industriels une gamme étendue de services pour répondre au mieux aux stratégies de maintenance de leurs variateurs.**

vu du nombre croissant d'installations de par le monde, ce qui exigeait à l'évidence une documentation, des supports et programmes de formation de grande qualité. Un processus de formation en continu a donc été mis en place pour limiter les risques.



02

Nous avons commencé par évaluer l'état du marché et de la demande. Avec une petite équipe projet, nous avons poursuivi en définissant une architecture de produits fondée sur des sous-ensembles standardisés, accompagnée d'une documentation, d'instructions et de processus. En étroite collaboration avec le service achats, nous avons sélectionné les fournisseurs et établi des indicateurs clés de performance (KPI) et des objectifs clairs pour nos lignes de production en série. »

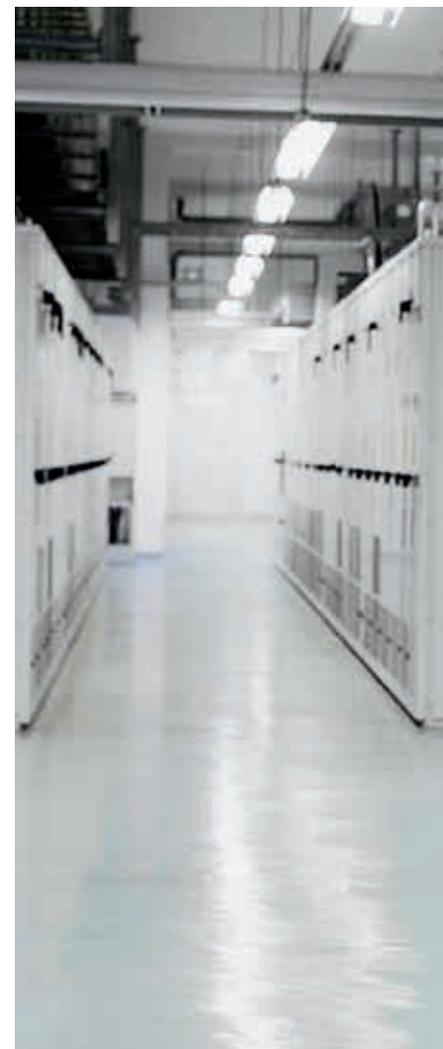
Le client et la réponse à ses besoins ont toujours été au centre du développement de cette offre ABB. Marjukka explique ainsi comment la meilleure qualité de service est garantie: « Dans cette optique, nous voulions exploiter en priorité les composants des modèles de variateur les plus récents. L'installation et le montage n'en seraient

—  
Le client et la réponse à ses besoins ont toujours été au cœur du développement de l'offre ABB.

que plus efficaces et la fiabilité de la modernisation améliorée, les composants existants ayant déjà été testés et validés en usine. De même, nous avons repris les règles de conception et de documentation ainsi que les méthodes de travail utilisées pour le développement produits. Désormais, tout est conçu dans nos solutions de modernisation selon les mêmes critères que nos nouveaux produits, depuis les dimensions de l'entrefer jusqu'à la maîtrise des courants de Foucault, autre illustration du haut niveau de qualité de nos offres. »

Aujourd'hui, la plupart de nos solutions de modernisation est proposée sous forme d'offres standards. En s'appuyant sur un processus d'apprentissage permanent, ABB garantit une qualité et une rentabilité optimales, adossées à une livraison et une installation rapides. Par ailleurs, cette standardisation contribue à réduire la durée et les risques des projets de modernisation.

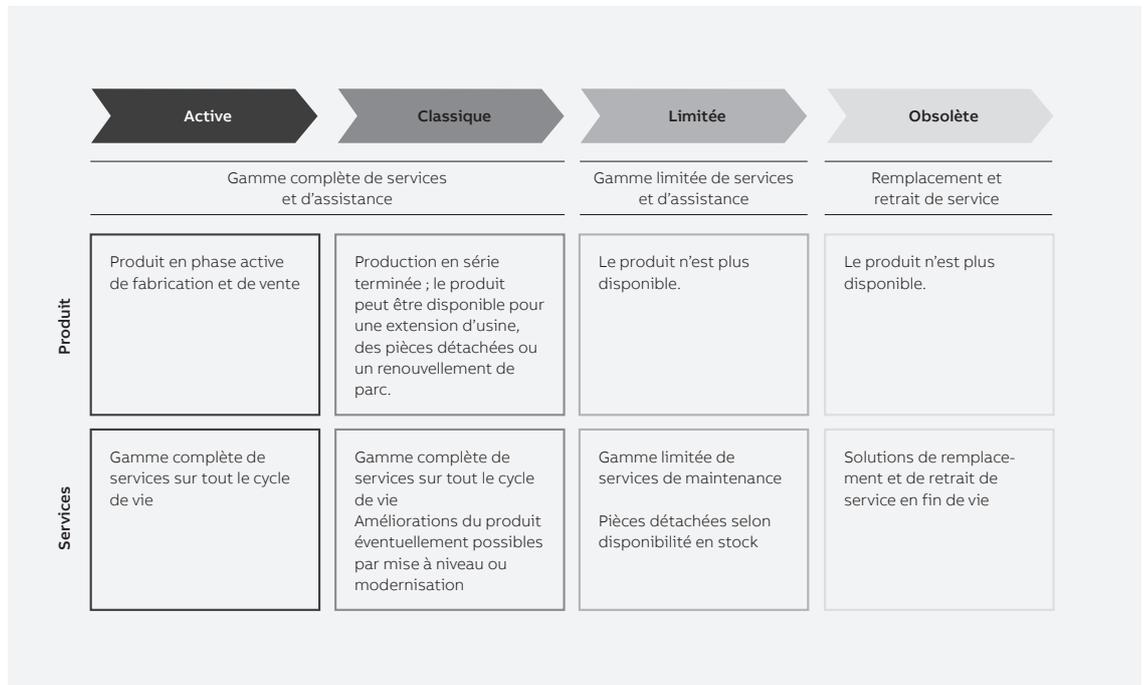
04



—  
02 Performance et fiabilité d'un produit au cours du temps

—  
03 Les quatre phases du modèle de gestion du cycle de vie ABB

—  
04 Quelque 151 variateurs ACS600 d'ancienne génération sur la ligne de galvanisation 3 de l'usine SSAB de Hämeenlinna seront modernisés d'ici à cinq ans pour en améliorer la maintenabilité et la fiabilité.



03

Malgré les nombreux avantages de la démarche, ABB continue aussi à répondre au cas par cas aux différents besoins de ses clients. Quelle que soit la solution adoptée, la qualité et la durabilité des variateurs ABB sont assurées par notre méthodologie de documentation rigoureuse, notre assurance qualité efficace et le haut niveau de qualification de nos ingénieurs.

### Des projets pilotes réussis

Pendant ce développement, ABB a mené avec succès plusieurs projets pilotes dans différents pays et secteurs d'activité, comme l'industrie papetière, la métallurgie, l'exploitation minière et l'agroalimentaire. L'objectif était de garantir la fiabilité de ses nouvelles offres, de tester et de valider les processus internes, depuis la





05

commande jusqu'à la livraison, l'installation et la mise en service du parc modernisé.

À titre d'exemple, citons le projet pilote réussi de la société SSAB qui, dans la foulée, a décidé de moderniser tous les variateurs de la ligne de galvanisation 3 de son usine finlandaise de Hämeenlinna, soit 151 appareils, avec une installation échelonnée sur cinq ans →4.

—  
Avec ses solutions de modernisation, ABB garantit qualité et rentabilité optimales, assorties d'une livraison et d'une installation rapides.

SSAB est l'un des premiers producteurs mondiaux d'aciers spéciaux, notamment d'aciers avancés à haute résistance (AHSS) et d'aciers trempés et revenus (Q&T). Sa ligne de galvanisation 3 produit des tôles zinguées pour la construction et l'automobile. Le bon déroulement et la fluidité des opérations sont ici primordiaux car les produits de spécialité qui y sont fabriqués ne peuvent pas l'être ailleurs.

#### Une modernisation sur mesure

Il y a quelques années, ABB a informé SSAB que ses variateurs ACS600 approchaient de leur fin de cycle de vie, avec pour conséquence une disponibilité limitée de l'assistance technique et des pièces détachées. Après avoir envisagé plusieurs possibilités, SSAB a choisi la solution ABB pour moderniser ses produits et les ramener en phase active.

« La modernisation par étapes a été une bonne solution pour nous », déclare Tero Saarenmaa, responsable du département Maintenance électrique de l'usine SSAB de Hämeenlinna. « Elle nous a permis d'effectuer une vraie maintenance préventive avec les pièces détachées d'origine, tout en bénéficiant d'une assistance et d'un service complets pour ces variateurs, essentiels pour nous. De plus, en attendant que la modernisation soit terminée, nous avons pu nous servir de produits de modèles précédents comme pièces de rechange pour nos variateurs ACS600 plus anciens. Les critères déterminants en faveur de cette solution ABB ont été la rentabilité globale et le temps d'arrêt réduit. »

En outre, selon Matti Aaltonen, responsable des ventes de service pour les variateurs et systèmes de contrôle-commande ABB, il était important de pouvoir proposer à SSAB une solution sur mesure. « Une solution standard ne répondait pas entièrement à ses besoins ; il a donc fallu personnaliser



—  
05 Variateur d'ancienne génération (à gauche) et variateur rénové (à droite)

—  
06 Modernisation ACS880 de la conception mécanique de l'ACV700/SamiStar avec deux modules

notre offre. Ainsi, tous les composants sont en train d'être retirés des anciennes armoires, et des kits de modernisation ACS880 adaptés aux armoires des ACS600MD, plus larges, sont en cours d'installation →5. Les variateurs seront toujours pilotés par le système de commande AC80 existant, avec quelques évolutions de son logiciel. Le projet comprend aussi la mise en service; les modifications logicielles nécessaires aux nouveaux variateurs ACS880, mineures, seront effectuées à l'occasion de chaque arrêt pour maintenance.»

#### Une nouvelle approche du service

Même si les raisons pour un client de choisir une solution de modernisation peuvent varier, les avantages sont manifestes. Le plus couramment évoqué est la possibilité de faire de nouveaux investissements échelonnés plutôt que de miser sur un investissement unique.

Les solutions de modernisation permettent non seulement de réduire les dépenses d'investissement en les lissant sur une plus longue période, mais aussi de raccourcir les arrêts de production pour procéder aux installations. En outre, grâce à l'intégration de technologies récentes, la démarche augmente généralement l'efficacité des variateurs. Ainsi, par exemple, les nouvelles générations d'appareils ont des capacités de connexion à distance et d'autodiagnostic permettant une assistance et un suivi d'état déportés, ce qui améliore la disponibilité et l'optimisation des variateurs ainsi que la réactivité en cas de panne. De plus, la réutilisation de l'existant (armoire, câbles et moteurs) autorise des économies et un gain de temps considérables en évitant tout nouveau développement ou modification, par exemple du système de refroidissement ou du câblage.

À l'heure où la Terre est exploitée jusqu'à l'épuisement par la population du monde entier, l'empreinte écologique et la consommation en ressources sont de plus en plus importantes pour une entreprise. Dans ce contexte, la modernisation minimise le gaspillage de matériaux par la réutilisation des câbles, des moteurs et des armoires,

—  
**La modernisation donne accès à une gamme complète de services de maintenance sur le cycle de vie et à l'assistance produit sur plusieurs années.**

tout en s'appuyant sur les technologies les plus récentes pour améliorer outils et diagnostics →6. Une étude de cas menée par ABB en 2015 dans l'industrie papetière a montré que les émissions totales de CO<sub>2</sub> engendrées par une modernisation étaient inférieures de 65% à celles produites par un rééquipement complet (6405 kg de CO<sub>2</sub> dans ce dernier cas, et seulement 2215 kg pour la solution de modernisation). Ce gain a été enregistré à la fois en production et lors du transport du matériel.

Une fois modernisé, un variateur bénéficie du meilleur de la technologie et de l'assistance produit. La modernisation est un moyen rapide et efficace de rénover un parc installé, qui améliore immédiatement les performances de l'usine et des procédés. Enfin, cette opération donne accès à une gamme complète de services de maintenance sur le cycle de vie et à l'assistance produit sur plusieurs années. ●



SERVICE ET FIABILITÉ

# La production d'énergie à l'épreuve de l'intermittence

Les centrales électriques d'appoint subissent de fréquents démarrages, arrêts et cycles de mise en charge rapide. Leur fiabilité passe donc par une conception améliorée de l'alternateur afin de renforcer sa résistance aux contraintes. Quels sont les paramètres de conception à ne pas négliger ?

**Timo Holopainen**  
**Jari Jäppinen**  
**Juhani Mantere**  
**John Shibutani**  
**Jan Westerlund**  
ABB Motors and Generators

Helsinki (Finlande)  
timo.holopainen@fi.abb.com  
jari.jaappinen@fi.abb.com  
juhani.mantere@fi.abb.com  
john.shibutani@fi.abb.com  
jan.westerlund@fi.abb.com

**Mats Östman**  
Wärtsilä Finland Oy  
Helsinki (Finlande)

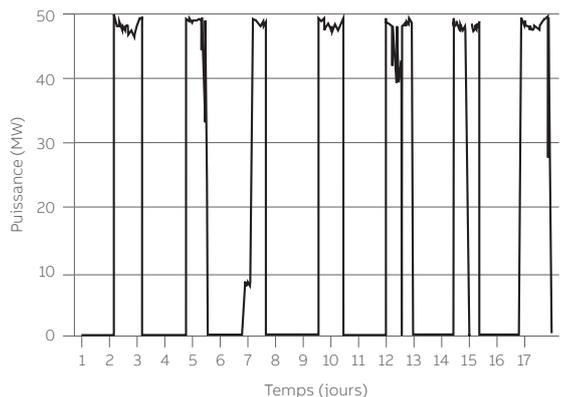
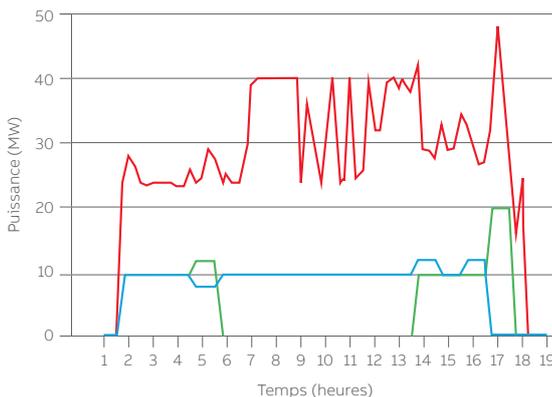
**Joonas Helander**  
Ancien collaborateur ABB

Le raccordement des sources d'énergie renouvelables (EnR) au réseau électrique va croissant. Bon nombre d'entre elles débitent une puissance très variable, dont les fluctuations doivent être compensées par des centrales d'appoint flexibles. À la différence des centrales classiques, celles-ci subissent de fréquents démarrages et arrêts, ainsi qu'un cyclage de charge rapide. Dans ce dernier cas, des études en conditions réelles ont montré que le facteur central à prendre en compte pour le soutien au réseau est la hausse du nombre de cycles de charge thermique et de vitesse. Améliorer la conception de l'alternateur afin de renforcer sa résistance à des contraintes supplémentaires est la clé de la fiabilité →1.

Face à la pression réglementaire et aux enjeux climatiques, les EnR ont le vent en poupe. Leur

—  
En principe, la majorité des contraintes thermiques siège dans les enroulements et le noyau de l'alternateur.

variabilité et leur absence d'inertie posent de nouveaux défis au réseau électrique, aux systèmes de contrôle-commande et au parc de production. Pour les autres centrales d'énergie, les EnR sont





01

— 01 Les alternateurs des centrales d'appoint doivent pouvoir endurer les contraintes mécaniques et thermiques dues aux fréquentes montées et baisses de charge causées par les sources d'énergie renouvelables. Ci-dessus, les groupes de production de la centrale estonienne de Kiisa.

— 02 Mesure de la puissance d'équilibrage d'une centrale thermique à flamme sur une plage de 18 heures

— 03 Production d'une centrale pendant une semaine d'août 2013

— 04 Profils de charge de l'alternateur pour l'analyse des cycles thermiques

04a Rampe répétée d'accélération jusqu'à la pleine charge (5 min), fonctionnement à pleine charge (5 min), rampe de décélération jusqu'à la charge nulle (1 min), arrêt (5 min)

04b Rampe rapide d'accélération jusqu'à la pleine charge (5 min), fonctionnement à pleine charge (2 h), rampe de décélération jusqu'à la charge nulle (1 min)

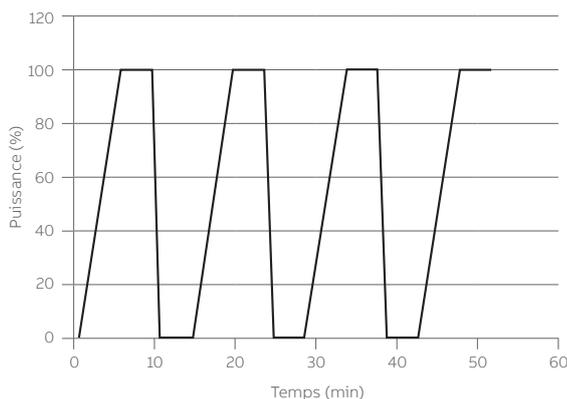
synonymes de démarrages et d'arrêts plus fréquents, ainsi que de capacités de mise en charge et de rampe accrues. Tout cela augmente les coûts et les contraintes sur les actifs existants.

### Cycles de charge

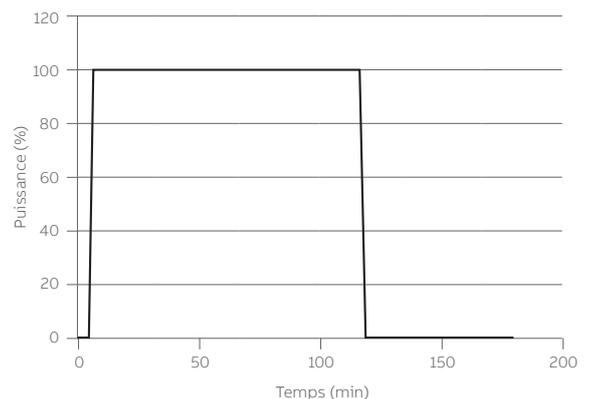
Un alternateur classique fonctionne en régime nominal et à vitesse constante sur de longues périodes, sans interruption. Ses éléments structurels ont donc été conçus et dimensionnés en conséquence. Or l'équilibrage du réseau exige d'alterner rapidement périodes de fonctionnement et d'inactivité, donc de multiplier les démarrages et arrêts →2.

En principe, les différences entre une génératrice classique et une génératrice d'équilibrage du réseau sont le nombre de cycles de charge et la rapidité de la fluctuation de charge.

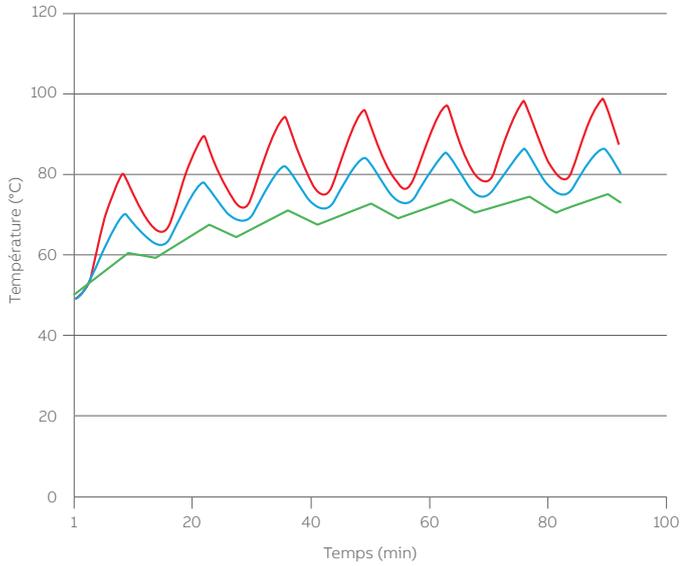
Les groupes de production modernes peuvent passer de la vitesse nulle à la vitesse maximale en 30 secondes ; cinq minutes leur suffisent pour atteindre la pleine charge et, à partir de là, une seule minute pour s'arrêter. La centrale en →3 a démarré et s'est arrêtée neuf fois en six jours. Cela correspond à 500 cycles annuels en moyenne, sachant que ce nombre peut être encore plus élevé dans la pratique.



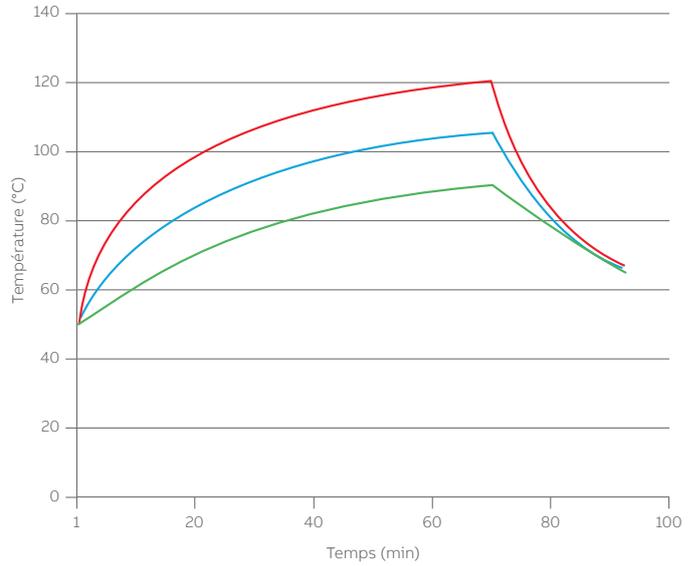
04a



04b



05a — Enroulement statorique dans l'encoche — Dents du noyau statorique  
— Moyenne de la culasse du noyau statorique



05b — Enroulement statorique dans l'encoche — Dents du noyau statorique  
— Moyenne de la culasse du noyau statorique

### Profils de charge

L'échauffement et le refroidissement des éléments d'un alternateur ne sont généralement pas homogènes, pas plus que leurs constantes de temps thermiques. Cette anisotropie transitoire est la principale source de contraintes thermiques, compliquant l'analyse des cycles thermiques.

À partir de la centrale de l'exemple précédent, deux profils de charge différents ont été sélectionnés pour analyser et simuler le comportement thermique →4. Ces exemples illustrent le plus grand nombre possible de cycles de charge/arrêt et donc de cycles de charge thermique pour évaluation →4a, ainsi qu'un gradient thermique entre l'enroulement et le noyau, proche de sa valeur maximale →4b.

### Analyse des cycles thermiques

En théorie, la majorité des contraintes thermiques se produit dans les enroulements et le noyau de l'alternateur. Il faut simuler la distribution de température pour prédire ces contraintes. La conductivité thermique du cuivre et de l'acier est respectivement excellente et bonne. C'est donc au niveau des couches d'isolant électrique, à la jonction cuivre-cuivre et cuivre-acier, que l'on trouve les plus forts gradients thermiques. L'écart de température définit ici les contraintes thermiques subies par l'alternateur.

Un modèle de flux thermique a été appliqué pour prédire le comportement thermique transitoire des parties actives de l'alternateur, comme le stator. Dans le cas de plusieurs cycles courts charge/arrêt consécutifs, l'écart de température entre l'enroulement et le noyau peut varier de 10 à 25 K en cycles de charge →5a. Si l'alternateur est soumis plus longtemps à une pleine charge et se rapproche de sa température de fonctionnement maximale, cet écart peut atteindre 30 K →5b.

À cause du traitement d'imprégnation, les bobines de stator adhèrent aux parois des encoches et ne peuvent donc pas se déplacer librement, ce qui engendre des tensions internes dans l'isolant, qui peuvent évoluer en fissures en l'absence de mesures appropriées.

**Différences entre une génératrice classique et une génératrice d'équilibrage du réseau : le nombre de cycles de charge et la rapidité de la fluctuation de charge.**

### Analyse des cycles de vitesse

Normalement, ce sont les forces réciproques du moteur à combustion qui font vibrer l'alternateur. Un moteur quatre temps à combustion interne génère des forces d'excitation aux harmoniques entiers et demi-harmoniques de la vitesse de rotation. La génératrice est si complexe que seule la simulation numérique offre la précision requise pour prédire le comportement vibratoire. Pour étudier de manière fiable la tenue à la fatigue de la structure, il faut effectuer une analyse de la réponse pour l'ensemble du groupe. Les alternateurs fonctionnant en continu sont conçus de manière à éviter les résonances principales. Compte tenu du nombre important de démarrages et d'arrêts dans une application d'équilibrage du réseau, il est également nécessaire d'analyser ces cas de figure pour que la conception offre une bonne résistance à la fatigue.

—  
05 Prédictions de la température du stator d'un alternateur (20,8 MVA, 13,8 kV, 60 Hz et 514 tr/min)

05a À la fréquence maximale du cycle thermique, l'écart de température entre enroulement et noyau varie entre 10 et 25 K, atteignant son maximum après le premier cycle.

05b À l'amplitude maximale du cycle thermique, l'écart de température entre enroulement et noyau atteint 30 K.

—  
06 Exemple de résultats des tests vérifiant la durée de vie de l'isolant des enroulements (équation d'Arrhenius rapportée aux données collectées par la méthode des moindres carrés).

### Impact sur la conception de l'alternateur

L'analyse des cycles thermiques et de vitesse, ainsi que le retour d'expérience d'autres applications de moteur et de génératrice à cycle rapide, ont mis en avant plusieurs éléments de l'alternateur à prendre en compte pour en fiabiliser l'exécution en vue d'équilibrer le réseau.

### Isolation et enroulements

Nous l'avons vu, le cyclage thermique a un impact négatif sur les enroulements et l'isolant. D'expérience, l'imprégnation sous vide et pression confère des caractéristiques exceptionnelles à la totalité du rotor et du stator (enroulements et noyau en acier feuilleté), ce qu'a confirmé l'analyse.

—  
**L'échauffement et le refroidissement des éléments d'un alternateur ne sont pas homogènes, et leurs constantes de temps thermiques différentes. Principale source de contraintes thermiques, cela complique l'analyse des cycles thermiques.**

Les essais de vérification du système sont toujours une étape importante du développement. Une procédure classique d'essai de cyclage thermique implique de chauffer plusieurs jeux de barres de test dans un four, à des températures et temps de cycle différents. Ces barres sont ensuite soumises à des contraintes mécaniques sur un banc vibratoire. Puis on teste l'humidité et, enfin, la tension de l'isolant du conducteur et de l'isolant principal.

Cette batterie de tests se poursuit jusqu'à la défaillance d'un certain nombre de barres de chaque jeu lors de l'essai de tension. L'application des équations d'Arrhenius aux résultats de chaque jeu permet de calculer la durée de vie →6. Le système d'imprégnation utilisé a récemment donné des résultats concluants.

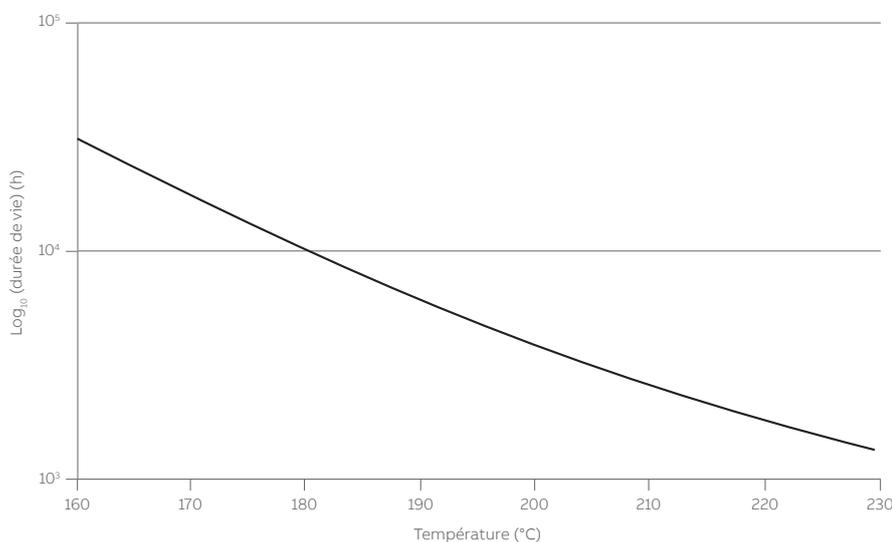
### Extrémités des enroulements

Les enroulements d'extrémité, ainsi que leurs raccordements et leurs supports, sont exposés aux vibrations et au cyclage thermique dus aux accélérations, décélérations et fréquentes commutations réseau.

La vibration des enroulements d'extrémité statoriques est un souci majeur sur les grosses machines électriques, en particulier celles à deux pôles, où la fréquence propre des extrémités d'enroulements a tendance à diminuer à proximité du double de la fréquence réseau (100/120 Hz). C'est pourquoi ces machines ont besoin de structures porteuses spéciales qui renforcent la fréquence propre et la raideur des enroulements. Par contre, dans les alternateurs à plusieurs pôles, ces extrémités sont courtes par nature et les fréquences propres suffisamment élevées pour ne demander aucun support structurel supplémentaire.

Leur développement et leur conception font appel à des méthodes modernes, dont l'analyse par éléments finis (AEF) en trois dimensions. L'AEF sert à calculer les forces ainsi que les performances statiques et dynamiques →7.

La conception et l'exécution de la structure porteuse par imprégnation sous vide et pression globale confèrent de très bonnes caractéristiques aux enroulements d'extrémité au regard des contraintes et des forces en présence.



—  
07 Exemples d'analyse  
d'enroulements  
d'extrémité

07a Forme modélisée

07b Répartition à un  
instant donné des forces  
magnétiques exercées

Autrement dit, les alternateurs d'équilibrage du réseau à moyenne vitesse qui en sont équipés affichent robustesse et résistance aux vibrations.

Le fonctionnement sous le seuil d'excitation, qui consomme de la puissance réactive, est source de contraintes thermiques aux extrémités du noyau. Cet effet est moins marqué dans les alternateurs à moyenne vitesse, dotés d'un nombre élevé de pôles, car la bobine est moins large et la répartition du flux plus favorable au niveau de l'extrémité.

### Châssis

Le châssis de l'alternateur est monté sur une armature commune avec le moteur à combustion. Les vibrations du moteur transmises par l'armature

ont un impact significatif sur la conception de ce châssis, qui doit être un peu plus robuste que celui des alternateurs reposant sur un socle en béton.

La résistance à la fatigue est ici déterminante. Concevoir un alternateur fiable tout en maîtrisant le coût du châssis exige une compréhension approfondie des dynamiques à l'œuvre dans tout le groupe ; l'analyse de la réponse (par simulation numérique) de l'ensemble du groupe est pour cela incontournable.

—  
L'imprégnation sous vide et pression globale confère des caractéristiques exceptionnelles au rotor et au stator.

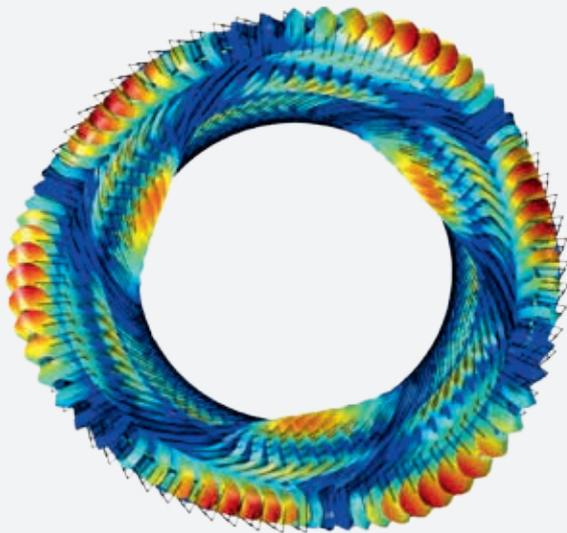
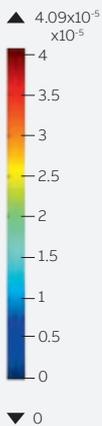
Il est possible de simuler les contraintes dues à la fatigue lors des démarrages et des arrêts. L'historique des calculs de contraintes permet d'évaluer la tenue à la fatigue avec des méthodes classiques. Par la suite, les détails critiques peuvent être ajustés pour améliorer celle-ci. Grâce à cette méthode, le châssis de l'alternateur atteint la durée de vie recherchée, sans défaillance par fatigue.

### Rotor et paliers

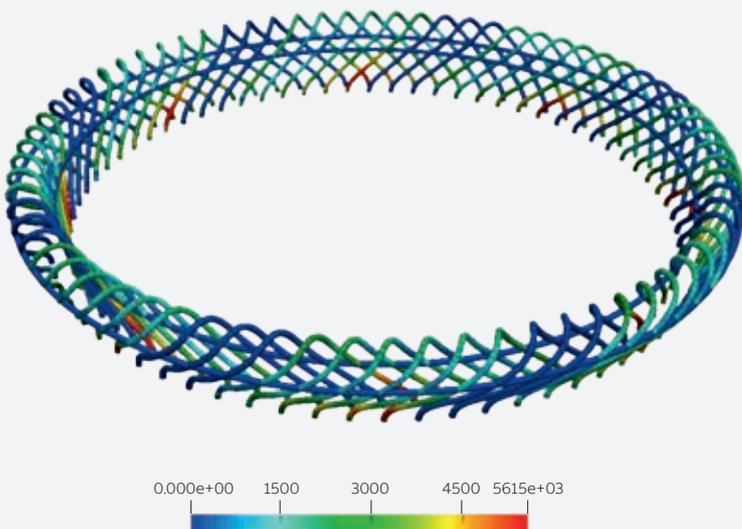
Les alternateurs à moyenne vitesse n'atteignent jamais de plage critique au niveau du rotor. En effet, la première vitesse critique en flexion du rotor se situe au-dessus de la vitesse de rotation assignée de l'alternateur. Le rotor ne traversant aucune plage de vitesses critiques en flexion pendant les cycles de mise en charge, la conception du rotor et des paliers est affranchie de cet aspect. C'est là un net avantage sur les alternateurs à vitesse plus élevée (à deux pôles, par exemple). Les cycles thermiques ont les mêmes effets sur le rotor que sur le stator. La conception du rotor s'appuie sur un principe fondamental : garder le contact entre les composants tout au long des cycles thermiques pour éviter la fatigue mécanique de la résine. De plus, les paliers sont montés sur vérins, permettant ainsi un très grand nombre de démarrages sans usure.

### La conception, clé de la longévité

À l'ère des énergies renouvelables, les génératrices d'équilibrage du réseau doivent pouvoir supporter des cycles thermiques et de vitesse bien plus nombreux que leurs homologues classiques. Seule une conception particulièrement soignée des alternateurs garantit un fonctionnement fiable. Bien conçus, ceux-ci seront à même de résister à ces nouvelles contraintes plus importantes et de faire preuve d'une grande fiabilité pendant leur très longue durée de vie. ●



07a



07b

SERVICE ET FIABILITÉ

# Des convertisseurs à IGBT pour un lifting des locomotives Re460

La dernière génération de convertisseurs à IGBT d'ABB modernise et allonge la durée de vie des locomotives Re460 des Chemins de fer fédéraux (CFF) suisses.



**Thomas Huggenberger**  
ABB Discrete  
Automation and Motion,  
Power Conversion

Turgi (Suisse)  
thomas.huggenberger@  
ch.abb.com

Salué dans le monde entier pour sa densité, la ponctualité et la fréquence de ses trains, de même que sa qualité de service, le réseau ferré suisse achemine bien plus d'un million de voyageurs chaque jour. Pour conforter ce succès et préparer le réseau aux enjeux du futur, un vaste programme de modernisation, baptisé « Rail 2000 », fut lancé à la fin des années 1980 avec la double ambition d'ajouter des capacités de transport et de réduire les temps de parcours. L'introduction de la locomotive Re460 →1 fut une pièce maîtresse du projet; quelque 119 exemplaires seront mis en service entre 1992 et 1996. Le parc était équipé de convertisseurs à thyristors blocables par la gâchette GTO (Gate Turn-Off) et de moteurs asynchrones, tous de fabrication ABB, qui constituaient à l'époque le nec plus ultra de l'électronique de puissance pour la traction ferroviaire.

Plus de vingt années plus tard, les locomotives Re460 assurent toujours un service d'excellence. Elles affichent au compteur près de la moitié des kilomètres parcourus par l'ensemble de la flotte CFF, chacune ayant couvert en moyenne 5,5 millions de kilomètres depuis sa mise en circulation, soit l'équivalent de sept aller-retour sur la Lune.

Certes, cette célèbre lignée de locomotives rouges est de construction robuste et conçue pour durer, mais elle doit aussi capitaliser sur les immenses progrès accomplis par l'électronique de puissance

au cours des dernières décennies. Les GTO, par exemple, ont été largement supplantés en traction électrique par des transistors bipolaires à grille isolée IGBT (Integrated-Gate Bipolar Transistors), plus souples. Aussi les CFF ont-ils décidé d'entreprendre un programme de remise en état à mi-carrière de leurs locomotives. La révision, qui inclut une optimisation de la totalité des systèmes électriques, prolongera la durée de vie des machines d'au moins 20 ans, tout en améliorant leur rendement énergétique et réduisant leur maintenance. Une fois le parc modernisé, les économies d'énergie devraient s'élever à 27 gigawattheures par an, soit l'équivalent de la consommation électrique de 6750 foyers suisses.

## ABB en tête de train

ABB est un leader de la recherche-développement et de la fabrication de convertisseurs de traction à haut rendement, ainsi que de moteurs de traction et de transformateurs. Le Groupe bénéficie de plus d'un siècle d'expérience en traction ferroviaire dans le monde entier.

Outre la fourniture de nouveaux équipements, ABB jouit d'une solide expertise dans la prestation de services et la maintenance du matériel roulant tout au long du cycle de vie. En 2008, par exemple, ABB a remplacé avec succès les chaînes de traction à GTO des trains à grande vitesse ICE 1 de la Deutsche Bahn (société nationale des chemins de



## 01

—  
01 Locomotive Re460  
(avec l'aimable  
autorisation des CFF)

—  
02 Topologies de  
commutation et formes  
d'onde des convertis-  
seurs à IGBT à deux et  
trois niveaux

—  
03 Convertisseur à IGBT  
à trois niveaux et module  
de phase équipant la  
Re460 modernisée.

fer allemands) par des convertisseurs à IGBT à la pointe de l'innovation. Sa proximité client, ses vastes connaissances et son expérience lui ont valu de remporter en 2014 une commande des CFF d'environ 70 millions de francs suisses pour équiper la flotte Re460 de la dernière génération de convertisseurs de traction. Objectifs : accroître l'efficacité énergétique et la fiabilité, faciliter la maintenance.

—  
**Une fréquence de commutation plus élevée aurait accentué les pertes par commutation et les émissions sonores.**

#### Cahier des charges

Les CFF voulaient des locomotives remises à neuf, capables de satisfaire à des spécifications contraignantes, dictées notamment par les pentes raides de la ligne qui traverse Zurich ainsi que les conditions ambiantes du nouveau tunnel de base du Gothard, ces deux ouvrages n'existant pas à l'époque des premières séries Re460. La ligne diamétrale de Zurich impose un concept redondant : les fortes déclivités de ce couloir très fréquenté sont sources de risques dans la mesure où la panne d'un train peut se répercuter sur tout le réseau. La remise en état permet d'isoler un moteur de traction défaillant et de poursuivre le

trajet avec les trois moteurs restants. Le Saint-Gothard, quant à lui, pose des problèmes de chaleur, d'humidité et de mise en conformité aux dernières normes de sécurité incendie.

#### Solution technique

Diagnostiqués en bon état, les moteurs de traction, transformateurs et systèmes de pilotage des véhicules furent conservés, tout comme leurs paramètres définissant la conception des nouveaux convertisseurs de traction ainsi que la tension du bus CC à 3,5 kV.

Deux topologies de convertisseurs à IGBT furent envisagées →2 : une première constituée de deux niveaux de 6,5 kV et une seconde à trois niveaux, dans laquelle les niveaux supérieur et inférieur conduisent la moitié de la tension globale du bus par rapport au niveau intermédiaire. C'est cette dernière solution qu'ABB privilégia pour rénover les Re460 avec ses convertisseurs de traction à IGBT.

La topologie à trois niveaux donne lieu à une circulation du courant de traction plus proche de la forme d'onde sinusoïdale recherchée. Le système GTO d'origine présentait également cette topologie : il en résultait un faible niveau d'harmoniques qui influença la conception des moteurs de traction et des transformateurs. Le recours à une topologie à deux niveaux pour atteindre ce même taux d'harmoniques aurait exigé une fréquence de commutation élevée ; d'où de plus fortes pertes par commutation et des sollicitations accrues sur les matériaux

isolants. Outre ses avantages électriques et énergétiques, la solution ABB se caractérise par de faibles émissions sonores.

L'adoption d'une topologie à trois niveaux de 3,3 kV évite également la mise en parallèle des IGBT. Concrètement, le convertisseur côté réseau (un pour chacun des deux bogies) embarque au total quatre modules de phase ; les deux convertisseurs côté moteur en ont chacun trois →3. La mise en correspondance des modules IGBT, nécessaire en connexion parallèle, s'avère inutile.

### Circuit de puissance

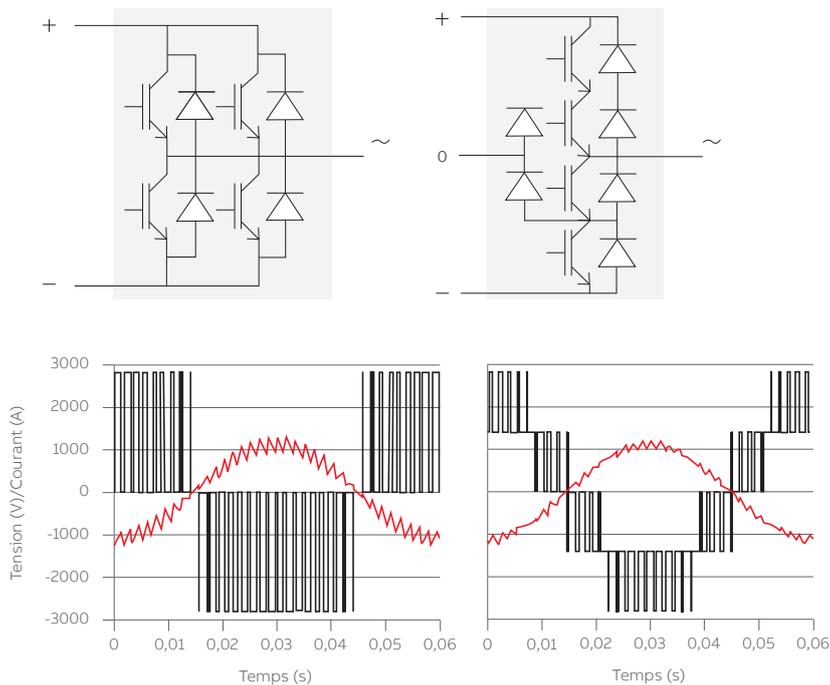
La topologie du circuit de puissance est, à l'exception de la technologie IGBT, largement identique à l'original. Les modules de phase à IGBT refroidis par eau sont basés sur la plate-forme de convertisseur de traction BORDLINE d'ABB. Les modules de phase du convertisseur côté réseau sont identiques à ceux du convertisseur côté moteur : une configuration également mise en œuvre dans d'autres projets de modernisation des trains ICE1 du réseau allemand.

Le transformateur comporte quatre bobines côté secondaire, dont deux se raccordent à chacun des deux convertisseurs correspondants →4. Chaque bobine est reliée à un redresseur, qui est alimenté par le transformateur mais peut aussi réinjecter du courant dans le réseau quand la locomotive freine.

La tension côté CC des convertisseurs est reliée aux condensateurs du bus CC, qui la lisse à l'aide d'un circuit résonant accordé à 33,4 Hz ; une étape nécessaire car le réseau ferroviaire monophasé à 16,7 Hz ne débite pas en continu. La puissance est fournie aux convertisseurs côté moteur sous forme d'impulsions au double de la fréquence réseau.

La tension du bus CC est redressée en triphasée CA par le convertisseur à trois niveaux côté moteur, créant ainsi les profils d'onde de tension souhaités pour la régulation en vitesse et en couple.

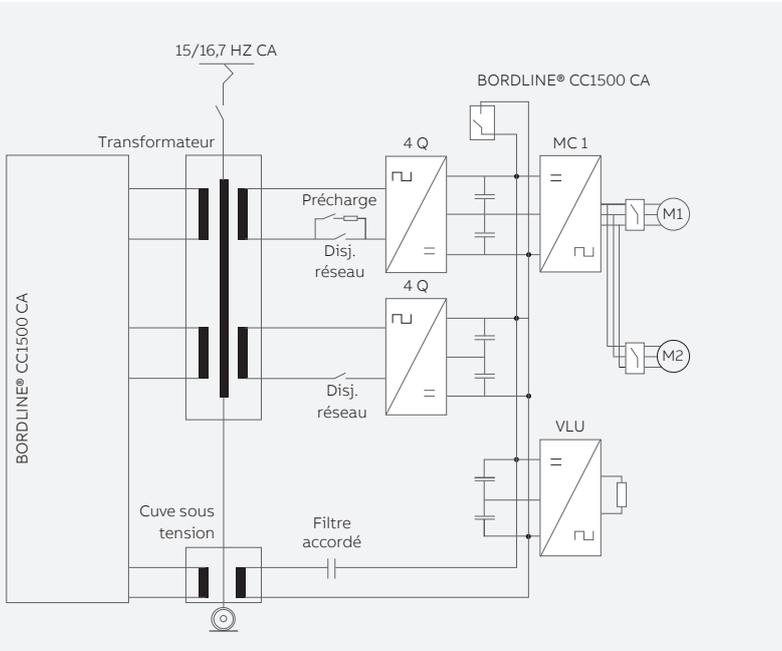
Chacun des deux convertisseurs de traction alimente les deux moteurs d'un bogie en connexion parallèle. Ce nouveau moyen de séparation des moteurs permet de déconnecter un moteur défaillant.



02



03



04

04 Schéma électrique du convertisseur

05 Stator d'une locomotive Re460, à l'essai sur le dynamomètre du laboratoire ABB à Turgi (Suisse) pour mesurer la tension de bobine durant les opérations de commutation.

06 Résultats des essais de stator : on constate une hausse transitoire de la tension de bobine durant la commutation des IGBT, qu'il faut limiter pour éviter d'endommager le moteur.

**Construction mécanique**

Les nouveaux convertisseurs compacts à IGBT sont refroidis par eau, ce système de refroidissement remplaçant totalement le précédent système à circulation d'huile : une méthode à la fois économe en énergie, écologique et sûre.

Plus léger et moins volumineux, ce nouvel équipement libère de la place pour des composants supplémentaires ou de futures mises à niveau. On ajoute du ballast pour pallier l'inconvénient de cette réduction de masse et améliorer l'adhérence en traction.

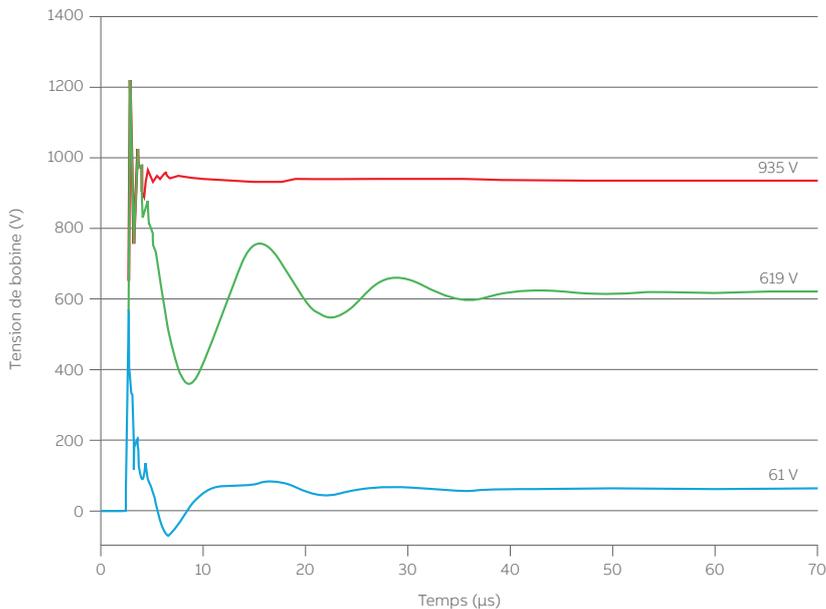


05

**Contrôle-commande**

Le nouveau convertisseur utilise la plate-forme de contrôle-commande AC800 PEC d'ABB, l'une des plus puissantes du marché. L'interface MVB (Multi-functional Vehicle Bus) est identique à celle qu'elle remplace, hormis quelques adaptations fonctionnelles minimales, comme la déconnexion de chaque moteur de traction, évoquée plus haut.

La plate-forme PEC intègre de puissantes capacités de calcul offrant des fonctions avancées de régulation du comportement dynamique des moteurs de traction et d'optimisation énergétique.



06 —  $V_{\text{essai}}$ : tension d'essai appliquée au moteur  
 —  $V_{\text{WM}}$ : tension mesurée à l'intérieur du moteur, aux bornes d'une bobine  
 —  $V_{\text{coll}}$ : tension mesurée sur la première spire d'une bobine

— Article tiré de la revue eb – Elektrische Bahnen 114, n° 8-9, p. 485-489, 2016.

— **Lectures complémentaires**  
Communiqué de presse, «ABB remporte une commande de 70 millions de dollars pour moderniser des locomotives des Chemins de fer fédéraux suisses (CFF)», disponible en ligne sur : <http://www.abb.fr/cawp/seitp202/40e3b261760babf9c1257d5c002d35d2.aspx>, 23 septembre 2014.

Hepp, H., « Accord parfait : compacts, fiables et puissants, les convertisseurs de traction ABB se plient aux exigences de tous les types d'engins ferroviaires », ABB Review 2/10, p. 60-65.

Isber, J., Curtis, M., « Le moteur de traction se standardise : ABB présente sa nouvelle gamme de moteurs modulaires innovants pour la traction ferroviaire », ABB Review 2/10, p. 66-69.

Moine, V., Hepp, H., Maciocia, S., « Services compris ! ABB propose un large éventail de services dédiés au rail », ABB Review 2/10, p. 70-76.

CFF, Plan d'action 2015, disponible en ligne sur : [www.confederation-exemplary-in-energy.ch](http://www.confederation-exemplary-in-energy.ch), consulté en janvier 2017.

CFF, Rapport annuel 2015.

Le logiciel de contrôle-commande fut créé sous MATLAB/Simulink® pour renforcer l'efficacité et la convivialité de la mise en œuvre, mais aussi faciliter les futures adaptations fonctionnelles des locomotives.

### Essais

Les laboratoires d'ABB à Turgi (Suisse) procédèrent à de très nombreux essais et mesures pour simuler avec précision les conditions de fonctionnement et vérifier la configuration de conception du nouvel équipement tout en respectant la compatibilité avec l'existant.

## Substituer aux convertisseurs à GTO les nouveaux convertisseurs de traction à IGBT d'ABB est une solution efficace et économique pour allonger la durée d'exploitation des locomotives Re460.

Les moteurs de traction en place ayant été développés en adéquation avec les convertisseurs à GTO d'origine, il fallait tester les nouveaux convertisseurs à IGBT avec ces moteurs →5. La compatibilité de la nouvelle tension de sortie avec l'isolant moteur existant est cruciale. La topologie à trois niveaux crée un profil d'harmoniques semblable à celui des convertisseurs d'origine, ce qui ne pose donc pas de problème. Les évaluations eurent lieu dans le laboratoire d'essais ABB pour s'assurer de

l'absence de surtension découlant de la plus forte pente de tension de commutation des IGBT →6. Résultats concluants !

Les deux premiers convertisseurs furent installés avec succès sur une Re460, à l'atelier CFF d'Yverdon-Bains. Cette locomotive est actuellement testée sur les lignes CFF ; les essais se poursuivront pendant un an. Au total, 202 convertisseurs à IGBT refroidis par eau et une option de 38 unités supplémentaires seront fournis par ABB et installés par les CFF. Ce programme de modernisation prendra fin en 2022.

### Roulez jeunesse !

Les systèmes de traction CA à trois niveaux introduits il y a plus de 25 ans continuent à faire la preuve de leur efficacité énergétique et de leur économie de maintenance. À l'image de la locomotive Re460, ils arborent une conception sobre et performante, et conservent un bon état mécanique qui leur garantit encore 20 années de service. Pour autant, l'absence de prise en compte des écueils techniques liées aux convertisseurs dépassés, à l'accroissement des temps d'arrêt et des coûts de maintenance, et aux difficultés d'approvisionnement en pièces de rechange menace de dégrader leur fonctionnement. Le remplacement de tous les convertisseurs à GTO par de nouveaux convertisseurs de traction à IGBT est un moyen efficace et économique de prolonger la durée de vie de ces locomotives. La technologie IGBT en fait un matériel roulant moderne, conforme aux nouveaux référentiels d'efficacité énergétique, de régulation de la puissance de traction et de facilité de maintenance. ●

### 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  
Communications

**Ernst Scholtz**  
R&D Strategy Manager  
Group R&D and Technology

**Andreas Moglestue**  
Chief Editor, ABB Review  
[andreas.moglestue@ch.abb.com](mailto:andreas.moglestue@ch.abb.com)

#### Édition

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](mailto: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'intéressent 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](http://www.abb.com/abbreview).

L'impression ou la reproduction partielle d'articles est autorisée sous réserve d'en indiquer l'origine. La reproduction d'articles complets requiert l'autorisation écrite de l'éditeur.

Édition et droits d'auteur ©2017  
ABB Switzerland Ltd.  
Baden (Suisse)

#### Impression

Vorarlberger  
Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn  
(Autriche)

**Maquette**  
DAVILLA AG  
Zurich (Suisse)

**Traduction française**  
Dominique Helies  
[dhelies@wanadoo.fr](mailto:dhelies@wanadoo.fr)

#### Avertissement

Les avis exprimés dans la présente publication n'engagent que leurs auteurs et sont donnés uniquement pour information. Le lecteur ne devra en aucun cas agir sur la base de ces écrits sans consulter un professionnel. Il est entendu que les auteurs ne fournissent aucun conseil ou point de vue technique ou professionnel sur aucun fait ni sujet spécifique, et déclinent toute responsabilité sur leur utilisation.

Les entreprises du Groupe ABB n'apportent aucune caution ou garantie, ni ne prennent aucun engagement, formel ou implicite, concernant le contenu ou l'exactitude des opinions exprimées dans la présente publication.

ISSN : 1013-3119

<http://www.abb.com/abbreview>



#### À vos tablettes

Retrouvez l'application ABB Review sur notre site [www.abb.com/abbreviewapp](http://www.abb.com/abbreviewapp).

#### Gardez le contact

Pour ne pas manquer un numéro, abonnez-vous à la liste de diffusion sur [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview).

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



—  
Dans le numéro 2/2017

## **Coup de projecteur sur l'Afrique**

**En matière de développement, l'Afrique cumule un des plus forts potentiels de la planète ... et les plus grandes difficultés. Alors que sa population devrait atteindre 4,4 milliards d'individus en 2100, ABB développe des technologies innovantes pour répondre aux besoins du continent. Le prochain numéro d'ABB Review se fera l'écho de quelques réalisations exemplaires.**