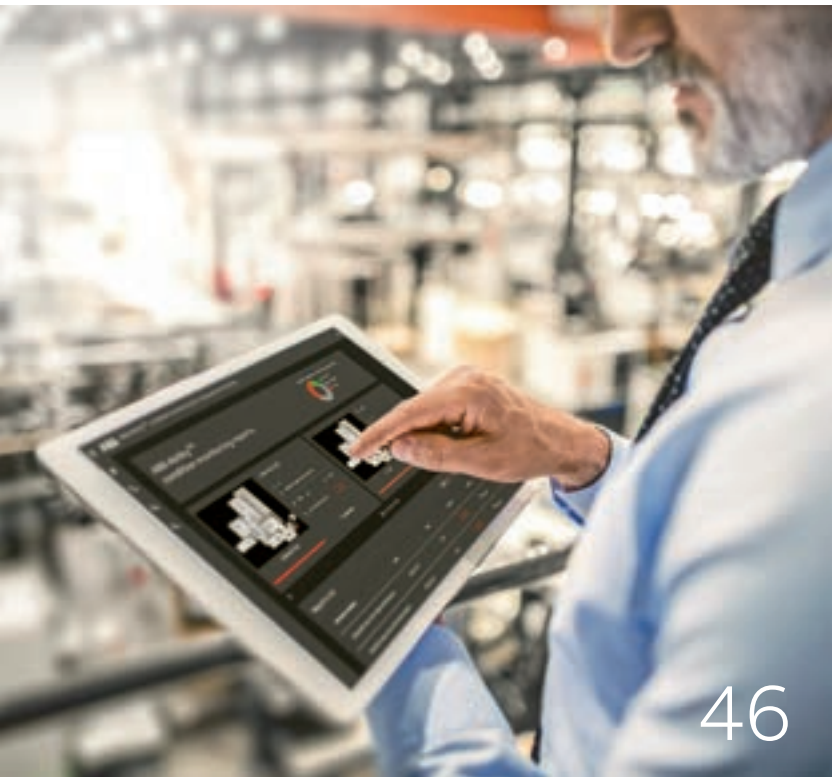
review

02|2021 fr

Machines intelligentes

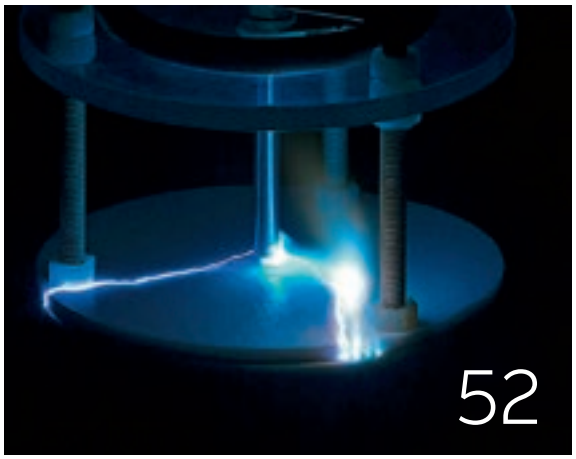


06 – 37 **Machines intelligentes**
38 – 49 **Instrumentation et analytique**
50 – 81 **Énergie active**

Disjoncteur communicant Tmax XT

La coupure d’arc s’affranchit du SF_6

Analytique des procédés batch



Labo virtuel à haute tension

05 Éditorial

Machines intelligentes

08 Programme Digital Lighthouse
14 Détection d'anomalies autonome
18 Machines et robots
22 Intégration commande de machine-robotique
24 Intelligence artificielle explicable
31 Analytique des procédés batch
36 Technologies à visage humain

Instrumentation et analytique

40 Détecter pour savoir et anticiper
46 Services numériques pour analyseurs de gaz

Énergie active

52 Labo virtuel à haute tension
58 Le transport s'électrifie
62 Disjoncteur communicant Tmax XT
68 Connectique ReliaGear® neXT et SB
72 La coupure d'arc s'affranchit du SF_6
78 Capteurs à bobine de Rogowski

Le mot du moment

82 Matériaux intelligents

83 Recevoir ABB Review
83 Publication ABB

Machines intelligentes

Une machine « intelligente » ressemble beaucoup à une personne intelligente : elle ne sait pas tout mais a la capacité d’apprendre ; elle utilise son capital de connaissances pour apporter des idées et non de simples réponses. L’intelligence n’est pas innée mais peut s’acquérir : ce numéro d’ABB Review s’intéresse à la manière dont des machines douées de capacités de compréhension et d’adaptation s’allient à l’intelligence humaine pour transformer l’industrie.

ÉDITORIAL

Machines intelligentes

Chers lecteurs,

Il y a souvent loin de l'hypothèse scientifique à la réalité pratique. La technologie a justement pour vocation de rapprocher ces deux mondes de sorte que la recherche scientifique débouche sur des réalisations concrètes, directement bénéfiques à l'industrie et à la population, tout en préservant la planète.

Ce numéro d'ABB Review est consacré aux applications de l'intelligence artificielle (IA) dans l'industrie. L'IA ne se contente pas d'améliorer la collecte, le croisement et l'échange des données ; elle a le potentiel de transformer l'écosystème productif pour le rendre plus efficient, plus rentable et durable.

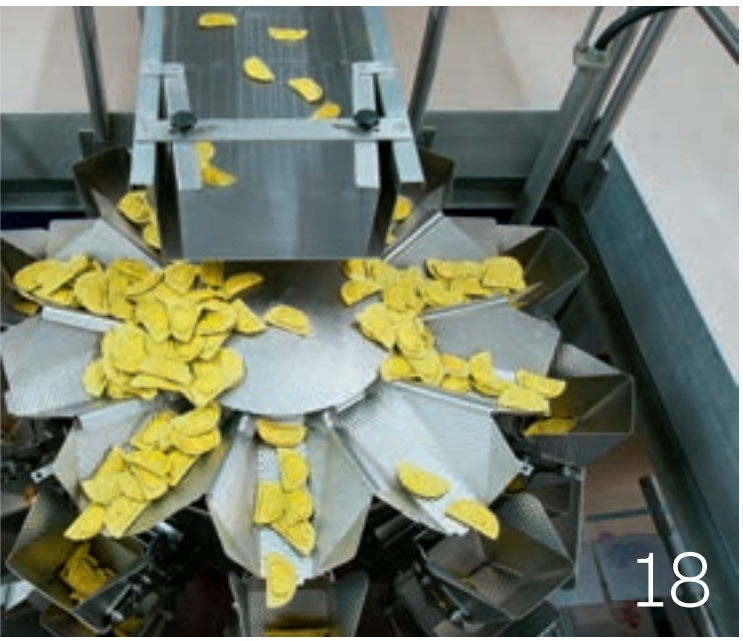
Mais peut-on faire confiance à l'IA ? et dans quelles conditions ? Comment améliorer les méthodes d'apprentissage automatique ? En quoi l'IA peut-elle nous aider à améliorer l'existant et concevoir des systèmes plus performants ? Un florilège de questions auxquelles ABB Review livre ici quelques éléments de réponse.

Bonne lecture,

Björn Rosengren
Directeur général du Groupe ABB

Crédit photo page 04 : metamorworks/stock.adobe.com

Machines intelligentes



Une machine intelligente doit non seulement pouvoir communiquer et apprendre de son environnement, mais aussi s'appuyer sur des algorithmes robustes et dignes de confiance. ABB participe à défricher ce domaine de pointe et aide ses clients industriels à insuffler de l'intelligence dans leurs machines et procédés.

08 L'étincelle de la transformation
14 Un duo de choc pour accélérer la détection d'anomalies
18 Quand machine et robot ne font plus qu'un
22 Une solution intégrant commande de machine et robotique
24 L'intelligence artificielle explicable pour des machines dignes de confiance
31 Une fabrication par lot au top grâce à l'analytique
36 Technologies à visage humain

MACHINES INTELLIGENTES

L’étincelle de la transformation

En 2017, ABB a lancé un programme collaboratif avec ses clients, baptisé Digital Lighthouse, pour identifier et accompagner financièrement le développement de solutions numériques innovantes. Une initiative réussie puisque 30 nouveaux produits sont déjà commercialisés.

01

— 01 Le programme Digital Lighthouse accélère la mise sur le marché de solutions numériques innovantes.

Si l’innovation numérique n’est pas chose aisée dans un groupe multisectoriel vieux de 130 ans, elle est indispensable pour prétendre au rang de chef de file de l’industrie du futur. Elle passe par la capacité à tester de nouvelles idées, à tirer des leçons des résultats obtenus et à développer les initiatives les plus prometteuses.

C’est pour concrétiser cette ambition qu’ABB a lancé le programme Digital Lighthouse. L’idée : sélectionner les meilleurs projets en interne, mettre à leur disposition le financement et les ressources nécessaires, et co-innover avec les clients du Groupe pour raccourcir notablement les délais de mise sur le marché →01.

Au terme de ce programme collaboratif de deux ans et demi, 66 produits minimum viables (PMV) étaient déployés, donnant lieu à plus de 40 témoignages clients ; à ce jour, 30 de ces produits sont commercialisés. Mieux, cette initiative apporte beaucoup à la culture de l’innovation numérique au sein d’ABB, qui entend bien ne laisser aucun projet dans les cartons !

Franziska Bossart
ABB Technology Ventures
Menlo Park (Californie, États-Unis)

franziska.bossart@us.abb.com

Photo: ©Looker_Studio/stock.adobe.com

Mue numérique
L'innovation et la transformation numérique nourrissent la croissance d'ABB et sa capacité à servir ses clients, tout en préservant son offre produits de la course au prix le plus bas. La prospérité et la pérennité du Groupe obligent à numériser et à étendre son portefeuille de solutions intégrées pour répondre aux besoins et attentes de son impressionnante base de clients fidèles.

Les participants étaient invités à défendre leurs projets dans une optique de commercialisation.

Or cette transformation ne se fait pas en un claquement de doigts.

Dans les grandes entreprises, elle se heurte à deux principaux freins : tout d'abord, leur budget de R&D est essentiellement consacré à l'amélioration marginale de produits existants pour grignoter des parts sur des marchés bien cadrés. Les programmes d'innovation numérique, de leur côté, sont entièrement tournés vers l'avenir, et la recherche-développement de nouveaux produits ciblant des marchés naissants ou encore inexistants →02 ; les mots d'ordre sont ici agilité, commercialisation rapide et prise de risque assumée. Résultat : des échecs… mais aussi des réussites qui changent radicalement la donne.

Deuxième frein : le succès d'un projet ne se mesure pas à sa date de lancement. Toute nouvelle offre numérique doit être traitée par le marketing ou la gestion produits comme une activité naissante qu'il faut nourrir d'une expérimentation poussée. Les projets les plus prometteurs doivent rapidement monter en puissance, et ceux voués à l'échec, être abandonnés au plus vite.

L'étincelle ABB
Lancé en avril 2017, le programme s'est achevé fin 2019. L'ambition était triple :
- Accélérer le développement et le déploiement de solutions d'avant-garde fondées sur la plate-forme numérique ABB Ability™ IIoT ;
- Encourager le codéveloppement avec les clients, impliqués dès les premières phases ;
- Ancrer chez ABB des technologies de pointe telles que l'intelligence artificielle (IA), la réalité augmentée ou virtuelle, les jumeaux numériques et la chaîne de blocs (« blockchain »).

Le programme a sélectionné, financé et lancé une douzaine de projets d'innovation par semestre, selon deux critères :
- Un profil d'innovation et de risque élevé, qui sinon n'aurait pas trouvé de financement ;

02

03

—
02 Les programmes d'innovation numérique préparent l'avenir, en rupture avec le fléchage classique des budgets de R&D vers des produits existants.

—
03 Une solution de navigation intelligente née du programme Digital Lighthouse.

—

Le codéveloppement précoce avec les clients a emporté une forte adhésion.

- La contribution de l'entité ABB porteuse du projet.

Le programme n'apportait en effet que la moitié du financement, le reste étant amené par l'entité ABB. Ce cofinancement a eu pour avantage inattendu d'encourager des équipes ABB à l'origine de projets similaires à mutualiser leurs efforts pour obtenir plus de moyens, gagner en efficacité et proposer ainsi aux clients des solutions applicatives compatibles avec un plus vaste catalogue de produits ABB.

Les participants étaient invités à défendre leur projet dans une optique de commercialisation : identification des clients intéressés par le codéveloppement de produits, explication des problématiques client levées par la solution ABB, obstacles à surmonter, apport financier, retour sur investissement à court et long terme.

Pour être considéré comme réussi, un projet devait atteindre deux objectifs :

- Le déploiement d'un PMV avec un client dans les neuf mois suivant le lancement ;
- La publication d'un témoignage client dans les deux mois suivant le déploiement.

Le premier objectif a eu l'avantage de nettement réduire les délais de développement pour les équipes R&D d'ABB. Fini le temps passé à peaufiner le moindre détail technique, un PMV bien ficelé suffit pour incuber le projet. Selon les mots d'un participant, « avec Digital Lighthouse, ABB a découvert la cocréation : jusqu'à présent, nous développions des produits en interne pour les proposer ensuite au marché. Désormais, nous travaillons d'emblée avec les clients à des solutions répondant exactement à leurs problématiques. »

Les projets candidats ont suscité d'autant plus d'intérêt qu'ils affichaient :

- une pluridisciplinarité favorisant durablement le réseautage et le partage de bonnes pratiques ;
- un potentiel d'intégration et d'amélioration de la plate-forme ABB Ability™ ;
- un soutien au développement de technologies émergentes (IA, apprentissage automatique, jumeaux numériques).

Une réunion virtuelle organisée par l'équipe du programme marquait le lancement officiel de chaque projet retenu et financé, ainsi que la mobilisation des équipes concernées. Très vite, il est apparu qu'un lancement trop précoce entraînait retards, perte d'enthousiasme et frustration. Un délai de deux mois entre la sélection d'un projet et son lancement a semblé optimal pour rallier les troupes, bien souvent réparties sur plusieurs continents et fuseaux horaires, et rassembler les moyens nécessaires.

Tous les deux mois, l'équipe Digital Lighthouse évaluait l'avancement de chaque projet sélectionné, favorisant ainsi une « fertilisation croisée » par diffusion des meilleures pratiques à l'ensemble des participants. À cette fin, un tableau de bord synthétisait tous les quinze jours les réalisations et prochains jalons de chaque équipe.

Sur les 170 dossiers présentés par des collaborateurs ABB, 73 ont été retenus et financés.

Ce codéveloppement précoce avec les clients est d'ailleurs devenu l'une des mesures phares du programme. Si, au départ, les équipes de développement recherchaient avant tout un financement, très vite, cette collaboration a montré d'autres avantages : des produits mieux adaptés au marché et des délais de commercialisation réduits.

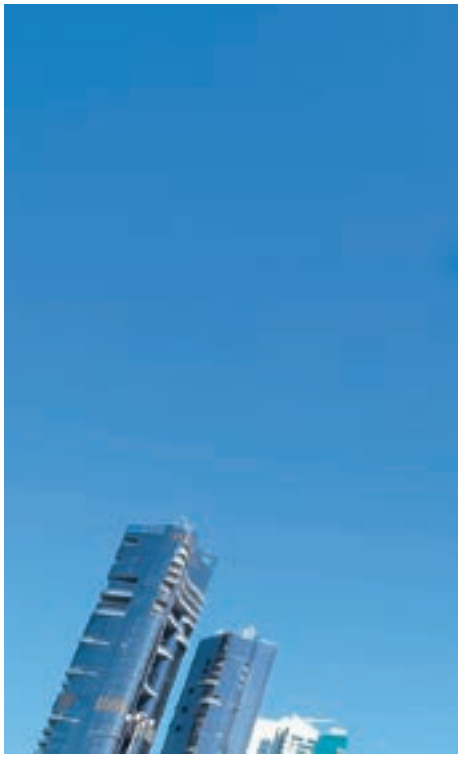
Que du positif

Sur les 170 dossiers présentés par des collaborateurs ABB, 73 ont été retenus et financés. Le vent du changement a donc soufflé dans l'ensemble des 19 domaines d'activité du Groupe.

Bilan : 66 PMV codéveloppés puis déployés, et 40 témoignages clients publiés. De nouveaux modèles d'affaires (dont la tarification par abonnement) ont émergé dans plus de 60 % des projets. Les deux premières offres sur ABB Ability™ Marketplace, le site de vente en ligne de solutions cloud d'ABB, sont nées de ce programme ; 17 projets ont mobilisé plusieurs entités du Groupe, et 19 ont eu recours à des technologies numériques émergentes. À ce jour, 30 PMV ont été mis en production et commercialisés.

Deux exemples de réussite

Le programme a accompagné le développement de deux solutions de navigation multitechnologies (lidar, radar, GPS, connectivité cloud) pouvant équiper pratiquement n'importe quel navire de transport de passagers →03. C'est le cas d'un traversier dont le logiciel prédit la position trente secondes à l'avance et superpose à l'environnement réel de navigation les manœuvres optimales qui permettront au pilote à terre de mener le bateau à bon port. Codéveloppée avec Suomenlinnan Liikenne Oy, filiale de l'établissement des transports de la ville d'Helsinki et l'Agence finlandaise chargée de la sécurité des transports (TRAFI), la solution exécute une boucle « capter-analyser-agir » totalement automatisée. C'est là un grand pas vers la navigation autonome, assistée si nécessaire d'un pilote à distance.



04

Autre exemple de réalisation, cette fois dans le domaine gazier : les gazoducs traversent souvent des régions inhospitalières ou peu accessibles, d'où les difficultés et les coûts engendrés par la détection des fuites de méthane, d'éthane et d'autres substances nocives. Codéveloppé avec la société ULC Robotics, le système ABB Ability™ Mobile Gas Leak Detection recourt à des drones pour survoler le réseau et y détecter les fuites avec une sensibilité mille fois supérieure à celles des outils traditionnels →04. Un bon moyen de préserver l'environnement, les infrastructures et le personnel, mais aussi le chiffre d'affaires du propriétaire du gazoduc ! La connexion au cloud assure une diffusion sécurisée, rapide et efficace des données partout dans le monde.

—
04 Codéveloppée avec ULC Robotics, la solution de détection de fuites de gaz ABB Ability™ s'appuie sur l'utilisation de drones.

Les utilisateurs habilités peuvent ainsi suivre le vol des drones en temps réel, consulter les diagnostics de fuite et agir en conséquence.

Ouvrir la voie

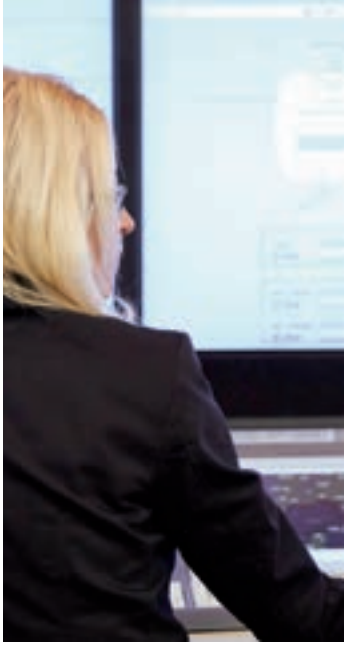
Quel bilan peut-on dresser de cette initiative ? Michael Wade, professeur d'innovation et de stratégie à l'IMD de Lausanne et directeur du Global Center for Digital Business Transformation, a suivi le programme de près. Son verdict ? « Dans un secteur où l'innovation prend des mois, voire des années, Digital Lighthouse a fait souffler un grand vent de nouveauté sur le Groupe ABB. Et quand on sait que les initiatives de transformation numérique sont souvent vouées à l'échec, déployer 66 PMV en deux ans et réussir à en commercialiser 30 à ce jour relèvent de la prouesse ! »

Le programme marque plusieurs victoires : une accélération de la transformation numérique, la création d'un modèle opérationnel de co-innovation avec les clients, l'engagement affirmé d'ABB aux côtés de ses clients pour accompagner cette transition.

Reste que la collaboration n'est pas une mince affaire dans un grand groupe. En dépit de ses indéniables avantages, elle se heurte à des priorités concurrentes, des réticences culturelles et des métriques peu claires.

Avec ce programme, des équipes issues de nombreuses entités ABB ont montré que, pour innover, l'union fait la force. Aujourd'hui, toutes les activités d'ABB mettent en place leurs propres programmes, accélérateurs ou incubateurs inspirés de Digital Lighthouse. La direction du Groupe soutient activement ces efforts pour prolonger ce bel élan d'innovation. •

Avec ce programme, des équipes issues de nombreuses entités ABB ont montré que, pour innover, l'union fait la force.



MACHINES INTELLIGENTES

Un duo de choc pour accélérer la détection d'anomalies

L'apprentissage automatique est un remarquable levier d'amélioration pour identifier les dysfonctionnements d'un procédé industriel et en optimiser la régulation. Néanmoins, l'entraînement de systèmes industriels « autonomes », capables de repérer les écarts significatifs par rapport à la normale, sans intervention humaine, s'avère souvent difficile tant les exemples tirés du monde réel font défaut.

Marcel Dix
Benjamin Klöpper
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

marcel.dix@de.abb.com
benjamin.kloepper@de.abb.com

Jean-Christophe Blanchon
CORYS
Grenoble (France)

Elise Thorud
ABB Energy Industries
Oslo (Norvège)

elise.thorud@no.abb.com

C'est pour combler cette lacune que la société grenobloise CORYS, spécialiste des simulateurs dynamiques de formation et d'étude, s'est associée à ABB pour créer un environnement de données répliquant avec une remarquable précision les données produites par des process industriels spécifiques. Cette avancée en simulation « haute fidélité » ouvre la voie à des capacités de détection accélérée d'anomalies parfaitement ciblées.

Il est une règle intangible de la performance industrielle : l'usine doit tourner à plein, avec une régularité de métronome. Autant dire qu'il faut savoir détecter, identifier, analyser et traiter le plus en amont possible le moindre signe de défaillance remonté du terrain (vibrations, niveaux anormaux de température, de pression et de bruit, etc.). La détection d'anomalies, une des applications centrales de l'apprentissage automatique, joue ici un rôle décisif en soutenant efficacement l'opérateur dans sa mission de surveillance et de suivi d'état de l'outil productif.

Pour entraîner des modèles d'apprentissage automatique, on utilise habituellement les historiques de production. Or les systèmes industriels étant aujourd'hui très robustes, les exemples de défaillances réelles dans les données de procédé sont souvent en nombre insuffisant pour garantir la fiabilité des modèles entraînés.

Et quand bien même on disposerait de quelques cas de défaillances avérés, ils restent difficiles à repérer dans la masse de données, faute d'être signalés et étiquetés comme tels par l'opérateur, ou tout simplement détectés au moment de leur apparition. Pis, cette situation peut conduire à décréter normale ce qui est en fait une anomalie mal identifiée.

Infrastructure de recherche

Pour remédier à ces défauts, les spécialistes de la gestion et de l'analyse des données ont recours à des simulateurs haute fidélité, tel Indiss Plus® de CORYS [3], pour entraîner les modèles d'apprentissage automatique aux situations normales et anormales d'un site (dysfonctionnement de vannes dans l'industrie des hydrocarbures, par exemple) et marquer correctement ces événements.

L'association de deux systèmes de simulation produit des données tout à fait semblables à celles récoltées sur le terrain.

CORYS et ABB ont ainsi créé une infrastructure visant à explorer et tester le potentiel, mais aussi les besoins en données, de différents algorithmes d'apprentissage automatique exécutés dans une configuration réaliste →01. Au fondement de l'expérimentation figurent les plates-formes de simulation Indiss Plus de CORYS et 800xA d'ABB, qui ont chacune prouvé leur extrême précision

savoir quand exécuter plusieurs actions de conduite opérateur (changements de consignes, par exemple) et quand déclencher des défaillances dans le simulateur de procédé Indiss Plus. L'automate enchaîne ainsi plusieurs séquences de démarrage/arrêt de la simulation, à partir de différents états initiaux du process, et d'exécution automatique des ordres opérateur. Il lance aussi la collecte des données reçues du simulateur 800xA, ce qui permet d'utiliser la plate-forme ABB comme un système de contrôle-commande sur simulateur présentant les mêmes outils et écrans opérateur, et la même logique de commande que sur le terrain. Les données acquises ainsi que la séquence d'actions exécutées par l'automate sont consignées dans une base chronologique et mises à la disposition de l'analyste afin d'entraîner les modèles d'apprentissage.

Des jeux de données issues de la simulation ont servi à entraîner un modèle de détection d'anomalies capable de déceler des défaillances simulées.

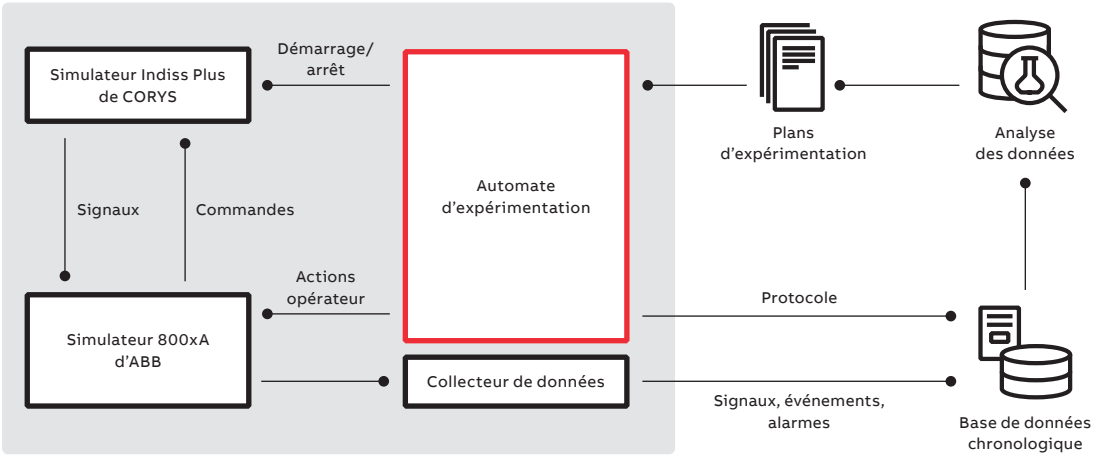
dans plusieurs projets de formation opérateur à la conduite de procédés. Couplé dans une seule et même configuration, cet attelage est capable de simuler le comportement physique d'un process et ses automatismes, comme par exemple la logique de commande avec ses alarmes et sa logique de sécurité.

L'un des atouts maîtres d'Indiss Plus est de permettre également la simulation de plusieurs défaillances d'équipements industriels (fuite sur vanne, par exemple →02). Les données obtenues peuvent alors pallier le manque de cas de défaillances pour étayer l'apprentissage automatique.

Pour créer les jeux de données nécessaires à l'entraînement et à la validation d'un modèle, il faut automatiser l'exécution des simulations. La tâche est ici dévolue à un automate dédié qui s'appuie sur un plan d'expérimentation pour

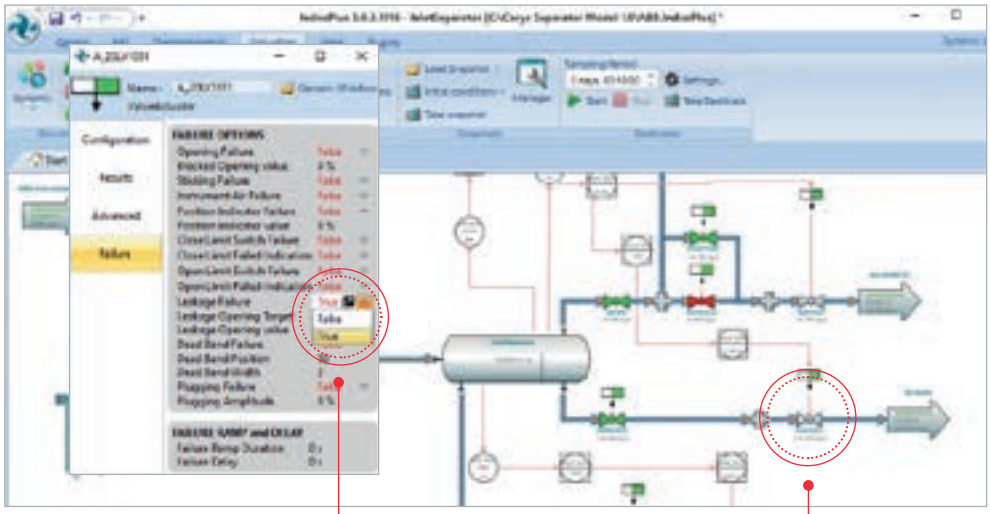
Étude de cas : un modèle dédié à la détection d'anomalies

Dans le cadre de notre étude, les jeux de données simulés ont servi à entraîner un modèle spécialement développé en vue de détecter des défaillances d'équipement.



01 Infrastructure de production et de collecte des données industrielles

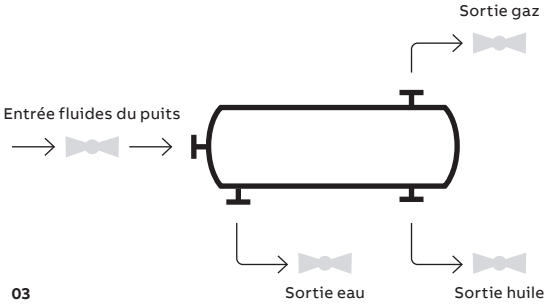
01



02

En pratique, les outils d'apprentissage automatique utilisent des « auto-encodeurs » [4] pour déceler des anomalies dans des séries de signaux chronologiques. Un auto-encodeur se compose de deux réseaux de neurones artificiels, le premier jouant le rôle d'encodeur pour compacter les données, et le second de décodeur, pour reconstituer les données de départ. Les différences entre données reconstruites et données initiales permettent de mesurer l'erreur commise par l'auto-encodeur, qui, dans notre cas, sert à évaluer l'importance de l'anomalie détectée.

Le modèle de simulation haute fidélité de CORYS s'applique ici à un séparateur triphasique d'hydrocarbures →03. Pour garantir le bon déroulement du process, il importe de stabiliser le flux des trois composants du mélange huile-eau-gaz dans la cuve. Ce que fait automatiquement le système de contrôle-commande en ajustant plusieurs vannes : si la consigne de l'un des niveaux change, il modifie en conséquence le réglage des autres vannes pour maintenir l'ensemble en équilibre.

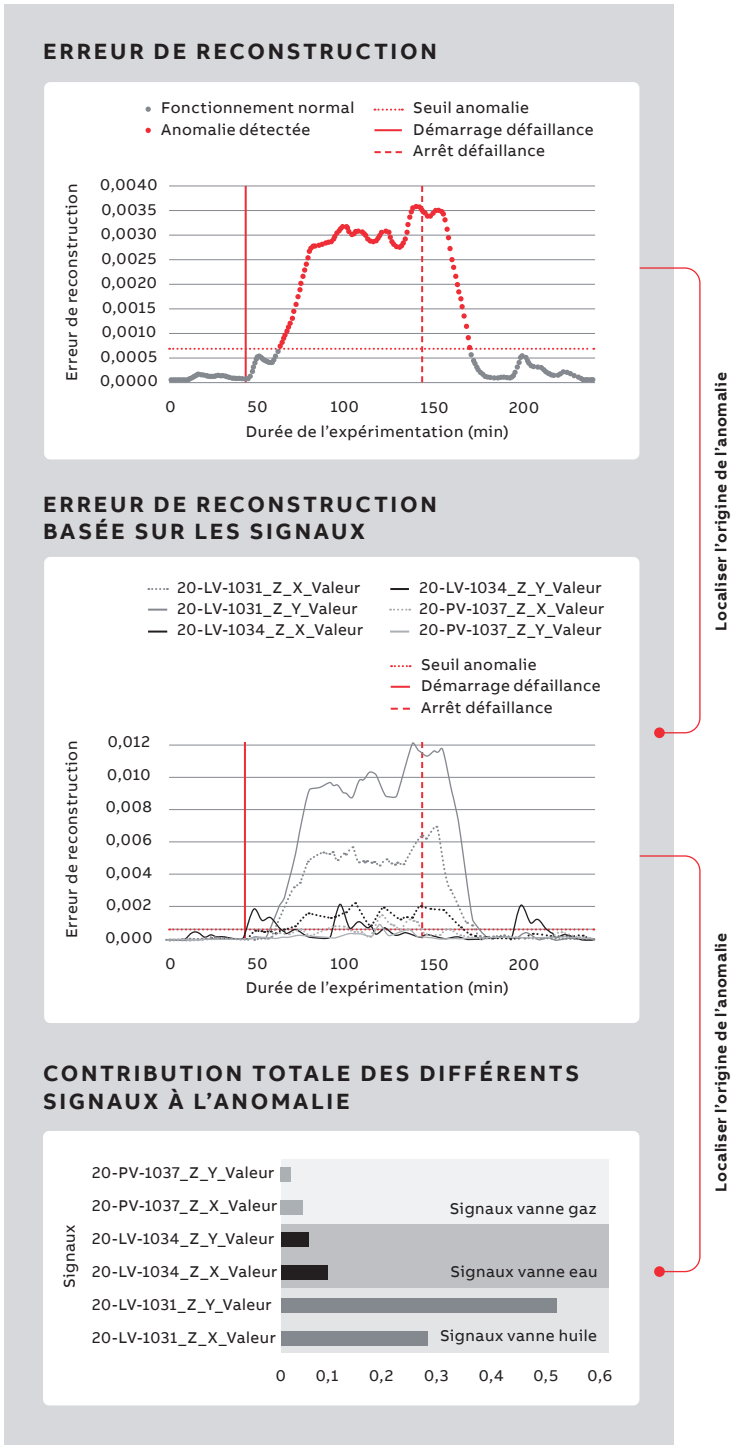


03

Le simulateur Indiss Plus a servi à entraîner un auto-encodeur afin de détecter une défaillance matérielle (blocage ou fuite de vanne, par exemple). L'opérateur a souvent du mal à détecter ces types de dysfonctionnement, en particulier s'ils ne sont pas directement représentés dans une IHM. Ce peut être le cas, notamment, lorsque le process n'est pas instrumenté à cette fin. Dans le cadre de notre étude, il s'agissait d'entraîner un auto-encodeur à reconnaître les tendances de signaux fournies par la séparation triphasique en fonctionnement normal, puis d'appliquer cet auto-encodeur entraîné à la reconstruction des tendances de différentes défaillances d'équipement simulées.

Un simulateur a permis d'entraîner un auto-encodeur à la détection d'une défaillance physique, de type blocage ou fuite de vanne.

Résultat : l'auto-encodeur a été capable de détecter ces défaillances comme anomalies puisqu'il n'avait pas vu les tendances de signaux qui les représentaient lors de son entraînement. Cela s'est traduit par une erreur de reconstruction relativement importante. Au-delà d'un certain seuil d'erreur, l'auto-encodeur classe la situation comme anormale et la signale à l'opérateur. Dans notre cas, ce seuil a été franchi à l'instant même de la défaillance ; puis, lorsque celle-ci a été retirée d'Indiss Plus, l'erreur de reconstruction de l'auto-encodeur est revenue à la normale.



04

Une fois l'anomalie détectée, reste à en trouver la cause : ici, la vanne d'huile →04.

Le bon mixte

Les travaux décrits dans cet article sont le fruit du partenariat stratégique ABB-CORYS pour créer une infrastructure de recherche sur l'apprentissage automatique qui soit reproductible. Le couple de simulateurs Indiss Plus-800xA permet de bâtir un environnement de données en tous points similaires à celles produites en conditions réelles. L'intérêt majeur de cette méthode est que les spécialistes de l'apprentissage automatique ont toute la maîtrise de la production de données et peuvent tester et évaluer leur démarche de façon rationnelle et globale. Combiner simulation haute fidélité, fondée sur des modèles de premier principe, et apprentissage machine donne naissance à de parfaites répliques numériques des fonctions remplies par les acteurs de l'usine dans toute leur diversité, des opérateurs aux responsables de production. Ces jumeaux numériques « mixtes » joueront assurément un rôle moteur dans l'autonomisation du contrôle-commande de procédés.

Les jumeaux numériques « mixtes » sont appelés à jouer un rôle moteur dans l'autonomisation du contrôle-commande.

Prochaine étape : tester l'infrastructure d'apprentissage automatique décrite ici dans une simulation de site client. Cela permettra d'explorer le potentiel des algorithmes d'apprentissage automatique pré-entraînés à l'aide de modèles de simulation d'applications réelles. •

—
02 Simulation Indiss Plus d'une défaillance matérielle dans un environnement industriel réaliste (ici, fuite de vanne)

—
03 Principe de la séparation triphasique d'hydrocarbures

—
04 Détection de la défaillance d'une vanne (fuite) par modèle d'auto-encodeur entraîné avec des données process simulées

—
Bibliographie

[1] Gamer, T., Isaksson, A., « Systèmes autonomes », *ABB Review*, 4/2018, p. 8-11.

[2] Gamer, T., Hoernicke, M., Klöpper, B., Bauer, R., Isaksson, A., « The autonomous industrial plant – future of process engineering, operations and maintenance », *Journal of Process Control*, vol. 88, p. 101–110, 2020.

[3] CORYS, Indiss Plus® - Plateforme de simulation dynamique, disponible sur : https://www.corys.com/fr/indiss-plusr (consulté le 20 avril 2021).

[4] Sakurada, M., Yairi, T., « Anomaly Detection Using Autoencoders with Nonlinear Dimensionality Reduction », *Proceedings of the MLSDA 2014 2nd Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis*, p. 4-11, 2014.

[5] GE, Z., *et al.* « Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning », *IEEE Access*, vol. 5, p. 20590–20616, 2017.

[6] Joe Qin, J., *et al.*, « Advances and opportunities in machine learning for process data analytics », *Computers and Chemical Engineering*, n° 126, p. 465–473, 2019.

[7] Amihai, I., *et al.*, « An Industrial Case Study using Vibration Data and Machine Learning To Predict Asset Health », *2018 20th IEEE International Conference on Business Informatics*, Vienne, 2018.

[8] Wuest, T., *et al.*, « Machine learning in manufacturing: advantages,challenges, and applications », *Production & Manufacturing Research*, vol. 4, n° 1, p. 23–45, 2016.

MACHINES INTELLIGENTES

Quand machine et robot ne font plus qu'un

Grâce à la « robotique orientée machine » développée par B&R, société du Groupe ABB et grand nom de l'automatisation industrielle, les machines de l'atelier communiquent en temps réel avec les robots.

01

Sebastian Brandstetter
B&R Industrial Automation
Eggelsberg (Autriche)

sebastian.brandstetter@br-automation.com

Cette intégration se concrétise par une interface commune à la machine et au robot, qui facilite la tâche des opérateurs. Une première mondiale pour ABB qui se démarque ainsi de la concurrence par une offre globale regroupant l'ensemble des équipements de contrôle-commande industriels : entraînements de puissance, systèmes de sécurité, IHM, systèmes de vision et robots.

La robotique évolue de concert avec l'industrie : travail en interaction directe avec les humains, apprentissage par l'expérience, mise en réseau, mobilité, voire autonomie. Des capacités particulièrement appréciées dans un contexte multifactoriel de vieillissement de la population, de pénurie de personnel qualifié, de volonté de relocalisation et de personnalisation de masse de produits de qualité mais abordables [1] et, désormais, de respect des règles sanitaires et de sécurité liées à la Covid-19. C'est dans ce cadre particulièrement contraignant que B&R s'est associé à ABB pour mettre au point une solution permettant aux machines et robots industriels de dialoguer en temps réel →01.

Application pratique
La détection d'imperfections par caméra de vision B&R illustre très bien cette innovation. En moins d'une milliseconde, les données de défaut sont converties en commande envoyée au robot ABB associé à la machine de production, qui retire alors la pièce défectueuse de la chaîne. Le tout sans intervention manuelle ni baisse de cadence.

En moins d'une milliseconde, les données relatives au défaut détecté sont converties en commande envoyée à un robot ABB.

Cette intégration de la robotique ABB aux automatismes B&R s'appuie sur une architecture unifiée qui fusionne les informations nécessaires à ces deux systèmes auparavant distincts.

TECHNOLOGIE MAPP

Véritable révolution dans le génie logiciel pour machines et équipements industriels, les modules préprogrammés et prêts à l'emploi « mapps » de B&R sont aussi simples à utiliser qu'une application de smartphone. Plus besoin d'écrire des lignes et des lignes de code pour développer un système de gestion des utilisateurs, de traitement d'alarmes ou de commande multiaxe : l'application se configure en quelques clics. Les algorithmes complexes sont tout aussi faciles à gérer, libérant ainsi les programmeurs qui peuvent se consacrer pleinement à l'optimisation du process.

02

—
01 Dans l'atelier, la robotique orientée machine fait dialoguer machines et robots en temps réel.

—
02 Les modules préprogrammés de B&R, ou « mapps », sont aussi simples d'emploi qu'une appli de smartphone.

Fini le calculateur et l'armoire de commande dédiés, tout comme le langage de programmation réservé aux roboticiens !

Cette coordination est assurée par des modules logiciels B&R préprogrammés, ou « mapps » →02, conçus pour mettre la réalisation d'applications robotisées à la portée des constructeurs de machines. Ainsi le mapp « Robotics » se charge-t-il des tâches classiques de contrôle-commande et de mise en service, mais aussi des fonctions évoluées comme la régulation anticipatrice ou la surveillance des compresseurs et de la surface de travail. De quoi bâtir des applications complexes et hautement dynamiques sans avoir à écrire une seule ligne de code : un énorme gain de temps pour le développement !

—

L'intégration de robots ABB aux solutions d'automatisation est assurée par des modules logiciels B&R préprogrammés.

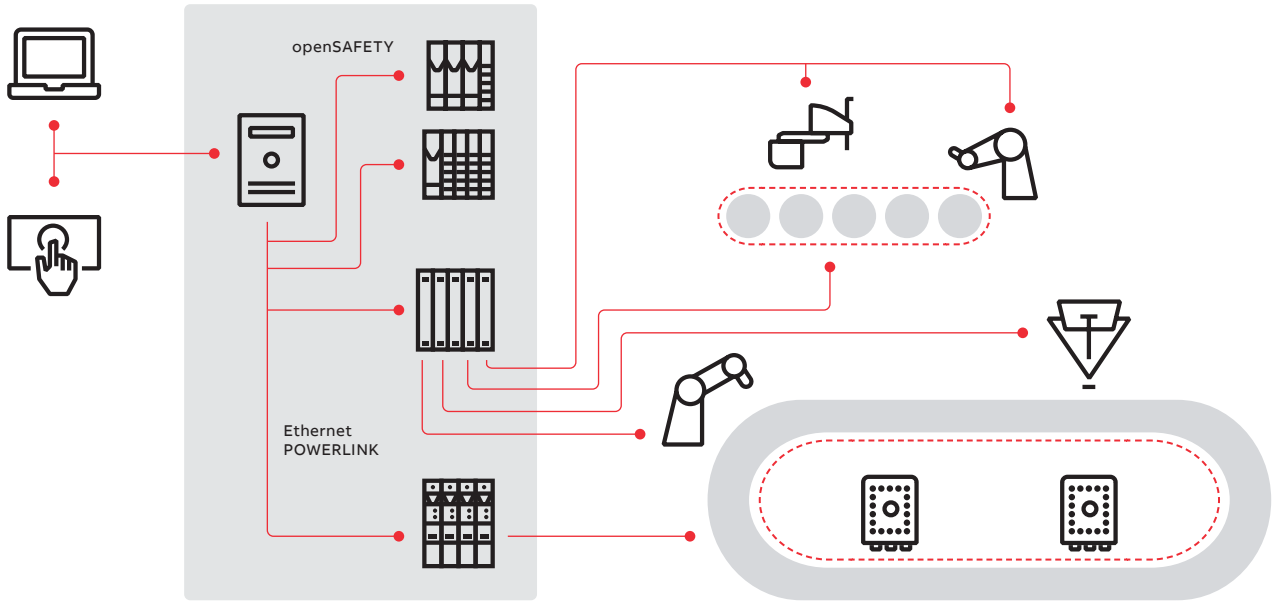
Deux domaines, un fournisseur

Cette offre convient parfaitement aux clients de B&R, et au premier chef, aux gros producteurs de machines. Et pour cause : l'intégration et la programmation d'un robot sont des opérations normalement très gourmandes en ressources, surtout pour les PMI. En effet, de nombreuses machines industrielles se caractérisent par des grandes vitesse et précision d'exécution qui rendent toute coordination en temps réel dur avec un dispositif externe ardue, voire impossible.

Sans compter que l'automaticien n'est généralement pas familier des outils et langages de programmation robotiques. Enfin, travailler avec un fournisseur tiers exige du temps et des moyens.

Autre atout de cette nouvelle solution : offrir aux constructeurs un guichet unique pour leurs applications de robotique et de commande de

03



04

—
03 Les clients de B&R bénéficient d'un large choix de robots ABB, proposés dans une grande variété de tailles et de charges utiles.

—
04 Le système B&R garantit une intégration machine-robot complète.

—
Bibliographie

[1] Okuma, T., « Editorial WR 2019 Industrial Robots », *International Federation of Robotics*, disponible sur : https://ifr.org/downloads/press2018/Editorial_WR_2019_Industrial_Robots.pdf.

—
Note

1) Acronyme de « Selective Compliance Articulated Robot Arm » désignant un robot à deux axes (X-Y) flexibles et un troisième axe (Z) rigide.

machines. Pour autant, les applications robotisées traditionnelles, comme le soudage automobile, continuent de relever des autres divisions Robotique du Groupe.

Deux sphères de compétence se distinguent clairement : si tout un procédé s'articule autour d'un robot (soudage, par exemple), c'est le champ de la robotique ABB ; si le robot ne joue qu'un rôle d'assistant (tri haute cadence de pièces défectueuses, par exemple), c'est le terrain d'action de la robotique orientée machine B&R.

Mise à l'épreuve

À chaque segment applicatif, un métier différent : la robotique orientée machine intéresse la clientèle privilégiée de B&R, à savoir les constructeurs de machines, quand les solutions axées robot ciblent davantage les intégrateurs de systèmes et utilisateurs finaux du Groupe. Les équipes B&R et ABB peuvent alors répondre aux besoins propres à chaque clientèle, tout en bénéficiant de cette synergie.

Les constructeurs de machines se verront proposer la large gamme de robots ABB →03 : bras articulés, robots SCARA[1], delta ou palettiseurs, dans une grande variété de tailles et de charges utiles.

—

Un pilote est à l'œuvre et les premiers robots intégrés sont attendus mi-2021.

Des caractéristiques fondamentales pour les applications exigeant une synchronisation très fine des machines avec d'autres équipements, comme dans la prise de pièces, par exemple. Les clients auront aussi un accès direct à des prestations complètes de conseil et d'assistance, en matière de robots comme de commande de machines. De son côté, B&R sera en première ligne pour proposer des solutions robotiques à des constructeurs de machines.

En un mot, la solution développée par les deux partenaires optimise la communication entre servomoteurs B&R et moteurs robotiques ABB →04. Reste à la tester.

Chaque robot va subir une campagne d'essais intensifs de fatigue pendant six mois. Objectif ? Garantir l'interopérabilité « zéro défaut » des robots, automatismes et systèmes d'entraînement des clients. Un pilote est d'ores et déjà à l'œuvre, et les premiers robots intégrés sont attendus mi-2021. •

MACHINES INTELLIGENTES

Une solution intégrant commande de machine et robotique

Sebastian Brandstetter, spécialiste de la robotique chez B&R, nous explique comment atteindre une précision inédite dans la synchronisation entre robot et commande de machine.

AR M. Brandstetter, quel est l'intérêt pour l'industriel d'intégrer des robots aux machines ?

SB J'y vois trois avantages. D'abord, un gain de flexibilité dans la conduite des machines. Ensuite, plus de simplicité dans l'exécution de certaines tâches. Enfin, plus de sécurité pour le personnel, ainsi déchargé des tâches dangereuses, fatigantes ou rébarbatives.

AR Reste-t-il encore beaucoup de procédés qui nécessitent la main de l'homme ?

SB Le nombre d'automatismes industriels a explosé au cours des trente dernières années. Pourtant, nombreuses sont les machines et les usines à faire intervenir l'humain à certaines étapes de la fabrication. Prenons l'exemple d'une cintreuse. On voit encore des opérateurs introduire les tôles dans la machine et les guider tout au long du pliage. C'est un travail très exigeant pour lequel il est de plus en plus difficile de trouver du personnel qualifié.

AR Une tâche toute trouvée pour le robot.

SB Exactement. Mais ce n'est pas tout : le robot peut aussi fournir un axe supplémentaire et accélérer ainsi le process. Sans oublier qu'une machine entièrement automatisée est capable de fonctionner en continu.

AR Pourquoi ne pas réaliser cette machine avec une solution robotique traditionnelle ?

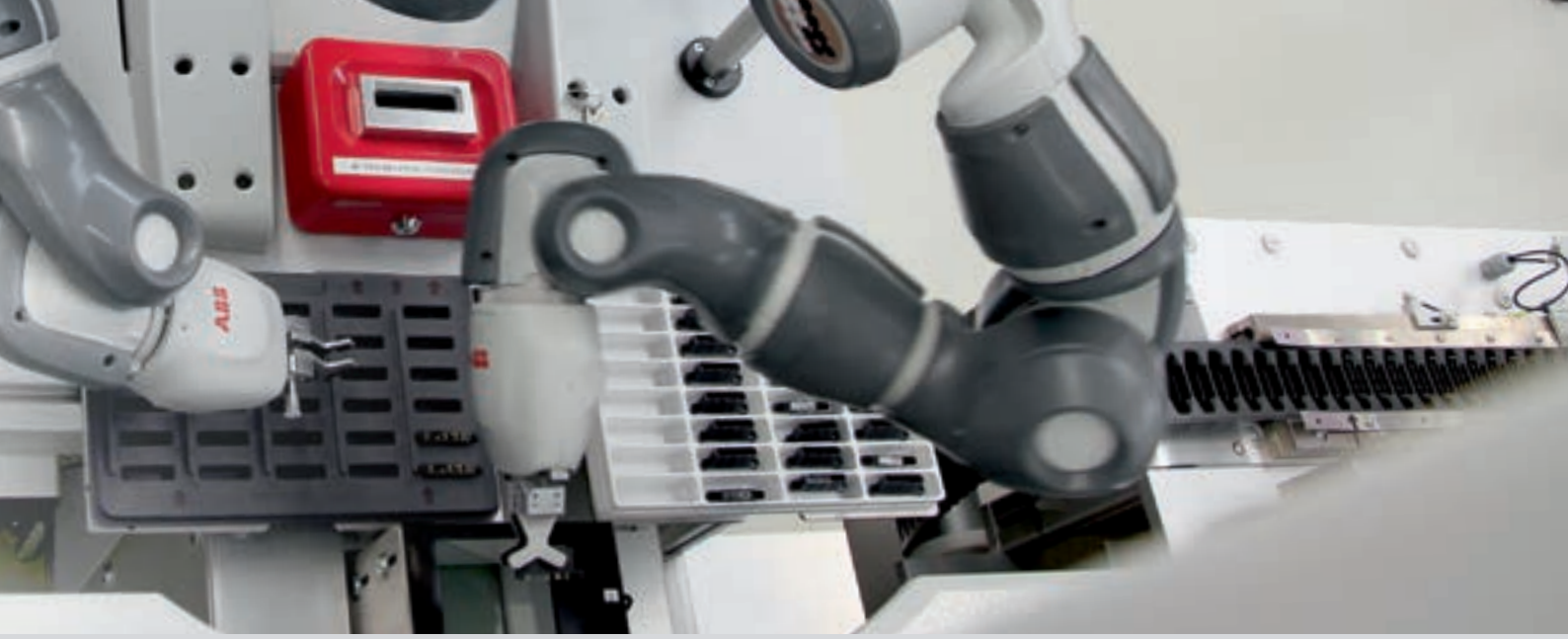
SB Ce n'est pas si simple. Les mouvements de la cintreuse et ceux du robot sont fortement imbriqués. Pour garantir la qualité du pliage, il faut que tous les axes communiquent en permanence. Cela n'est possible que si la robotique fait partie intégrante de la machine, avec une seule commande et une seule application.

> Investir dans la robotique a bien plus d'avantages qu'on ne le pense, y compris au plan de la sécurité des opérateurs.

AR Qu'entendiez-vous au début de notre entretien par « gain de flexibilité dans la conduite des machines » ?

SB En général, une machine de production est cantonnée à la fabrication d'un produit spécifique, quand ce n'est pas d'un modèle précis. Il faut parfois installer des systèmes mécaniques complexes pour, par exemple, acheminer les produits d'un niveau de la machine à un autre. Tout changement de caractéristiques du produit (taille, forme ou poids) oblige à régler, remplacer ou même revoir entièrement ces systèmes. Rien de tout cela avec un robot : il lui suffit de recalculer sa trajectoire, et la production redémarre !

AR Est-ce à dire que les robots amélioreraient la productivité de n'importe quelle machine ?



SB Je n'irais pas jusque là. Mais une chose est sûre : l'investissement dans une solution robotique est amorti bien plus vite qu'on ne le pense, y compris au plan de la sécurité des opérateurs.

AR Que voulez-vous dire ?

SB Prenons le cas d'une installation présentant de nombreuses pièces en mouvement rapide, comme une chaîne d'embouteillage. Toute bouteille défectueuse ou renversée doit être retirée de la production au plus vite. Si c'est un opérateur en bord de chaîne qui s'en charge, il faut ralentir la cadence pour sécuriser l'ouverture de la porte. Si c'est un robot, la machine peut continuer à fonctionner à plein régime.

AR Mais une machine intégrant un robot n'occupe-t-elle pas plus de place ?

SB Non, bien au contraire. L'intégration robotique réduit l'empreinte au sol de la machine puisqu'elle permet de s'affranchir de systèmes mécaniques complexes et donc volumineux. En outre, les robots peuvent être montés côte à côte ou au plafond pour gagner de la place. Enfin, quand la robotisation est couplée à un système de convoyage intelligent, le potentiel d'optimisation est encore plus important.

—

Le constructeur peut proposer des machines qui s'adaptent automatiquement aux produits à fabriquer.

Sebastian Brandstetter
Chef de produits
Robotique intégrée
B&R
Eggelsberg (Autriche)

AR Un exemple ?

SB Les navettes peuvent être commandées individuellement et synchronisées avec les mouvements du robot à la microseconde près. Il est possible d'exécuter certaines étapes du process pendant que les navettes se déplacent et de s'adapter aux changements de produits sans aucune modification matérielle. Le débit de production augmente dans un encombrement moindre.

AR Quel est la valeur ajoutée pour le constructeur de machines ?

SB Il peut proposer à ses clients une machine d'un tout nouveau genre, qui s'adapte automatiquement au produit à fabriquer, même si ce dernier n'était pas encore connu à la construction de la machine. De quoi répondre à une attente forte des consommateurs : des produits personnalisés au prix de la grande série. •

MACHINES INTELLIGENTES

L’intelligence artificielle explicable pour des machines dignes de confiance

Les machines peuvent-elles gagner notre confiance? À une condition : que l’intelligence artificielle cesse d’être une boîte noire et devienne « explicable ». Partant d’une rétrospective des travaux pionniers dans ce domaine, nous examinerons les développements actuels de la recherche dans ce secteur critique pour de nombreuses applications.

Jinendra Gugaliya
ABB Corporate Research
Process Automation
Bangalore (Inde)

jinendra.gugaliya@in.abb.com

K. Eric Harper
Ancien collaborateur ABB

Les modèles d’intelligence artificielle (IA) sont omniprésents dans notre quotidien, souvent à notre insu. Tel est le cas, par exemple, de l’algorithme du moteur de recommandation utilisé par Netflix : derrière sa simplicité apparente, il s’appuie sur l’apprentissage machine pour traiter les activités de l’utilisateur et prendre automatiquement des millions de décisions afin de lui suggérer de nouveaux films à regarder [1]. Facebook utilise un système breveté de vision par ordinateur capable de reconnaître les objets, logos et marques présents sur les photos postées par ses utilisateurs, permettant ainsi aux annonceurs d’afficher des messages publicitaires ciblés [2]. Outre la publicité et le divertissement, le Big data et l’apprentissage automatique s’immiscent dans des domaines aussi sensibles que la détection et le diagnostic de maladies, l’attribution de crédits bancaires ou les voitures autonomes. Autant d’applications susceptibles d’avoir un énorme impact sur nos vies. Car le film que vous regarderez demain n’a peut-être pas grande importance mais le prêt qui vous permettra d’acheter une maison, si ! On touche là au cœur du problème : si les chercheurs eux-mêmes peinent à expliquer le fonctionnement des modèles d’IA, comment les faire accepter au grand public ? Leur manque de transparence, ou d’« explicabilité », est pour le moment le principal frein à l’utilisation de tels modèles. Par ailleurs, avec le Règlement général sur la protection des données (RGPD), les entreprises font face à une plus grande exigence de clarté et de transparence dans le traitement des données et les algorithmes d’IA utilisés. Il faut donc expliquer le fonctionnement des modèles [3].

> Si les spécialistes des données ont déjà du mal à expliquer le fonctionnement de l’intelligence artificielle, comment la faire accepter au grand public ?

Que la décision soit prise par un humain ou par une machine, sa justification permettrait d’en comprendre la logique sous-jacente et de créer un

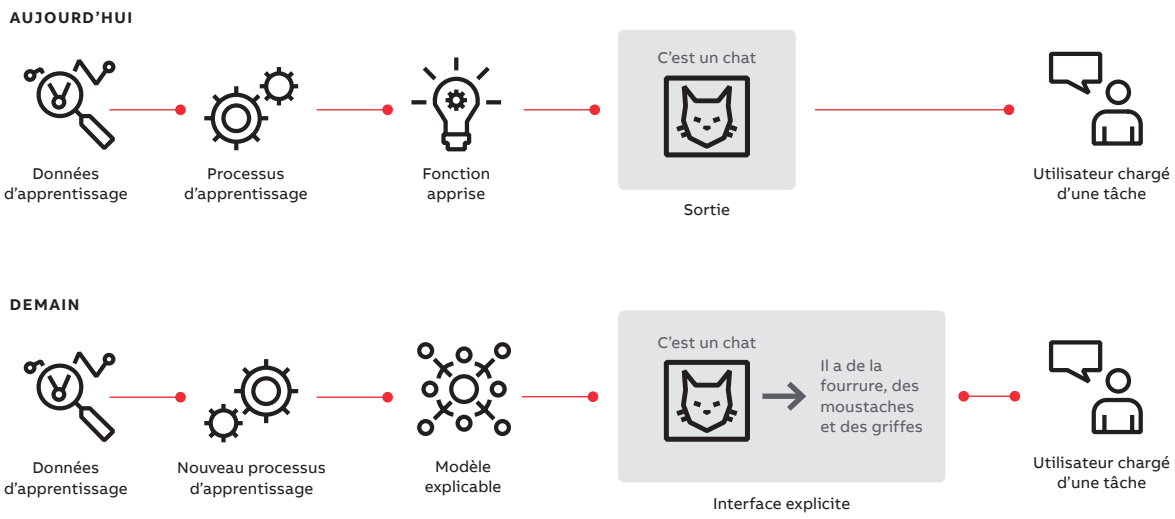
sentiment d'urgence, ce qui à son tour augmenterait la probabilité que les recommandations formulées soient acceptées et bel et bien suivies. Mais comment faire confiance à une machine que nous ne comprenons pas, et ce même si nous l'avons construite ? Les chercheurs ABB se sont donc plongés dans l'histoire de l'IA explicable pour voir en quoi le passé pouvait éclairer le développement futur de cette technologie.

Premiers pas

Les travaux réalisés dans ce domaine sont motivés par une exigence simple : pouvoir justifier les diagnostics posés par la machine. Dans les années 1980, Westinghouse, associé à l'université Carnegie Mellon, a inventé et commercialisé le premier système expert d'aide à la décision tourné vers l'opérationnel [4]. L'un des auteurs de cet article, K. Eric Harper, a directement participé aux projets GenAID, TurbinAID et ChemAID sur le diagnostic par IA ; sa

Les chercheurs ABB ont creusé dans le passé de l'IA explicable pour éclairer le futur de cette technologie.

contribution aux progrès du génie logiciel, du traitement des informations et de la gestion des connaissances a donné lieu à une méthode brevetée [5] de diagnostic des anomalies d'un système d'exploitation, fondée sur des preuves et l'usage des meilleures pratiques. Des brevets ultérieurs déposés par Westinghouse [6] décrivent une méthodologie visant à exploiter de A à Z une base de connaissances afin de confirmer que des données anormales en entrée génèrent les résultats attendus [6]. C'est encore à K. Eric Harper que l'on doit les outils et techniques qui ont permis d'explorer les connaissances et de



01

cartographier les interventions du support afin de justifier chaque action par un diagnostic. Ce brevet fondateur, tombé dans le domaine public, n'a rien perdu de sa pertinence aujourd'hui [7].

Dernières innovations

Un grand cabinet de conseil en logiciel a récemment suggéré de créer un modèle qui s'appuierait sur une représentation des connaissances. Sa demande de brevet propose d'associer des techniques comme le partitionnement en k-moyennes, l'analyse en composantes principales, le chaînage avant ou arrière, et la logique floue afin d'expliquer les résultats générés par une IA dans le monde réel [8]. L'agence de notation de crédit FICO a recours à une méthode différente : elle fait tourner à fond ses modèles en modifiant à chaque fois les données d'entrée. Le but est de montrer aux clients en quoi ces changements font varier les réponses en sortie, et de leur permettre ainsi de comprendre les choix opérés [9]. Intel, de son côté, décrit dans sa demande de brevet une technique pour identifier les écarts entre les résultats observés pendant la phase d'entraînement de la machine et ceux obtenus en exploitation [10]. Un autre brevet Intel s'intéresse à l'influence des réseaux neuronaux sur l'IA explicable : dépendances, solidité du support entre les couches inférieure et supérieure du réseau jusqu'aux caractéristiques des entrées… le processus ressemble étonnamment à un système expert à chaînage avant [11]. Google combine ces idées à ses propres outils et protocoles [12], tandis qu'IBM a mis au point une plate-forme semblable [13].

Tendances et perspectives

Bénéficiant du regain d'intérêt des chercheurs, l'IA se décline en plusieurs niveaux d'explicabilité, de l'opacité complète (« boîte noire ») à la transparence totale (« boîte blanche ») [14]. Ainsi distingue-t-on :

- des systèmes opaques ;
- des systèmes compréhensibles ;
- des systèmes interprétables.

Même si l'IA explicable apporte de nombreux avantages, les surcoûts induits par cette technologie ne sont pas négligeables. Chaque application doit donc trouver un juste milieu entre explication et exactitude, en fonction des besoins métiers, du niveau de transparence exigé et de son adoption dans le monde réel.

> Chaque application d'IA explicable doit trouver un juste milieu entre explication et exactitude.

La logique qui préside aux décisions des modèles d'apprentissage automatique est complexe et loin d'être évidente. En l'absence de gouvernance, comment se fier à l'IA pour prendre des décisions capitales ? Cette crainte ne date pas d'aujourd'hui ; les réseaux de neurones développés pour le diagnostic machine dans les années 1980 en ont fait les frais. C'est pourquoi l'explicabilité de l'IA devient de plus en plus importante dans certains domaines. Les modèles doivent pouvoir subir une vérification formelle, un aspect crucial dans le domaine médical où les recommandations de l'IA peuvent sauver un patient… ou signer son arrêt de mort !

Autre grief à l'encontre des modèles d'apprentissage automatique, qui freine leur acceptation : leur biais

intrinsèque si, par exemple, les données d'apprentissage ne couvrent pas la totalité de l'espace de solution [15]. Il est possible de mettre en évidence ce type de biais en multipliant les tests dans toutes sortes de conditions afin d'évaluer les points forts et faibles de la solution.

Pour autant, l'IA explicable ouvre des perspectives inédites. L'entraînement des modèles d'apprentissage automatique s'appuie aujourd'hui sur des millions d'exemples, ce qui leur permet de détecter des schémas qui échappent au cerveau humain. Le rêve initial de Westinghouse n'a jamais été aussi proche de la concrétisation : les ingénieurs pourront bientôt déverser les flots de données collectées par des modèles comme GenAID, les soumettre au crible de l'analytique et ainsi alimenter l'innovation. L'intelligence artificielle explicable a déjà apporté de nouveaux éclairages. Les connaissances issues de l'apprentissage automatique peuvent faire évoluer nos perceptions ; c'est ainsi que les joueurs de go[1] utilisent aujourd'hui de nouvelles stratégies mises au point par l'IA [18].

Il n'en reste pas moins que les entreprises n'aiment guère l'idée d'une aide à la décision opaque. Une banque doit évidemment motiver un refus de crédit.

Les modèles d'apprentissage automatique s'appuient sur des millions d'exemples pour reconnaître des schémas qui échappent au cerveau humain.

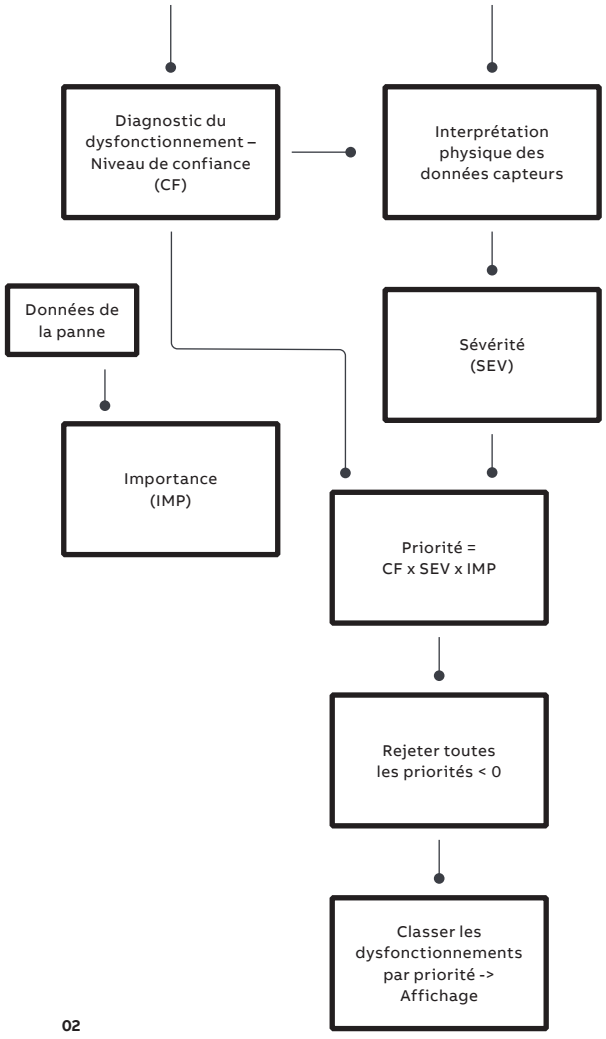
Les modèles d'IA doivent aussi pouvoir justifier du respect de la législation dans leurs prises de décision. →03.

Face à la multiplication de ces craintes, l'Union européenne a édicté un « droit à l'explication », qui autorise chaque utilisateur à demander le raisonnement justifiant la décision de l'algorithme à son égard. On espère que l'IA explicable offrira aux entreprises le niveau de confiance, d'équité et de sécurité indispensable à l'adoption de l'apprentissage automatique en situation réelle [16] →01.

État de l'art

Deux voies s'offrent aujourd'hui pour rendre les modèles d'IA plus explicables. La première consiste à sélectionner d'emblée les structures du modèle qui en faciliteront l'interprétation. La seconde applique la rétro-ingénierie à des modèles complexes pour les rendre compréhensibles. Tout est affaire de compromis : un modèle facile à comprendre risque de manquer de précision, tandis que les réseaux de neurones profonds, par exemple, sont précis mais pèchent par déficit de transparence. Les algorithmes de régression linéaire ou les arbres de décision, par exemple, sont bien plus faciles à expliquer mais moins précis. C'est là un équilibre subtil que les chercheurs s'emploient actuellement à trouver [17].

Un autre aspect de la recherche en IA explicable s'intéresse à la différence entre interprétabilité « locale » et « globale ». La perspective locale, inspirée du principe de l'analyse de sensibilité, identifie en quoi la sortie du modèle change en fonction des modifications des données ou des paramétrages en entrée. Même si elle n'explique pas directement la valeur de la fonction, l'analyse de sensibilité peut mettre en évidence les facteurs et configurations qui expliquent les résultats. La perspective globale, pour sa part, repose sur deux techniques : la rétropropagation et la détection d'intrusion. La rétropropagation (LRP) est une méthode de redistribution de la fonction de pertinence depuis la couche extérieure



02

01 L'intelligence artificielle explicable ouvre les « boîtes noires » pour exposer le raisonnement sous-jacent, comme dans ce modèle mis au point par FICO.

02 Procédure d'aide à la prise de décision, inspirée du brevet [23]. Les principaux facteurs entrant en ligne de compte sont le niveau de confiance dans le diagnostic (CF), la sévérité de la défaillance (SEV) et son importance (IMP).

Note

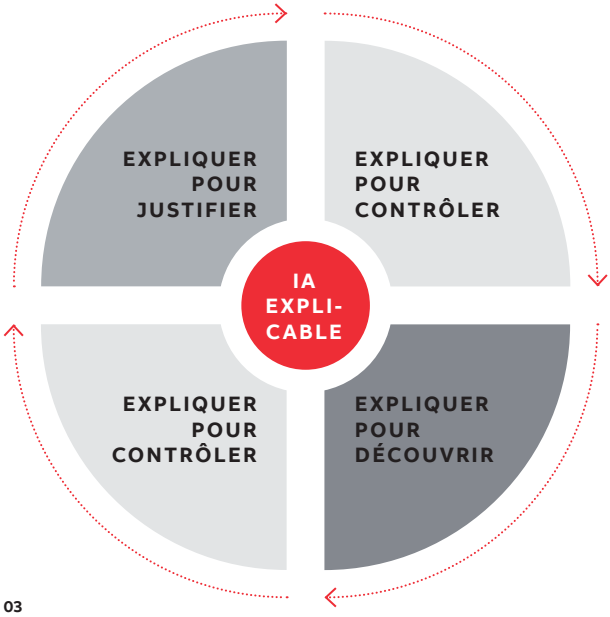
1) Jeu de stratégie opposant deux adversaires qui placent à tour de rôle des pierres noires et blanches sur les intersections d'un plateau quadrillé.

du réseau de neurones jusqu'à la couche d'entrée. Les décisions, ainsi expliquées par décomposition, peuvent être illustrées par une carte de densité [19]. Les systèmes de détection d'intrusion (IDS) alimentés par les données recherchent les modifications minimales (des caractéristiques d'entrées) qui suffisent à identifier comme tels n'importe quel jeu

ABB puise dans les dernières avancées de l'IA pour aider ses clients à améliorer la maintenance prédictive, et doper la performance industrielle.

d'échantillons mal classés. L'ampleur des modifications permet de visualiser les caractéristiques les plus pertinentes susceptibles d'expliquer l'erreur de classement. Les chercheurs ont combiné ces deux méthodes pour visualiser la manière dont des IA ayant bénéficié d'un apprentissage par renforcement approfondi jouaient à des jeux Atari [20].

Le périmètre des recherches en IA explicable s'est élargi aux comparaisons de jeux de données. Des résumés linguistiques associant forme prototypique et logique floue servent à concevoir un système capable de comparer numériquement plusieurs jeux de données et d'en expliquer les différences en langage naturel [21]. L'utilisabilité étant un critère



03

04

essentiel dans la conception et l'utilisation des modèles d'IA explicable, l'association homme-machine est au centre des recherches. L'utilisateur devrait pouvoir régler le modèle d'apprentissage automatique de manière interactive, en fonction des résultats des itérations successives [22].

Approche pratique de l'aide à la décision

Les sciences de l'ingénieur nous apprennent que la résolution de tout problème complexe consiste à diviser la tâche en multiples sous-tâches, à exécuter et à vérifier chacune d'elles indépendamment, avant de les intégrer pour obtenir une solution complète. Dans les années 1980, Westinghouse a inventé un système de gestion d'actifs et d'aide à la décision explicable →02 pour définir les priorités de réparation des équipements. Après validation des mesures du terrain et injection des conditions en cours dans le système, ce dernier propose un diagnostic et des recommandations. Un grand fabricant de matériel électrique utilise toujours ce système pour la surveillance sur site et le diagnostic des centrales électriques et des turbo-alternateurs [24]. Les problèmes potentiels sont classés selon trois paramètres fondamentaux :

- Le niveau de confiance d'un diagnostic (CF) ;
- La réciproque du temps jusqu'à la défaillance, ou « sévérité » (SEV) ;
- Les coûts liés à la défaillance et à la réparation des dommages maximaux endurés, ou « importance » (IMP).

On calcule ces trois paramètres pour chacun des capteurs, composants et systèmes qui contribuent à un dysfonctionnement ou une panne. On en déduit alors l'action prioritaire pour chaque dysfonctionnement possible. La logique de ce classement peut être expliquée au client puisque l'on retrouve ces paramètres ainsi que les détails du diagnostic dans les relevés des capteurs et des composants incriminés.

05

06

—
03 L'IA explicable facilite la compréhension, et donc l'acceptation, des décisions. Les capacités à découvrir, à contrôler et à justifier sont liées entre elles.

—
04 ABB estime que l'IA a un énorme potentiel pour l'industrie et l'utilise donc dans de nombreux domaines. Ici, au cours d'une analyse, une ingénieure relève les motifs d'intérêt qui pourront servir à entraîner un classifieur à base de réseaux de neurones récurrents.

—
05 Intégrer une IA explicable aux diagnostics des capteurs aide les opérationnels à comprendre et à accepter les actions prescrites.

—
06 Les clients profitent des atouts de l'IA explicable sans avoir besoin de comprendre le détail des calculs qui ont débouché sur la décision.

En intégrant l'IA explicable dès la conception des applications, ABB favorise une indispensable transparence.

Le client accepte ainsi plus facilement ce verdict sans ressentir le besoin d'en connaître tous les détails.

Et ABB ?

Quand la puissance de calcul était comptée, dans les années 1980, les solutions d'automatisation étaient prévues pour exploiter le meilleur de ressources limitées. Aujourd'hui, il est possible de calculer indépendamment chaque caractéristique définie à l'origine, avec la plus fine granularité, puis de les assembler en fonction de leurs relations et dépendances. Mettre à profit les connaissances et processus tirés des expériences passées pour en faire bénéficier ses solutions d'automatisation est un des domaines d'excellence d'ABB. Le Groupe dispose aujourd'hui d'une large gamme de solutions de suivi d'état qui signalent la probabilité de défaillance d'un actif, assortie d'un indice de confiance →04–06. Cette offre, adossée à la plate-forme de services de cloud ABB Ability™, apporte des éléments de réponse à une question épineuse : quand se produira la prochaine défaillance ? Grâce à ses talentueux ingénieurs et spécialistes de l'information, ABB développe des solutions qui s'appuient sur la science des données pour calculer si nécessaire les trois paramètres CF, SEV, IMP. Par sa conscience aiguë des coûts de réparation après panne, ABB a su mettre les données au service du diagnostic et développer de nouveaux services numériques sous la bannière Ability™.

Pionnier et grand nom de l'automatisation industrielle, le Groupe puise dans les dernières avancées de l'IA pour aider ses clients à améliorer la maintenance prédictive, optimiser les procédés et doper la performance des actifs. Pour que cette vision devienne réalité, il faut que les responsables et opérateurs de production comprennent ce qui motive et justifie les décisions émanant des modèles d'IA, et acceptent les préconisations des applicatifs d'exploitation ou de maintenance, avant d'engager des actions potentiellement coûteuses →05. En intégrant l'IA explicable à ses applications dès leur conception, ABB se distingue de la concurrence et promeut une culture de transparence, plus que jamais cruciale. Un modèle explicable offre à tous ses usagers, qu'ils soient spécialistes ou simples utilisateurs, la garantie de résultats pertinents, non biaisés et sûrs, dans le respect de la loi et de l'éthique.

Bibliographie

[1] Code Academy, «Netflix Recommendation Engine », disponible sur : https:// www.codecademy.com/ (consulté le 5 mai 2020).

[2] Razaaq, A., «Facebook's New Image Recognition Algorithm Can Scan your Picture for Advertising Opportunities », *B2C Business to Community,* 21 mai 2019, disponible sur : https://www. business2community.com/ (consulté le 5 mai 2020).

[3] Woodie, A., « Opening Up Black Boxes with Explainable AI », *datanami,* 30 mai 2018, disponible sur : https:// www. datanami.com/ (consulté le 5 mai 2020).

4] Thompson, E. D., *et al.*, « Process Diagnosis System (PDS) – A 30 Year History », *Proceedings of the 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence,* p. 3928-3933, disponible sur : https://dl.acm.org/ doi/10.5555/2888116. 2888260, janvier 2015 (consulté le 5 mai 2020).

[5] Thompson, T., *et al., Methods and apparatus for system fault diagnosis and control,* brevet américain n° 4 649 515, 10 mars 1987.

[6] Harper, K. E., *et al., Expert system tester,* brevet américain n° 5164912, 17 novembre 1992.

[7] Lizar, Y., *et al.*, « Implementation of Computer Damage Diagnosis by Expert System Based Using Forward Chaining and Certainty Factor Methods », *International Journal of Scientific & Technology Research,* vol. 8, n° 6, juin 2019, p. 141-144, disponible sur : http:// www. ijstr.org/ (consulté le 5 mai 2020).

[8] Li, C.-S., *et al., Explainable Artificial Intelligence,* demande de brevet américain n° 20190244122, 8 août 2019.

[9] FICO, « How to Make Artificial Intelligence Explainable: A new Analytic Workbench », *FICO/blog,* 13 septembre 2018, disponible sur : https:// www.fico. com/blogs/ (consulté le 5 mai 2020).

[10] Anderson, G., *et al., Misuse Index for Explainable Artificial Intelligence in Computing Environments,* demande de brevet américain n° 20190197357, 27 juin 2019.

[11] Doshi, K., *Mapping and Quantification of Influence of Neural Network Features for Explainable Artificial Intelligence,* demande de brevet américain n° 20190164057, 30 mai 2019.

[12] GoogleCloud, « Explainable AI : Comprenez les enjeux de l'IA et instaurez la confiance », disponible sur : https://cloud.google.com/ (consulté le mardi 5 mai 2020).

[13] Mojsilovic, A., « Introducing AI Explainability 360 », IBM Research Blogs, 8 août 2019, disponible sur : https:// www.ibm.com/ blogs/ (consulté le 5 mai 2020).

[14] Doran, D., *et al.*, « What does explainable AI really mean? A new Conceptualization of Perspectives », 2 octobre 2017, disponible sur : https://arxiv.org/ abs/1710.00794 (consulté le 5 mai 2020).

[15] Mehrabi, N., *et al.*, « A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning », prépublication sur la base de travaux financés par la DARPA, 17 septembre 2019, disponible sur : https:// arxiv.org/abs/1908.09635 (consulté le 5 mai 2020).

[16] Miron, M., « Interpretability in AI and its relation to fairness, transparency, reliability and trust », projet européen HUMAINT, 4 septembre 2018, disponible sur : https://ec.europa.eu/ jrc/communities/en/ community/humaint (consulté le 5 mai 2020).

[17] Murdoch, W.J., *et al.*, « Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 116, n° 44, p. 22071-22080, 29 octobre 2019, disponible sur : https:// www.pnas.org/ (consulté le 5 mai 2020).

[18] Adadi, A., Berrada, M., « Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI) » *IEEE Access,* vol. 6, p. 52138-52160, 17 septembre 2018, disponible sur : https://ieeexplore.ieee. org/document/8466590 (consulté le 5 mai 2020).

[19] Samek, W., *et al.*, « Evaluating the Visualization of What a Deep Neural Network Has Learned », *IEEE Transactions On Neural Networks and Learning Systems,* vol. 28, n° 11, p. 2660-2673, novembre 2017 (extrait), disponible sur : https://ieeexplore. ieee.org/abstract/ document/7552539 (consulté le 5 mai 2020).

[20] Jo, H., Kim, K., « Visualization of Deep Reinforcement Learning using Grad-CAM: How AI Plays Atari Games? », *IEEE Conference on Games,* 23 août 2019, disponible sur : https://ieeexplore.ieee. org/document/8847950 (consulté le 5 mai 2020).

[21] Jain, A., *et al.*, « Explainable AI for Dataset Comparison », *IEEE International Conference on Fuzzy Systems,* 26 juin 2019, disponible sur : https://ieeexplore.ieee. org/document/8858911 (consulté le 5 mai 2020).

[22] Kirsch, A., « Explain to whom? Putting the User in the Center of Explainable AI », *Proceedings of the 1st International Workshop on Comprehensibility and Explanation in AI and ML,* Bari (Italie), 2017, disponible sur : https:// hal.archives-ouvertes.fr/ hal-01845135/ (consulté le 5 mai 2020).

[23] Bellows, J. C., *et al., Automated system to prioritize repair of plant equipment,* brevet américain n° 5132920, 21 juillet 1992.

[24] Becerra-Fernandez, I., Sabherwa, R., « Knowledge Application Systems: Systems that Utilize Knowledge », *Knowledge Management: Systems and Processes,* 2e édition, New York : Routledge, 2015, p. 3-105.

Crédit photo : Константин Чимбай/stock.adobe.com

MACHINES INTELLIGENTES

Une fabrication par lot au top grâce à l'analytique

Les procédés de fabrication par lot, dynamiques et non linéaires par excellence, sont aussi agiles que complexes. La solution ABB Ability™ BatchInsight a pour mission d'en détecter rapidement les anomalies et d'isoler les variables du procédé qui permettront de gagner en conformité produits, en optimisation énergétique et en productivité.

—
01 L'exploitation des données massives dans les procédés semi-continus promet des gains de productivité et d'efficacité énergétique.
—

Martin Hollender
Benedikt Schmidt
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

martin.hollender@de.abb.com
benedikt.schmidt@de.abb.com

Chaojun Xu
ABB Industrial Automation, Energy Industries
Mannheim (Allemagne)

chaojun.xu@de.abb.com

Moncef Chioua
Département de génie chimique
École Polytechnique de Montréal (Canada)

Les moteurs de traitement distribué du Big data, tels Hadoop ou Spark, offrent de nouvelles possibilités d'analyse et d'exploitation des historiques de production continue [1–2]. La maintenance prédictive, le soutien opérationnel, l'instrumentation numérique dédiée à la surveillance et à la conduite de procédé, ainsi que la gestion de production ERP comptent parmi les couches de la pyramide industrielle visées par ces nouvelles infrastructures de traitement rapide des données massives.

Les perspectives de progrès sont immenses dans ce domaine, tout particulièrement pour l'industrie des procédés semis-continus ou batch →01. C'est pourquoi ABB a fait équipe avec les utilisateurs expérimentés d'un site client pilote afin de développer un système capable de déceler très tôt les anomalies d'un lot en fabrication et de les corriger en temps réel pour lisser et optimiser la production : ABB Ability™ BatchInsight.

01

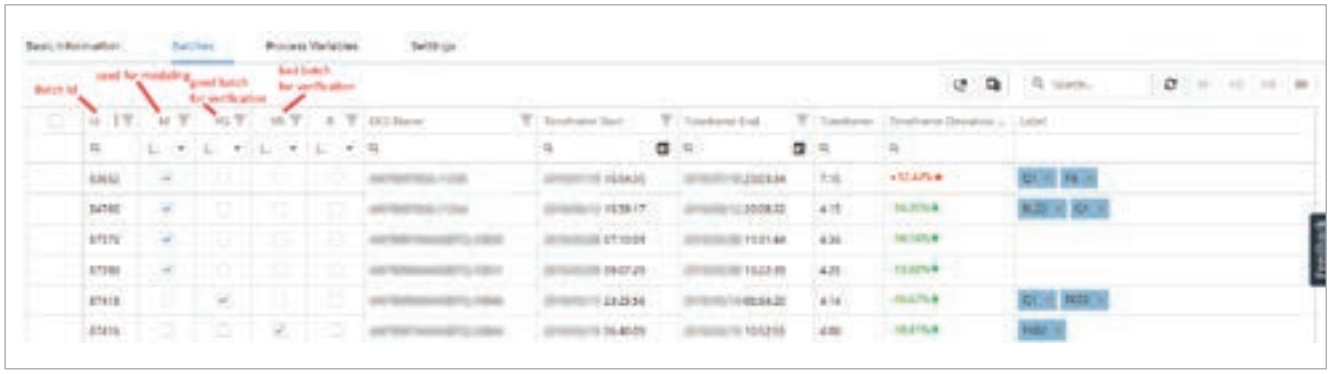
La solution ABB s'appuie sur les historiques de production pour en déduire le comportement attendu du procédé en conditions nominales de fonctionnement et bâtir un modèle statistique de lot qui servira de référentiel de qualité et de productivité. Tout écart par rapport à cet optimum déclenche une alarme opérateur.

Scénario applicatif

Quelque 300 lots exécutés sur une période de plus de deux ans ont permis de construire un modèle optimal du procédé.

La première étape de l'analyse a consisté à distinguer les « bons » des « mauvais » lots.

02



03

04

Écart de toutes les variables (vert foncé) et d'une variable donnée (vert clair)

Contribution à l'écart par variable

Évolution temporelle d'une variable process (PV) donnée : comparaison du lot analysé (bleu) au lot de référence (gris)

—
02 Écran de dialogue ABB Ability™ BatchInsight pour l'étiquetage des lots de fabrication

—
03 Éditeur de modèles

—
04 Contributions à l'écart par variable et dans le temps

Un exercice souvent plus subtil qu'il n'y paraît ! Et pour cause : un lot peut par exemple mal commencer, puis rentrer dans l'ordre grâce à l'intervention de l'opérateur pour retrouver le chemin de la qualité et du tempo exigés. Ce lot est alors décrété « bon » par l'usine, mais « mauvais » par l'outil d'apprentissage machine puisque, sans action opérateur, il y aurait eu problème de fabrication. Et l'affaire se corse si l'opérateur intervient pour une raison qui n'a rien à voir avec le comportement potentiellement indésirable du procédé. D'ordinaire, l'exploitant sait clairement ce qui se passe sur la chaîne, mais a posteriori,

—

ABB Ability™ BatchInsight intègre un modèle détaillé de lot conforme ISA88.

c'est-à-dire hors production, il est souvent bien moins évident de comprendre le pourquoi du comment des courbes de tendance. Or c'est précisément sur cette information contextuelle que s'appuient les outils analytiques du Big data. D'où l'importance de développer un système pour enregistrer ces données, mais aussi de rallier et former les opérateurs à son bon usage.

La figure →02 illustre un écran BatchInsight permettant d'étiqueter le lot selon divers critères, qui s'affichent dans une bannière facilement extensible. Notre exemple en contient quatre (durée, qualité et exécution du lot, équipe en poste), suivis de leurs étiquettes respectives. Le critère sélectionné apparaît en bleu. Cet écran de dialogue peut s'ouvrir à n'importe quel niveau de l'exécution. Il est aussi possible d'automatiser l'étiquetage à l'aide de scripts. En phase d'analyse, les étiquettes seront très précieuses pour déterminer les lots servant à construire le modèle.

Un éditeur permet de sélectionner les lots historiques appropriés pour réaliser le modèle optimal →03. De même, on peut utiliser les lots reconnus « bons » ou « mauvais » aux fins de vérification pour s'assurer que le modèle est d'une qualité suffisante.

Alignement de lots
ABB Ability™ BatchInsight intègre un modèle détaillé de lot, conforme aux spécifications ISA88, dans lequel sont horodatés le début et la fin de chaque exécution de lot et phase. Les durées diffèrent d'un lot à l'autre. La technique de déformation temporelle DTW (« dynamic time warping ») permet d'élargir ou de condenser les jeux de données afin de les comparer sans perdre ni modifier leur dynamique.

Autre possibilité : obtenir un indice, issu d'un calcul de similarité entre lots, pour le comparer à une valeur de référence. Cette méthode de regroupement a l'avantage d'affiner et d'optimiser l'analyse : si un groupe de lots affiche les mêmes types d'anomalies, le diagnostic peut alors se limiter à un sous-ensemble de ces lots. De quoi idéalement dissocier les bons des mauvais.

Réduction de dimension
Si la méthode précédente permet de distinguer les lots similaires au lot de référence (nominal ou sain), il faut plus de détails pour discerner et diagnostiquer les lots défectueux. On utilise pour cela une analyse en composantes principales particulière, ou « ACP multiway » [3], qui se concentre sur les variables du procédé expliquant statistiquement les changements constatés entre lots. Cette analyse en ligne permet de détecter très tôt l'évolution anormale d'un lot en cours de fabrication.

Contrôle qualité
La production batch a pour mission première de garantir l'obtention de la qualité recherchée. Pour cela, l'usage dans l'industrie est de prélever plusieurs échantillons du lot au cours de sa fabrication pour analyse en laboratoire. L'opérateur s'appuie ensuite sur les résultats de l'analyse pour régler les variables process et la durée du lot en conséquence.

La régression des moindres carrés partiels (PLS) est une méthode de réduction de dimension linéaire permettant l'analyse statistique de jeux étendus de données multivariées fortement corrélées. En suivi de qualité batch, on utilise une variante de modèle « multiway », dite MPLS, qui met en relation la qualité du lot et les variables process.

En faisant office de capteur logiciel inférentiel, elle contribue à combler une lacune majeure de la production continue : le manque de mesures qualité fiables en ligne. Cette méthode est en outre capable de prédire les mesures des heures avant de les recevoir du laboratoire ! Une bonne façon de réduire les temps d'attente et d'améliorer le taux d'engagement des actifs.

Creuser dans les détails

Après avoir détecté un écart important par rapport au modèle de lot optimal, BatchInsight l'affiche à l'écran →04. À la différence d'une analyse univariée, l'analyse multivariée permet de prendre en compte les corrélations entre variables.

Assister l'expert

Les procédés batch peuvent être complexes, même pour les spécialistes du domaine : il leur faut identifier les lots bons ou mauvais, repérer les variables process pertinentes pour l'analyse statistique, puis affiner les réglages. ABB Ability™ BatchInsight offre pour cela des techniques innovantes qui facilitent la préparation de l'analyse, notamment avec l'identification automatique des variables utiles, aux différentes phases du procédé, et la suggestion automatique des lots à utiliser pour les modèles ACP multiway et MPLS. BatchInsight joue ici le rôle de « préconisateur » visant à libérer l'expert de ces tâches pour lui permettre de se concentrer sur l'essentiel de l'analytique →05.

BatchInsight permet de corriger en dynamique les lots hors spécifications.

Surveiller en ligne

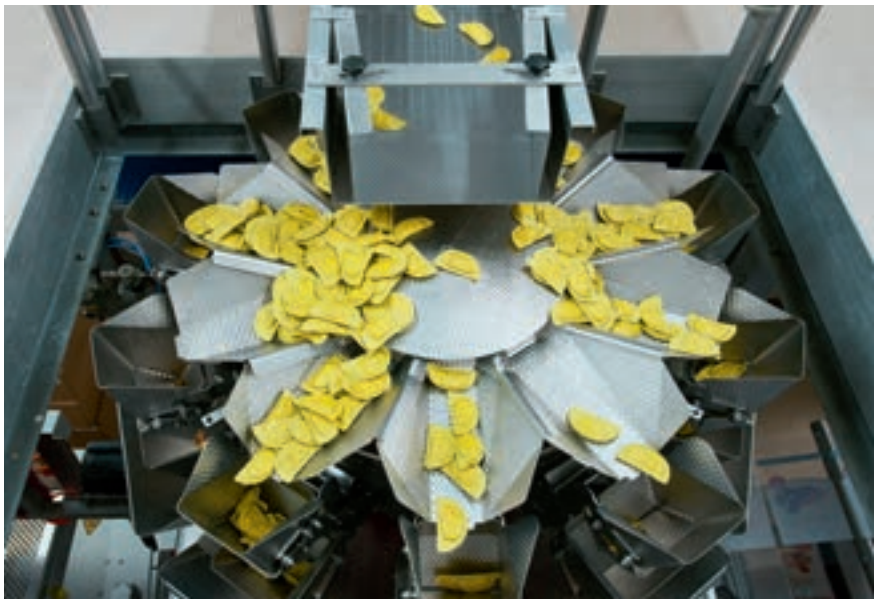
Grâce à des algorithmes d'alignement, ABB Ability™ BatchInsight permet de corriger en dynamique les lots déviant de la trajectoire assignée →06 et de visualiser les variables clés du process situées dans un couloir dérivé des précédents lots de référence. Enfin, on peut utiliser des indicateurs clés de performance statistiques calculés d'après l'analyse multivariée pour déclencher des alarmes. Reste une difficulté fréquente de la surveillance en ligne de la fabrication semi-continue : savoir où en est le process.

05

Satisfecit

La solution a été testée chez un client chimiste à l'aide d'historiques de production émulant une « approche en ligne », autrement dit avec des données de lot disponibles uniquement pour l'étape en cours. Un modèle d'analyse en ACP multiway a permis de détecter la formation de mousse sur une fraction des lots. Sachant que l'entraînement du modèle s'était fait uniquement sur des lots dépourvus de mousse, BatchInsight a été capable dans 83 % des cas de prédire le défaut au moins 5 minutes avant son apparition… voire des heures à l'avance ! Restent 17 % des prédictions qui, pour s'avérer fausses, n'en sont pas moins très utiles à l'opérateur pour cibler les lots suspects.

Crédit photo fig. 05 : vdeineka/stock.adobe.com



06

—
05 ABB Ability™ BatchInsight se chargeant du gros de l'analyse, l'expert peut se focaliser sur l'essentiel.

—
06 BatchInsight améliore le procédé par une correction dynamique des lots hors spécifications.

Dans 83 % des cas, BatchInsight a su prédire le défaut au moins 5 minutes avant son apparition.

Rester en piste

ABB Ability™ BatchInsight est un puissant logiciel d'assistance opérationnelle en ligne, développé et validé par le Groupe dans le cadre d'un partenariat. Cet outil, qui permet de détecter en amont les anomalies du procédé et d'isoler les variables process incriminées, est très apprécié des opérateurs confrontés au parallélisme des fabrications, voire au travail multitâche au sein d'un même atelier. Face à une situation anormale, BatchInsight alerte l'exploitant en charge du lot et lui permet de réagir à point nommé, en ajustant la bonne variable. Une voie toute tracée pour diminuer le nombre de produits hors spécification, économiser l'énergie et limiter les arrêts de production. •

—
Bibliographie

[1] Otten, W., « Industrie 4.0 und Digitalisierung », *atp magazin,* vol. 58, n° 1–2, p. 28–32, 2016.

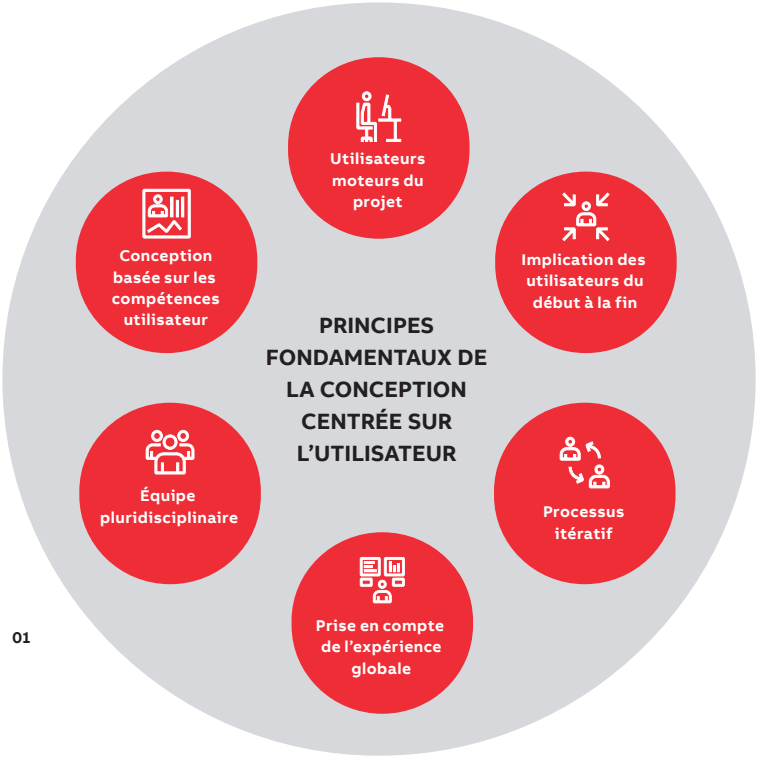
[2] Nimmo, I., «Operator Effectiveness and The Human Side of Error », *CreateSpace,* 2015.

[3] Atzmueller, M., *et al.*, « Big data analytics for proactive industrial decision support », *atp magazin,* vol. 58, n° 9, p. 62–74, septembre 2016.

MACHINES INTELLIGENTES

Technologies à visage humain

Les technologies ainsi que les capacités de connexion et de traitement de données progressent à un rythme fulgurant, mais la performance brute n'est que la face émergée de l'iceberg. En effet, le plus grand des progrès restera lettre morte si l'être humain n'est pas en mesure d'en exploiter tout le potentiel. C'est pourquoi ABB place l'expérience utilisateur et l'expérience client au cœur du cycle de conception de ses produits et services.



01

Marjukka Mäkelä
UX design
ABB Digital
Helsinki (Finlande)

marjukka.makela@fi.abb.com

En théorie, l'ordinateur se veut le prolongement du cerveau humain : le transfert des idées, des informations et des commandes doit donc se faire de la manière la plus fluide et la plus simple possible. On attend d'une interface qu'elle soit d'un usage naturel et intuitif, et qu'elle permette à l'utilisateur d'apprendre et de maîtriser ces nouveaux outils et fonctions en y consacrant le minimum de temps et d'effort.

L'équipe de spécialistes en interface utilisateur d'ABB, qui s'est notablement étoffée ces dernières années, est chargée d'accompagner et de bousculer les processus de conception dans tout le Groupe. Ses ambitions sont à la hauteur de ses objectifs : à l'horizon 2025, tout le catalogue numérique ABB aura été remanié afin de proposer des offres alignées et cohérentes.

Bien concevoir une interface est plus qu'une discipline ; c'est un état d'esprit [1]. Le concepteur doit se mettre à la place de l'utilisateur pour en percevoir les besoins →01, suivant une démarche itérative et holistique, qui fait la part belle à la créativité : ce que les Anglo-Saxons appellent « design thinking ». ABB combine son expertise dans la conception centrée sur l'utilisateur et sa longue connaissance des métiers de ses clients pour faire progresser l'automatisation et répondre aux enjeux de l'industrie durable. Ces deux aspects sont en effet fondamentaux pour doper la performance et la rentabilité des clients du Groupe confrontés au nouvel environnement numérique.

L'interface utilisateur, généralement considérée comme un atout concurrentiel, est appelée à évoluer vers plus de pluridisciplinarité. En 2020, Google a annoncé que l'expérience utilisateur allait devenir un important facteur de classement[1] des sites web [2] ; selon un récent sondage LinkedIn, la conception centrée sur l'être humain figure parmi les cinq compétences techniques les plus demandées par les recruteurs.

> Le concepteur doit se mettre à la place de l'utilisateur pour en comprendre les besoins.

À l'avenir, la création de produits et de solutions mettra l'accent sur les fonctionnalités qui ont du sens et sur l'ergonomie de l'interaction homme-système. Aussi les technologies ABB au service des clients et utilisateurs prendront-elles un visage de plus en plus humain.

Nous reviendrons sur la démarche et la philosophie du Groupe en la matière dans les prochains numéros de la revue. •

—
01 La conception centrée sur l'opérateur, normalisée ISO, désigne un processus pluridisciplinaire, collaboratif et itératif, qui englobe la totalité de l'expérience utilisateur dans tous les domaines d'activité.

—
Bibliographie

[1] Brown, T., « Change by Design », *Journal of Product Innovation Management*, vol. 28, n° 3, p. 381-383, 2011.

[2] Subramanian, S., « Evaluating page experience for a better web », disponible sur : http://developers.google.com/search/blog/2020/05/evaluating-page-experience, mai 2020 (consulté le 9 mars 2021).

—
Lectures complémentaires

Johansson-Sköldberg, U., Woodilla, J., *et al.*, « Design Thinking: Past, Present and Possible Futures », *Creativity and Innovation Management*, vol. 22, n° 2, p. 121-146, 2013, disponible sur : https://doi.org/10.1111/caim.12023.

Kolko, J., « Design Thinking Comes of Age », *Harvard Business Review*, p. 66-71, septembre 2015.

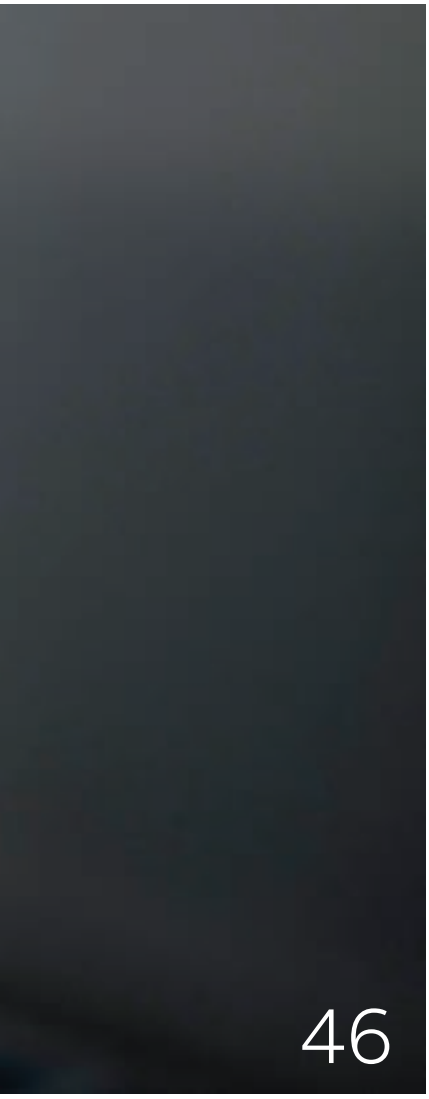
—
Note

1) Critère appliqué par un moteur de recherche pour évaluer le positionnement de pages web et en optimiser le référencement.

Instrumentation et analytique

Si l'on en croit un vieil adage, « quiconque n'a qu'un marteau comme outil assimilera tous ses problèmes à des clous ». Cela vaut aussi pour l'ère numérique : améliorer les capacités des outils analytiques et prédictifs ne se résume pas à les abreuver d'un volume croissant de données ; ces dernières doivent être plus précises et diversifiées. Aussi ABB travaille-t-il aux côtés de ses clients pour leur offrir bien mieux que des marteaux !

40 Détecter pour savoir et anticiper
46 Le numérique au service des analyseurs de gaz



INSTRUMENTATION ET ANALYTIQUE

Détecter pour savoir et anticiper

Les capteurs et systèmes de télésurveillance de l'offre de produits et services numériques ABB Ability™ pour composants mécaniques augmentent la sécurité, la durée de vie et la disponibilité des machines industrielles. Ces nouveaux piliers de l'usine du futur permettent de récupérer du terrain des données consultables et analysables à distance pour fournir de précieuses informations sur l'état de santé de l'ensemble du procédé.

01

—
01 Les capteurs communicants sans fil autorisent la surveillance en continu d'une large gamme de dispositifs et de procédés.

—
02 Palier instrumenté avec capteur ABB Ability™ pour composants mécaniques

—
03 Les capteurs ABB Ability™ permettent aux industriels de tirer le meilleur parti de l'Internet des objets.

Artur Rdzanek
Sensored Products ABB Dodge® Power Transmission
Greenville (Caroline du Sud, États-Unis)

artur.rdzanek@us.abb.com

Plus petits, plus performants, plus sûrs… les capteurs numériques n'ont cessé d'évoluer ces dix dernières années. En parallèle, trois nouveaux développements ont apporté leur lot d'innovation et de valeur ajoutée : le déport et le stockage des données dans le cloud, le traitement analytique, les communications sans fil [1]. Ainsi voit-on l'émergence d'appareils connectés sur l'Internet des objets qui permettent une surveillance continue d'un large éventail de dispositifs et de procédés →01, pour un coût nettement inférieur à celui des systèmes de suivi d'état traditionnels.

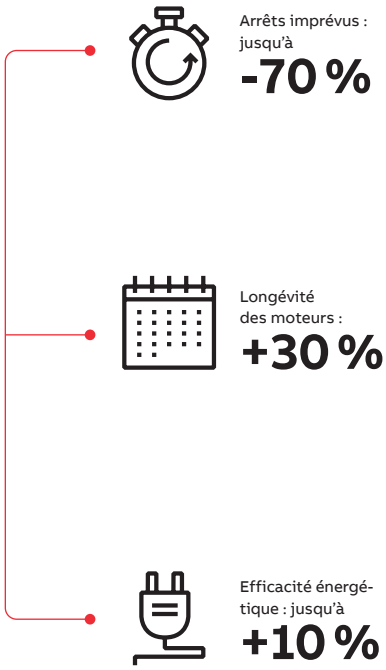
Concrètement, ces capteurs communicants dotent les industriels de puissants outils pour tracer avec précision la performance des équipements tout au long de leur cycle de vie ainsi que

—
L'instrumentation numérisée fournit en permanence des informations cohérentes et fiables pour optimiser le process.

leur réactivité aux conditions et sollicitations du process. L'utilisateur est alors à même de cibler, de quantifier et de planifier la maintenance, de prédire la longévité des actifs et d'établir des échéanciers de remplacement.

C'est là une révolution pour la mesure vibratoire, qui exige encore aujourd'hui de raccorder des capteurs d'acquisition de données TOR aux machines, mais aussi d'espacer les campagnes de mesure pour limiter le nombre d'interventions et, ce faisant, l'exposition du personnel aux risques de l'opération. L'instrumentation 4.0 fournit en permanence des informations cohérentes et fiables qui optimisent l'exploitation, tout en décelant le moindre écart par rapport aux référentiels pour assurer un contrôle qualité en temps réel du procédé [2].

02



03

Des capteurs vraiment « intelligents »
Les capteurs ABB Ability™ pour composants mécaniques condensent toutes les innovations de l'usine connectée →02. Cette nouvelle génération d'instruments ne se contente pas de renseigner en direct l'opérateur sur l'état de l'outil productif ; elle l'alerte également sur les besoins de maintenance afin de planifier les interventions avant que n'apparaissent des dysfonctionnements, réduisant d'autant les arrêts techniques →03.

GARANTIR LA CONTINUITÉ D'ACTIVITÉ

04a

À quelque chose malheur est bon : la Covid-19 fut l'occasion pour les capteurs ABB Ability™ de montrer leur « savoir-faire » au sein de l'université de Virginie, à Charlottesville (États-Unis) →**04a** [3]. Lors de la fermeture du site début 2020, le responsable de la maintenance du quartier McCormick s'est appuyé sur plus de 65 capteurs numériques ABB Ability™ pour garantir la continuité de l'activité et le maintien de conditions ambiantes stables dans les laboratoires de recherche. Pouvoir détecter les problèmes à distance a aussi contribué à la sécurité de l'équipe de maintenance.

Celle-ci est en charge du confort thermique des occupants dans une dizaine de bâtiments du campus et du maintien d'un environnement stable et contrôlé au sein de chaque labo. Dans le passé, il fallait régler quasi quotidiennement les équipements de traitement de l'air, qui pour beaucoup devaient être arrêtés pour l'occasion →**04b**.

Fin 2019, l'équipe décida de tester des capteurs de la gamme ABB Ability™ pour composants mécaniques en vue d'obtenir des informations temps réel sur l'état des paliers. Le succès ne s'est pas fait attendre ; très vite, d'autres capteurs sont venus enrichir le parc pour couvrir la totalité des installations aérauliques du campus. Ce déploiement a permis de mettre au jour des problèmes sur des équipements qui jusqu'ici n'avaient pas nécessité de

04b

maintenance ou de remplacement. Après chaque correction, l'équipe ajoutait un capteur et comparait les résultats : les niveaux de vibration après intervention se sont avérés presque parfaits, preuve que la réparation avait rempli son office.

La qualité des informations obtenues a considérablement amélioré la prévisibilité de la maintenance et de la gestion des stocks de rechange. Désormais, plutôt que d'intervenir systématiquement selon un échéancier défini, l'équipe sait exactement ce qui réclame une attention quotidienne : de quoi minimiser et optimiser les arrêts techniques !

Crédit photo fig. 04a : terren in Virginia, source : Wikimedia Commons (creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.fr)

—
04 À l'université de Virginie, plus de 65 capteurs ABB Ability™ veillent au bon fonctionnement des installations et au maintien de conditions ambiantes stables dans les laboratoires de recherche.

04a La rotonde abritant la bibliothèque de l'université, fondée en 1819 par Thomas Jefferson.

04b Exemple de capteur numérique pour application CVC, semblable à ceux équipant l'université de Virginie

—
05 La nouvelle passerelle prête à brancher d'ABB permet de se connecter en toute transparence aux capteurs ABB Ability™, y compris dans les lieux les plus isolés, via les réseaux de téléphonie mobile AT&T ou Verizon.

Les fonctions de télésurveillance du capteur autorisent des contrôles à distance en toute sécurité, sans toucher aux machines ni avoir à retirer leurs protections… un avantage très apprécié des techniciens !

Autre intérêt majeur : les données fournies par les capteurs permettent à la maintenance de se focaliser sur les actifs qui doivent faire l'objet d'une attention particulière plutôt que d'inspecter chaque machine et chercher à savoir si tel type de vibration ou tel niveau de température peut s'avérer problématique. Inutile d'appeler un expert ; le capteur vous dit tout pour réagir en connaissance de cause et éviter les pannes →04.

Transmission sans fil et utilisation intuitive
Sur le terrain, l'opérateur peut choisir la périodicité des relevés (tous les quarts d'heure ou demi-journées, par exemple), selon la dynamique du process. De son côté, le technicien de maintenance dispose de trois moyens d'acquisition et de consultation des données sans fil : la passerelle ABB, une nouvelle passerelle prête à brancher (« plug and play ») →05, ou encore l'application mobile ABB Ability™ Smart Sensor →06.

Depuis un smartphone, il est ainsi possible de surveiller à tout moment le fonctionnement d'un équipement, sur place comme à distance. L'interface utilise un système de feux tricolores pour signaler en un clin d'œil l'état de chaque actif surveillé.

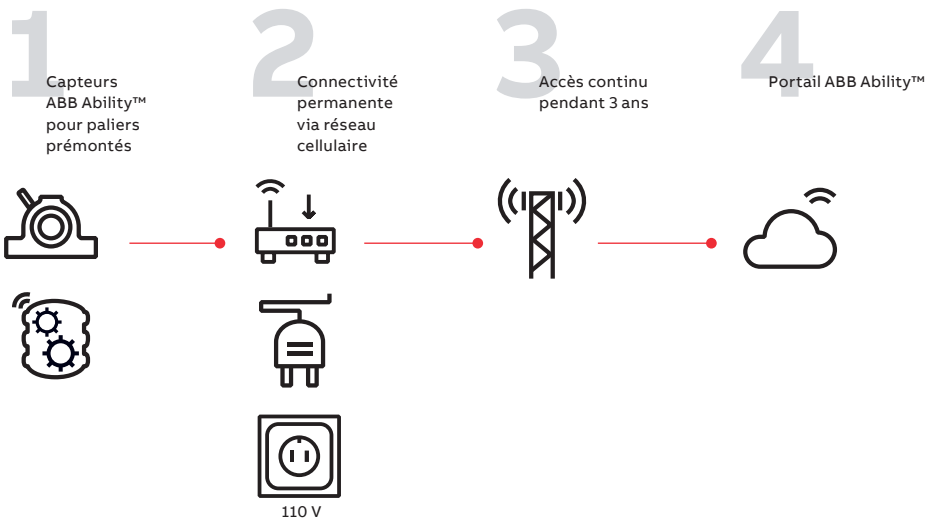
L'usine du futur avec Digital Powertrain
L'usine connectée est l'avenir de l'industrie. La plate-forme numérique ABB Ability™ relie les clients à la puissance de l'Internet industriel

—
L'utilisateur peut à tout moment contrôler l'état de ses équipements au moyen de l'appli ABB Ability™ Smart Sensor.

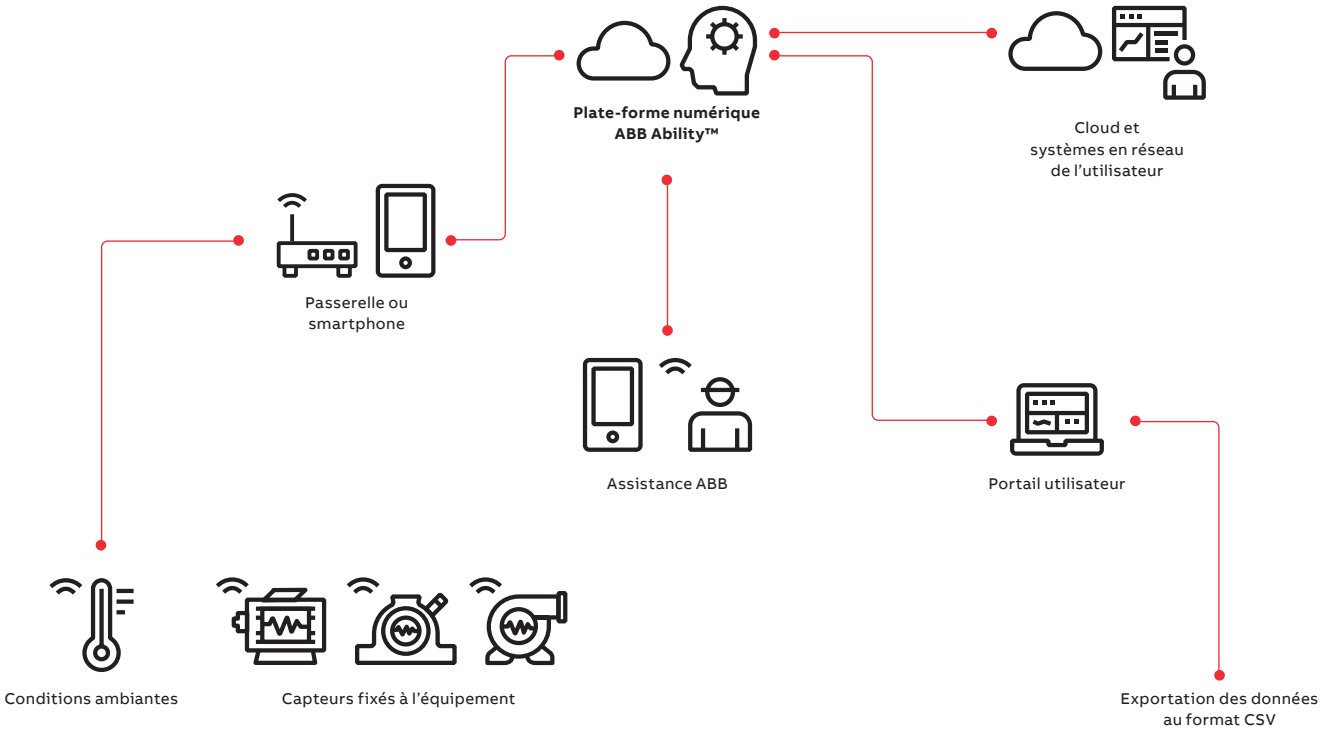
des objets en combinant les données issues du parc de moteurs, paliers prémontés, réducteurs, variateurs, pompes, etc. Accessibles et analysées à distance, ces données fournissent un bilan de santé complet de l'ensemble du procédé.

Elles peuvent même être transmises à la plate-forme de surveillance ABB Ability™ Digital Powertrain pour entraînements de puissance. Cette offre de solutions numériques englobant matériels, logiciels et services allie la connectivité et l'analytique ABB pour permettre au client de gagner en efficacité, en prévisibilité et en sécurité.

Toutes ces données capteurs sont transférables via un smartphone ou la passerelle ABB à un serveur sécurisé dans le cloud ABB Ability™. Là, elles y sont traitées par de puissants algorithmes de détection des défauts et affichées sous



05



06

forme graphique pour faciliter la consultation et l'analyse.

—

Les données remontées d'une multitude de capteurs peuvent être transférées via le smartphone de l'utilisateur ou la passerelle ABB vers un serveur cloud sécurisé.

Il va de soi que l'ensemble de ces fonctions bénéficie des meilleures cyberdéfenses : authentification de chaque capteur par code PIN paramétrable et chiffrement des transmissions par certificat TLS (« Transport Layer Security »).

La nouvelle passerelle plug and play s'appuie sur deux des plus grands fournisseurs de téléphonie mobile aux États-Unis pour garantir une connectivité de bout en bout, de l'instrument de terrain au portail cloud d'ABB.

En somme, l'offre de capteurs numériques sans fil ABB Ability™ transforme les moteurs, pompes, paliers et transmissions mécaniques de l'usine en dispositifs connectés, dont les paramètres clés (vibrations et température, par exemple), mesurés sur la structure de l'organe, fournissent de précieux indicateurs d'état et de performance. L'utilisateur peut alors identifier les anomalies et dégradations du système, tout en réduisant les risques pour le personnel d'exploitation et de maintenance →07.

Qui plus est, un nouveau microprogramme permet de mettre à jour ces capteurs intelligents pour afficher de nouvelles caractéristiques (valeur efficace de la vitesse vibratoire, par exemple), changer d'intervalle de mesure, modifier la sensibilité de l'accéléromètre, détecter les démarrages/arrêts, entre autres. Ces innovations, directement inspirées des retours clients d'ABB, ne cessent d'enrichir le spectre fonctionnel des capteurs numériques ABB Ability™. •

Crédit photo fig. 07a : GrainCorp Oilseeds

—
06 Solution ABB de suivi d'état des moteurs
—
07 Les capteurs ABB Ability™ ont permis à GrainCorp de surveiller proactivement les paliers de ses équipements de trituration et de raffinage du colza.

07a GrainCorp a travaillé avec ABB et A1 Electric Motors pour développer une instrumentation ABB Ability™ répondant spécifiquement à ses besoins.

07b Les capteurs ABB Ability™ signalent à l'entreprise tout échauffement anormal des paliers de cuiseur.

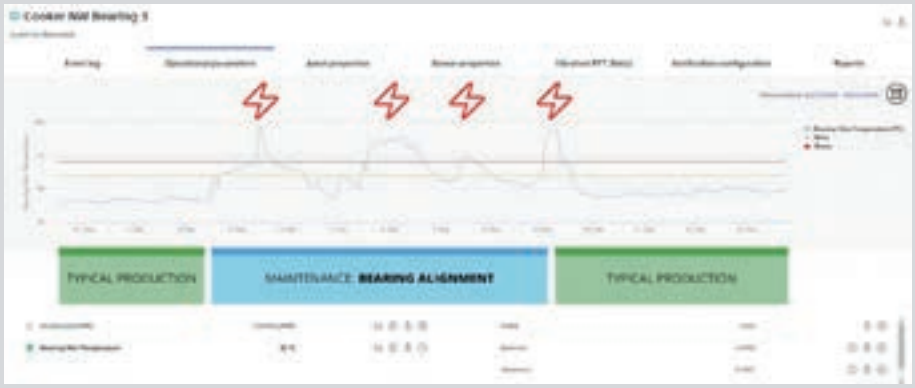
07a

VEILLER AU GRAIN

Les capteurs ABB Ability™ participent activement aux gains de performance et de rentabilité du numéro un australien de la filière grain, GrainCorp →**07a** [4].

Confronté à des problèmes d'alignement et d'échauffement dans les paliers montés sur un cuiseur primaire de son installation de trituration de colza, GrainCorp s'est tourné vers ABB et son partenaire commercial A1 Electric Motors pour mettre au point une solution de surveillance « métier » : bâti sur des capteurs ABB Ability™ pour paliers et moteurs ainsi que sur une passerelle de communication, le système permet de tracer en temps réel l'état et les performances de l'équipement en vue d'éviter les pannes.

Une réalisation couronnée de succès au point que l'industriel envisage d'intégrer ces capteurs à la plate-forme ABB Ability™ Digital Powertrain pour entraînements de puissance. La solution globale devrait renforcer les capacités de télésurveillance des paliers et moteurs GrainCorp par A1 Electric Motors, dans un contexte d'accès très restreint au site et de suivi d'état habituellement limité dans le temps. Cette surveillance proactive, assistée d'une expertise métier, a fait grimper en flèche les performances du procédé et quasiment rayé des tablettes les risques de défaillance du système tout entier →**07b**.



07b

07

—
Bibliographie

[1] Eros, L., « Progress in Real-Time », *World Cement*, disponible sur : https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A6860&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch, mai 2020.

[2] Eros, L., «Powertrains And Predictions », *World Coal*, disponible sur : https://www.worldcoal.com/magazine/world-coal/september-2020/, septembre-octobre 2020.

[3] ABB, « University of Virginia maintenance team relies on ABB to keep campus running », disponible sur : https://new.abb.com/news/detail/61748/university-of-virginia-maintenance-team-relies-on-abb-to-keep-campus-running, 5 mai 2020.

[4] ABB, « Digital trends: Smart sensors in oil refineries », disponible sur : https://new.abb.com/news/detail/65329/digital-trends-smart-sensors-in-oil-refineries, 16 juillet 2020.

INSTRUMENTATION ET ANALYTIQUE

Le numérique au service des analyseurs de gaz

Soumis à des réglementations antipollution de plus en plus draconiennes, les industriels se doivent de maintenir leurs équipements de surveillance en parfait état de marche. L'offre de services numériques ABB Ability™ pour analyseurs de gaz accroît les bénéfices de la maintenance préventive et facilite le passage à la maintenance prédictive.

Vinay Kariwala
ABB Ability™
Innovation Centre
Bangalore (Inde)

vinay.kariwala@
in.abb.com

Chakravarthy Suhas
Daniele Angelosante
Anciens collaborateurs
ABB

Le durcissement des normes de qualité de l'air oblige de nombreux pays à mettre en place une surveillance continue des polluants gazeux que sont les oxydes d'azote et de soufre, les monoxyde et dioxyde de carbone, l'acide chlorhydrique et le fluorure d'hydrogène. Sont également ciblés les poussières, le mercure et les dioxines.

L'offre ABB Ability™ peut aider la maintenance industrielle à évoluer du préventif au prédictif.

À l'évidence, ce tour de vis réglementaire s'accompagne de nouvelles exigences de conformité pour les industriels : la législation européenne, par exemple, impose de valider les mesures toutes les heures ; à défaut, et au-delà de trois heures d'absence de relevés, c'est toute une journée de surveillance qui est annulée. De même, elle fixe à 11 jours par an le nombre maximal d'arrêts afin de garantir une disponibilité de 97,5 %.

ABB Ability™ pour analyseurs de gaz

L'industriel fait aujourd'hui face à un paradoxe : la réglementation est de plus en plus stricte alors même que les compétences en analytique se raréfient au sein de l'entreprise. Une situation qui entraîne des retards dans la surveillance et le diagnostic des analyseurs de gaz qui, à leur tour, compromettent la conformité normative. La solution pour infléchir la tendance ? Une maintenance renforcée.

Jusqu'à présent, les analyseurs de gaz ABB faisaient l'objet d'une maintenance préventive basée sur des contrôles réguliers et des interventions systématiques à dates fixes, dans le but de réduire les pannes et de prolonger la durée de vie du parc →01. Cette pratique a le double avantage de garantir la disponibilité de l'installation et d'alléger le poids des connaissances nécessaires au personnel du client pour exploiter ces instruments évolués.

Aujourd'hui, les services numériques ABB Ability™ pour analyseurs de gaz peuvent accroître les bénéfices de cette maintenance préventive et faciliter le passage au prédictif. L'offre ABB Ability™ pour instruments de mesure se compose à cette fin de deux volets :

- La téléassistance ABB Ability™ Remote Assistance ;
- Le suivi d'état ABB Ability™ Condition Monitoring.

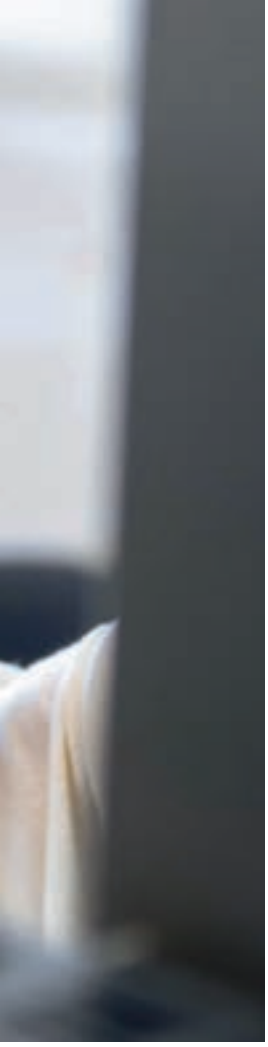


ABB Ability™ Remote Assistance
Ce service de téléassistance rapide et sûr vise à améliorer l'expérience du client qui fait appel au support technique du Groupe. Il permet à un ingénieur de maintenance ABB de se connecter à l'équipement concerné, via une passerelle industrielle dédiée au site, pour récupérer toutes les données utiles au diagnostic et à la résolution du problème. Celui-ci peut alors intervenir directement, sans solliciter le client au téléphone. De son côté, le client reçoit par message électronique ou téléphonique un état d'avancement de l'opération ainsi qu'une solution ou des recommandations.

L'accès à la passerelle industrielle ABB Remote Assistance et son utilisation sont ultra-sécurisés pour parer à toute malveillance informatique : seul le personnel formé et qualifié par ABB est habilité à se connecter à la passerelle et aux données de l'instrument, et toujours avec l'autorisation du client. La passerelle est accessible par réseaux 4G ou Ethernet, renforcés par des protections et des restrictions (pare-feu) qui garantissent la cybersécurité des échanges.

ABB Ability™ Remote Assistance est associé à la solution ABB d'assistance aux analyseurs par QR Code dynamique, qui permet un diagnostic complet et un bilan de santé temps réel de l'instrumentation analytique, sans besoin de formation ni de connexion à distance [1]. C'est là un premier niveau de services numériques adaptés à ce type de produit.

—
01 La maintenance préventive est souvent la clé pour garder les analyseurs de gaz ABB en parfait ordre de marche. Les services numériques ABB Ability™ dédiés à ces instruments dopent l'efficacité de la maintenance préventive et participent à son déploiement.

01

ABB Ability™ Condition Monitoring
Cette seconde composante de l'offre ABB pour instruments de mesure est également accessible par une passerelle industrielle qui, connectée aux analyseurs du site, surveille et rapatrie à intervalles réguliers les principales données reflétant l'état fonctionnel des appareils. Celles-ci sont stockées dans une base, puis traitées pour repérer et annoncer les premiers signes d'une dégradation ainsi que son origine éventuelle. Les résultats sont consignés dans des bilans de santé →02 accessibles aux ingénieurs de maintenance ABB ou au client, qui peuvent aussi être adressés par courriel au personnel habilité.

—
Le volet prévention est capital pour les analyseurs de gaz qui assurent des fonctions primordiales dans le contrôle-commande du procédé ou la surveillance des émissions polluantes.

Les contrôles se font à intervalles fixes, selon une périodicité quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle, de façon à recueillir les mesures et diagnostics en temps réel. Les spécialistes ABB évaluent et comparent ces paramètres à des référentiels de performance pour recommander des actions de maintenance. Celles-ci peuvent plus particulièrement viser à réduire les arrêts inopinés dus à une détérioration excessive de pièces maîtresses de l'équipement. On peut profiter d'une campagne de maintenance ou d'un arrêt planifié pour résoudre le problème, en amont de la panne.

Cette politique de prévention est capitale pour les analyseurs de gaz qui assurent des fonctions primordiales dans le contrôle-commande du procédé ou la surveillance des émissions polluantes, ou encore les appareils implantés dans des sites très difficiles d'accès (en pleine mer, au fond de l'océan, de la mine, etc.).

Le suivi d'état ABB Ability™ Condition Monitoring a donc pour mission d'éviter les arrêts imprévus et d'optimiser le coût global de l'instrumentation.

Auto-maintenance
ABB Ability™ Condition Monitoring peut aussi fonctionner sur site en autonome, sans intervention d'ABB ; le bilan de santé établi par le service

02

est alors analysé par le personnel de maintenance du client, qui reste libre de contacter à tout moment ABB pour débattre de la stratégie à suivre. Une solution idéale pour les entreprises voulant « autogérer » leur maintenance ; leur personnel peut ainsi capitaliser à la fois sur les données fournies par ABB Ability™ Condition Monitoring et sur les compétences expertes « maison ».

Suivi d'état et assistance ABB Ability™ se complètent pour former une offre globale de télémaintenance connectée à ABB.

Informatique décisionnelle
Au cœur d'ABB Ability™ Condition Monitoring figure un moteur décisionnel qui a pour mission de récupérer les données du suivi d'état, de les analyser et de fournir une indication sur le fonctionnement de l'instrument surveillé. S'agissant d'un service web, il s'adapte facilement aux changements de configuration de l'équipement. Bientôt, une version cloud viendra encore renforcer la flexibilité de l'outil.

—
La solution inclut un système complet de gestion conforme aux règles de cybersécurité ABB.

Pour l'heure, la solution est conçue comme une plate-forme de services génériques tels que l'édition de rapports, l'analyse de données, etc., qui simplifie l'ajout d'analyseurs. Les définitions de données et le logiciel d'analyse correspondant à un type précis d'analyseur ne résident pas sur la plate-forme mais dans des fichiers spécifiques de vérification VDF (« Verification Definition Files »). Cette organisation accélère l'intégration de nouveaux instruments et simplifie la maintenance du logiciel.

Confidentialité
Éléments stratégiques de la solution, les données récupérées des analyseurs sont stockées dans une base ABB élaborée sur mesure pour le client. Celle-ci a peu de liens avec le reste du logiciel pour garantir la confidentialité des données et le contrôle des accès. Les données stockées sont horodatées une à une ; c'est l'assurance de récupérer le bon jeu de données aux fins d'historiques.

La solution est dotée d'un système à part entière de gestion des utilisateurs, conforme aux règles sécuritaires ABB. D'autres fonctions critiques de cybersécurité sont assurées : renforcement du système, chiffrement et sécurisation des échanges, etc. Les données importantes sont chiffrées et stockées. La solution complète, matériel compris, est testée par le laboratoire de haute sécurité informatique DSAC (Device Security Assurance Center) d'ABB.

Au-delà de l'analyse
Si la téléassistance et le suivi d'état ABB Ability™ pour instruments de mesure ont aujourd'hui vocation à étayer l'offre ABB d'analyseurs de gaz en continu, leur extension à d'autres produits, dont les chromatographes et spectromètres en phase gazeuse, est en projet. Ces deux volets du portefeuille ABB Ability™ sont appelés à s'ouvrir à d'autres services numériques avancés d'ABB comme l'analytique et la maintenance prédictive.

Vision améliorée
Pour compléter cette offre et améliorer l'expérience utilisateur, ABB met à profit de nouvelles technologies ad hoc. C'est le cas de la réalité augmentée (RA), qui permet de superposer des données virtuelles au monde physique. Dans cette optique, l'application collaborative ABB Ability™ Remote Insights for service, par exemple, améliore l'interaction entre l'expert à distance et l'opérateur sur le terrain en greffant à la scène réelle des instructions, des informations contextuelles, des conseils, etc.

La maintenance industrielle se fonde traditionnellement sur l'expérience et sur la consultation de manuels hors ligne. Or cette démarche a l'inconvénient d'obliger l'ingénieur à un constant va-et-vient visuel entre la documentation et le dispositif à dépanner. Deux techniques de RA y remédient : la première superpose à l'objet réel

— 02 Tableau de bord du suivi d'état ABB Ability™ Condition Monitoring

— 03 Vue du technicien sur site en réalité augmentée

— 04 Les experts disposent d'une large palette de fonctions et d'écrans de téléassistance pour épauler le client.

sa maquette numérique en 3D, complétée d'instructions de dépannage pas à pas. La seconde met le technicien du site en contact vidéo avec un expert à distance, lequel voit exactement le même espace de travail et peut alors guider l'intervenant dans sa tâche →03–04. Il lui est également possible d'annoter la vue réelle et d'envoyer des éléments et contenus numériques (images, vidéos, etc.) au technicien pour faciliter le dépannage. La démarche optimise le temps de l'expert et lui permet d'intervenir sur un bien plus grand nombre de sites que s'il devait se rendre à chaque fois sur place.

Il est un domaine d'application qui a beaucoup à gagner de la RA : la surveillance des émissions polluantes sur les navires en mer. À l'heure actuelle, quand l'ingénieur de maintenance à bord rencontre une difficulté, il doit appeler l'assistance ABB. Faute de trouver une solution par téléphone, il faut dépêcher un technicien ABB à l'escale suivante ou, dans les cas extrêmes, l'héliporter jusqu'au navire. Grâce à la RA, l'ingénieur à bord est capable de résoudre le problème en s'aidant des maquettes numériques en 3D ou des instructions de l'expert connecté à son équipement RA.

Expertise et technologie

Le resserrement des normes antipollution s'accompagne d'un alourdissement des pénalités financières pour dépassement de seuil d'émission et d'une raréfaction des compétences internes en analyse. Il est donc capital que les entreprises s'attachent les services des experts externes les plus chevronnés et des technologies de pointe pour maintenir leur instrumentation au top. Le duo ABB Ability™ Remote Assistance et ABB Ability™ Condition Monitoring est à la hauteur de l'enjeu : il dope la maintenance préventive systématique tout en traçant la voie vers plus de simplicité avec la maintenance prédictive, accélère et optimise les interventions menées à distance par les spécialistes ABB… Bref, cette offre de services numériques conjugue le meilleur de l'expertise et de la technologie pour vous permettre d'opérer en toute quiétude. •

— L'offre de produits de télésurveillance permet une intervention rapide, ciblée et efficace des experts ABB.

— **Bibliographie**

[1] Lincoln, D., *et al.*, « Le DQR Code dynamise la maintenance », *ABB Review*, 1/2018, p. 40–45.

03

04

Énergie active

L’électricité, qui est déjà la forme d’énergie prédominante dans le monde entier, tous secteurs et pays confondus, devrait encore étendre son emprise, notamment dans le domaine des transports. ABB, à l’avant-garde du génie électrique depuis plus d’un siècle, accompagne tout naturellement ce nouveau chapitre de son histoire.

52 Labo virtuel pour haute tension
58 Véhicules particuliers, transports collectifs, ports : le transport s’électrifie
62 Disjoncteurs Tmax XT : taillés pour le numérique
68 Nouveau système de connexion rapide ABB
72 La coupure d’arc s’affranchit du SF_6
78 Des bobines de Rogowski pour détecter les défauts d’arc

ÉNERGIE ACTIVE

Labo virtuel pour haute tension

Prédire la performance diélectrique d'un appareillage à l'aide de calculs et d'essais de champ électrostatique donne parfois des résultats imprécis. Un inconvénient qui n'a plus lieu d'être avec le nouvel outil de simulation d'ABB : le laboratoire virtuel VHVLab capitalise sur les connaissances pointues du Groupe pour offrir un environnement de simulation complet de la haute tension.

Andreas Blaszczyk
Thomas Christen
Patrik Kaufmann
Anciens collaborateurs ABB

Christoph Winkelman
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)

christoph.winkelmann@ch.abb.com

Pouria Homayonifar
ABB Electrification
Skien (Norvège)

pouria.homayonifar@no.abb.com

Atle Pedersen
SINTEF Energy Research
Trondheim (Norvège)

Correctement dimensionner les propriétés diélectriques est un aspect central du développement des appareillages et transformateurs ainsi que du câblage moyenne et haute tension. Le fabricant qui veut commercialiser un nouveau produit doit au préalable le soumettre à une série d'essais de type afin d'en certifier la conformité normative. Un essai est réussi si l'isolant électrique de l'appareil est capable de supporter sans claquage les contraintes de champ électrique alternatif ou celles dues à un choc de foudre. Pour prédire les résultats expérimentaux, on compare généralement des calculs de champs électrostatiques aux valeurs critiques spécifiées pour les matériaux concernés (gaz, liquides, solides) et leurs interfaces. Une méthode de bon sens qui a toutefois ses limites tant la relation entre défauts diélectriques et intensité des champs est souvent bien plus complexe.

L'outil de simulation VHVLab d'ABB permet de prédire les résultats des essais diélectriques.

L'outil de simulation VHVLab d'ABB ambitionne de réconcilier calculs numériques et essais physiques en offrant une plate-forme logicielle de prédiction des résultats diélectriques →01–02. Il combine à cette fin des simulations d'études fondées sur les connaissances empiriques obtenues par expérimentation et des simulations de premier principe de modèles microscopiques. Les procédures de simulation intégrées dans VHVLab découlant de l'expérience acquise par ABB lors d'essais haute tension en laboratoire, ce logiciel n'est pas commercialisé. C'est à ce jour une plate-forme « maison », qui a vocation à accélérer les boucles de conception tout en procurant à ABB un avantage concurrentiel sur les autres outils de simulation. VHVLab est le fruit de la R&D industrielle, appuyée par des partenariats universitaires.

Dans cet article, nous évoquerons rapidement l'architecture de la plate-forme avant de présenter quelques études de cas sur le développement d'un sectionneur coupe-charge moyenne tension écoperformant [1]. Chaque étude porte sur une simulation différente et traite de caractéristiques telles que la génération des fronts d'ionisation, les arêtes, les points triples et la charge de surface.

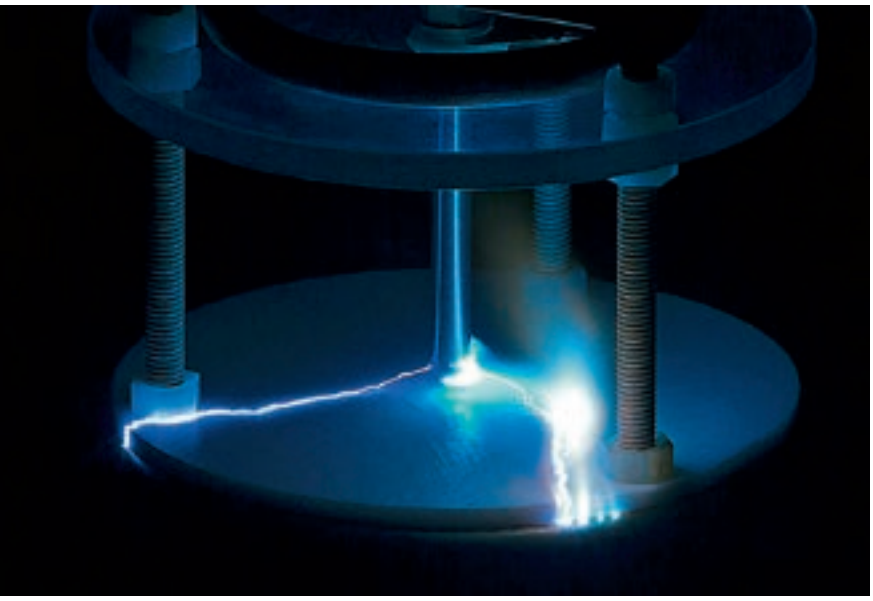
Architecture

Au cœur de VHVLab se trouve le module de modélisation des décharges, qui s'interface à deux composants externes, un afficheur et un solveur de champ électrostatique d'arrière-plan →03. Cette architecture ouverte laisse à l'utilisateur le choix d'intégrer n'importe quel composant logiciel tiers. ABB a privilégié ici son propre solveur basé sur la méthode des éléments de frontière (MÉF), qu'il utilise depuis les années 1990 pour les simulations diélectriques [2], ainsi qu'une version sur mesure du logiciel libre de visualisation des données ParaView, bien connu des scientifiques.

Le noyau du logiciel VHVLab se présente sous la forme d'une application Java complétée d'une interface graphique, qui guide l'ingénieur ABB tout au long des étapes successives de l'évaluation :

Crédit photo : SINTEF

—
01 ABB s'est associé à l'organisme de recherche norvégien SINTEF pour améliorer la performance diélectrique de ses appareillages de coupure. Le laboratoire d'essai du SINTEF (photo), à Trondheim, a permis de valider les prédictions du nouvel outil de simulation VHVLab.



02

1. Chargement du champ d'arrière-plan initial, précalculé ;
2. Indication de la rugosité de surface de la pièce et des propriétés du gaz (pression, température, type, composition, etc.). VHVLab s'appuie sur ces caractéristiques pour calculer la valeur de contrainte critique au-delà de laquelle peut apparaître une décharge ;
3. Calcul des points critiques (risque d'apparition de décharge) et sélection de points pour poursuivre l'évaluation ;
4. Définition des paramètres de calcul de l'apparition et des chemins de décharge ;
5. Lancement et surveillance des calculs ;
6. Évaluation des résultats de l'apparition pour tous les points sélectionnés et calculés ;
7. Affichage graphique des caractéristiques de champ le long des lignes de décharge calculées ;
8. Définition des conditions aux limites de la charge de surface et calcul du champ d'arrière-plan avec cette charge ; retour à l'étape 3 jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.

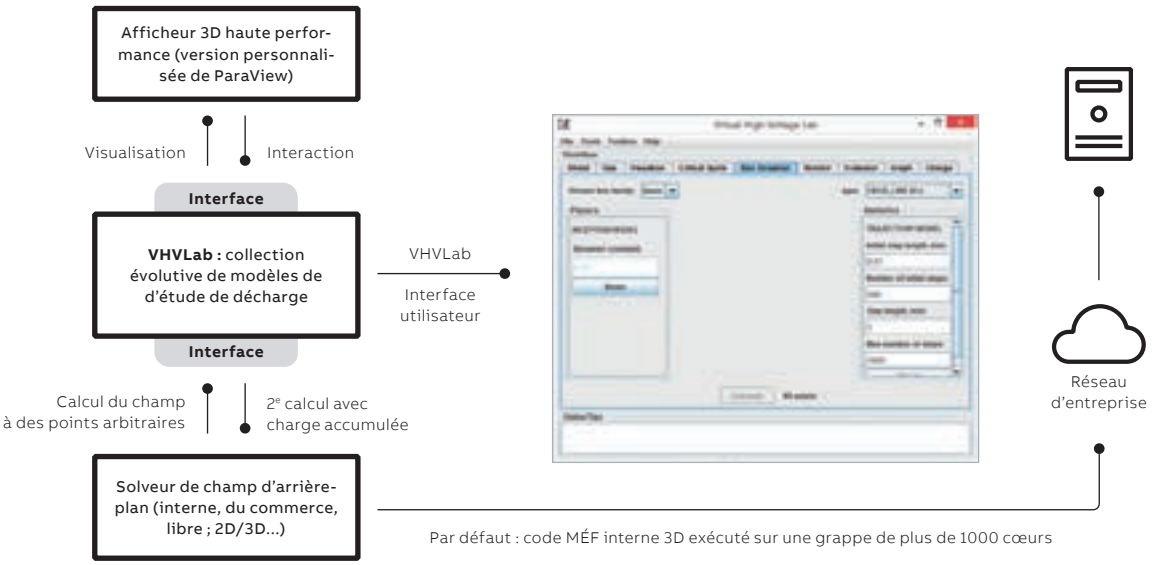
Les études de cas ci-après illustrent les résultats obtenus.

Génération des fronts d'ionisation

La formation d'une décharge de gaz dans un champ électrique débute par l'apparition des premiers électrons libres qui déclenchent une avalanche, encore appelée « décharge de Townsend ». Si le nombre d'électrons généré atteint un seuil critique, un front d'ionisation auto-entretenu se forme. Le critère d'apparition du front d'ionisation (ou « streamer ») dépend du coefficient d'ionisation effective, lui-même fonction du champ, qui explique l'ionisation par choc et l'arrachement ou le rattachement des électrons. La valeur de la tension d'amorçage est calculée par itérations successives jusqu'à réunir tous les critères ; chaque itération applique une valeur différente de tension et fait varier les valeurs de champ électrique le long d'un chemin de décharge.

L'apparition des premiers électrons libres déclenche une avalanche, dite « décharge de Townsend ».

Une des premières applications de ce modèle dans le cadre de VHVLab a porté sur un nouvel



03

Crédit photo fig. 02 : SINTEF

—
02 Les industriels cherchent à éviter à tout prix les claquages dans le matériel électrique.

—
03 Architecture de la plate-forme de simulation VHVLab

—
04 Comparaison entre la tension d'amorçage du streamer simulée et les résultats expérimentaux sur un sectionneur de tableau RMU

04a Intensité du champ électrique pour un choc de foudre de 125 kV et lignes de champ calculées aux endroits critiques ; les points et couleurs plus clairs indiquent les zones plus sujettes aux décharges.

04b Traces de décharge à la surface d'un bouclier de lame après essai au choc de foudre

appareillage isolé dans l'air de 12 kV. La principale difficulté rencontrée par les concepteurs fut de remplacer le gaz isolant SF_6 par de l'air comprimé, sans augmenter l'encombrement ni dégrader l'isolation. Seules des simulations poussées pour optimiser la forme de l'appareil ont permis d'aboutir à une architecture qui avait aussi pour avantage de répondre aux exigences des appareillages de 24 kV. ABB a retenu pour l'occasion son isolant AirPlus, mélange d'air et de fluorocétone. À ces deux niveaux de tension, VHVLab a su prédire une tension d'amorçage suffisante pour les essais au choc de foudre. La figure →04 met en regard les résultats de la mesure et de la simulation sur un sectionneur de tableau monobloc RMU. Les quelque 10 % d'écart entre les deux valeurs, typiques de la prédiction des résultats d'essais au choc de foudre, sont considérés par les ingénieurs comme une marge de sécurité.

C'est au niveau des arêtes et des points triples que l'émission d'électrons est la plus susceptible de se produire.

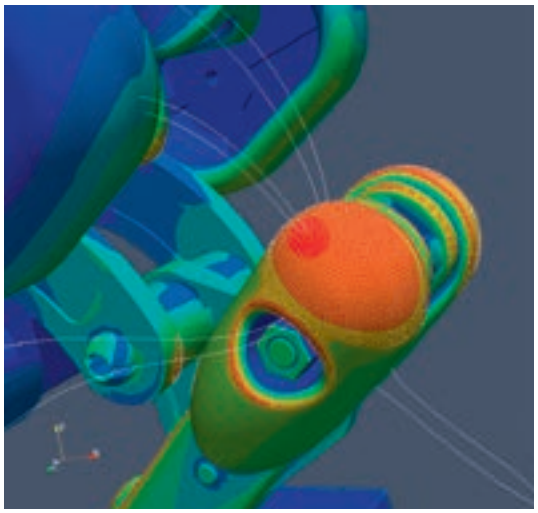
Arêtes

Les renforcements du champ autour des arêtes sont des causes bien connues d'échec des essais au choc de foudre sur les appareillages moyenne tension (MT). La tendance actuelle à la réduction de la taille des appareils, et donc des distances inter-électrodes, ne fait qu'exacerber le problème. ABB a utilisé VHVLab pour étudier l'impact du chanfreinage des arêtes sur la tension de tenue [3] : les résultats expérimentaux ont clairement démontré que cette dernière était proportionnelle au rayon d'arrondi de l'arête →05. Le claquage est un processus stochastique qui nécessite de multiplier les essais pour obtenir une loi de distribution permettant d'estimer la tension à laquelle la probabilité de claquage est de 2 ou 50 %. Il s'est également avéré que la simulation, fondée sur les critères d'apparition, concordait avec l'expérimentation. L'étude n'a porté que sur un aspect des arêtes, à savoir les distances d'isolement réduites, qui caractérisent les appareillages compacts. Pour les grandes distances dans l'air, ce critère n'a pas d'importance.

La simulation d'arête a été appliquée à un nouveau sectionneur coupe-charge sans SF_6 →06. Les valeurs d'apparition calculées pour les points critiques A et B sont respectivement de 75 et 68 kV, valeurs confirmées par des essais de choc de foudre dans l'air à 75 kV : le point A n'a subi aucun claquage, ce qui n'est pas le cas des points B dans cette première variante de conception.

Points triples

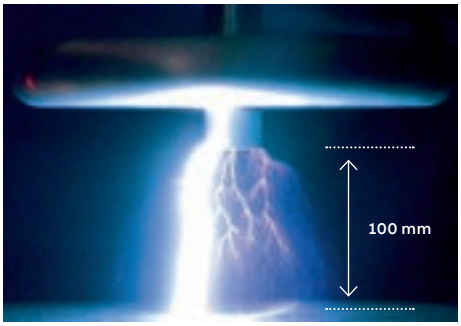
On appelle « point triple » d'un appareillage de coupure l'endroit où se rencontrent le métal, le diélectrique solide et le gaz : là où l'émission d'électrons a le plus de chances de se produire en présence d'un champ électrique important. C'est également le point de déclenchement privilégié d'un amorçage ou d'un claquage électrique.
Au cours du développement de l'appareillage de 12 kV évoqué plus haut, ABB a rencontré des problèmes de point triple lors des essais de rigidité diélectrique sur les traversées, ces barres isolantes qui assurent l'accouplement mécanique de l'actionneur à la terre et du sectionneur rotatif qui fonctionne sous haute tension →07a.



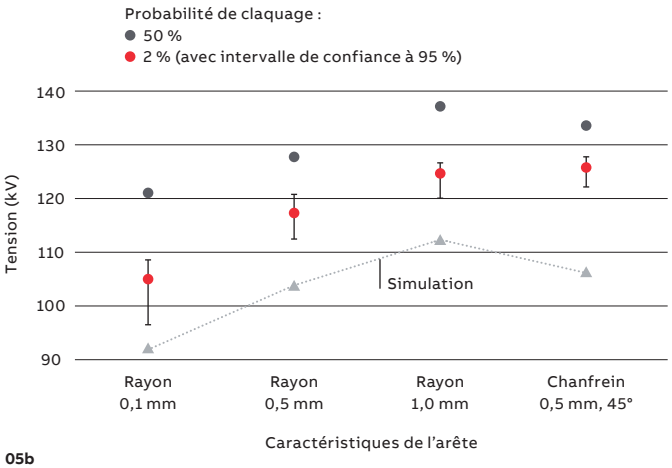
04a

Tension (kV)	Air	AirPlus
Mesure	86,7	133,7
Simulation	77,8	120,0

04b



05a



05b

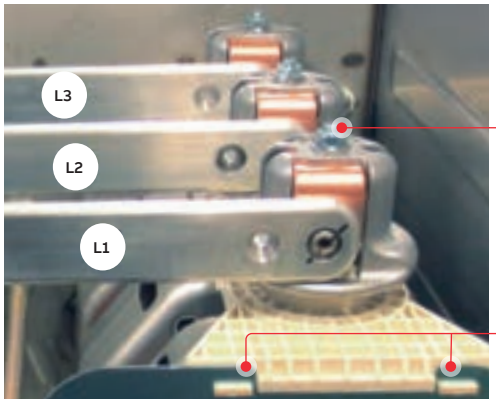
Pour étudier la performance diélectrique de cette configuration dans l'air, ABB s'est appuyé sur un montage réalisé par les chercheurs du SINTEF (organisme de recherche norvégien) pour déterminer la configuration de point triple la plus acceptable [4] →07b. La relation entre la tension de tenue CA mesurée (à savoir, statistiquement, la tension de claquage moyenne moins deux écarts-types) et la distance inter-électrodes →07c illustre un résultat expérimental obtenu pour une forme donnée de l'électrode de terre montée sur la traversée.

Simuler l'apparition au point triple n'est pas évident car la répartition du champ électrique est très particulière dans l'espace étroit qui sépare le diélectrique solide et l'électrode. Il est possible d'évaluer les critères d'apparition de streamer pour plusieurs versions de chemin de décharge et avec différentes composantes d'intensité du champ afin de déterminer les coefficients d'ionisation →07d. Si l'on obtient ainsi une reproduction fidèle des tendances observées en expérimentation, les valeurs de tension d'amorçage simulées diffèrent des valeurs mesurées. Dans VHVLab, les ingénieurs ont la possibilité de sélectionner n'importe laquelle des versions d'évaluation proposées. Si toutes garantissent une prédiction suffisamment prudente, la marge de sécurité n'est pas clairement définie. Conclusion : les claquages dus aux points triples nécessitent d'approfondir les études, qui ne devront pas se limiter pas aux modèles d'amorçage mais s'intéresser aussi à d'autres facteurs d'influence comme les charges de surface, les changements de polarité, l'état de surface ou encore les particules emprisonnées.

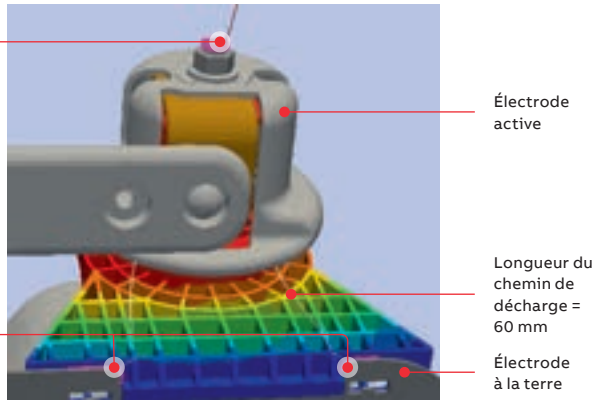
Charge de saturation

Les interactions entre décharges et surfaces diélectriques (apparition de streamer sans électrode, décharge rampante le long des surfaces et accumulation de charges en surface, par exemple) sont primordiales pour les applications pratiques. Ces dix dernières années, ABB s'est associé à des universitaires pour étudier ces phénomènes [5–6]. Exemple d'interaction applicable aux simulations d'étude intégrées dans VHVLab : la charge de saturation, qui peut être considérée comme une condition aux limites prescrite dans un calcul de champ électrostatique. Par « charge de saturation », on entend la charge de surface maximale qui peut s'accumuler

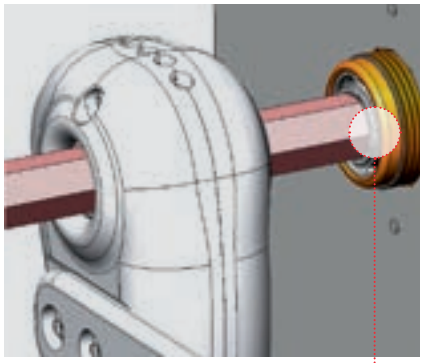
Il est difficile de simuler l'amorçage au point triple à cause de la répartition du champ électrique très particulière à cet endroit.



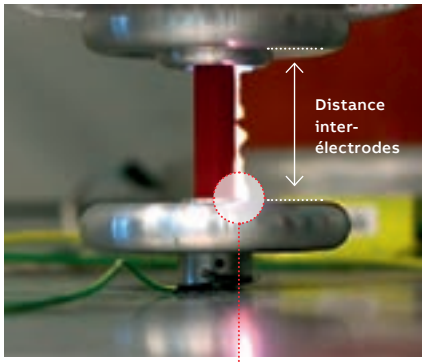
06a



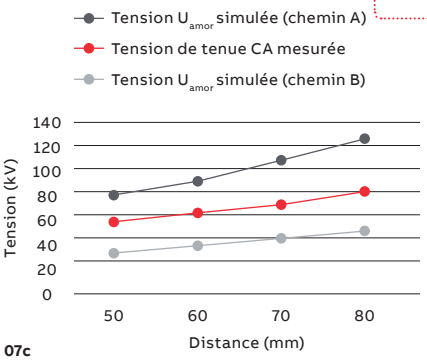
06b



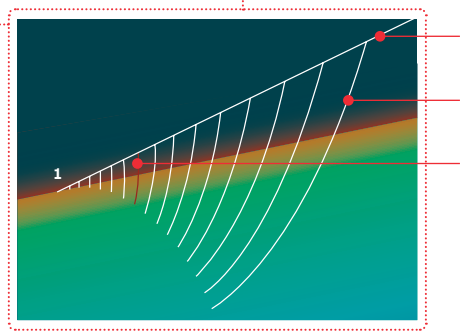
07a



07b



07c



07d

—
05 Essais et simulations de tenue diélectrique le long d'arêtes dans l'air

05a Montage d'essai avec claquage consécutif à un choc de foudre positif : l'électrode exposée est de forme cylindrique, avec un bord arrondi ou chanfreiné.

05b Comparaison de la mesure des tensions de tenue/claquage et de la simulation

—
06 Exemple d'évaluation des probabilités de claquage dans le compartiment d'un appareillage à isolation gazeuse (air sous 1,3 bar) de 12 kV

06a Architecture initiale : aucun claquage au point A mais défaillances aux points B

06b En simulation, les arêtes ont été arrondies avec un rayon de courbure de 0,1 mm afin de refléter précisément la forme de la pièce testée.

—
07 Analyse du point triple

07a Traversée mécanique hexagonale dans un appareillage de 12 kV présentant un point triple critique au niveau de l'actionneur mis à la terre (à droite)

07b Décharge observée dans le montage expérimental du SINTEF visant à mesurer le claquage CA dans l'air

07c Comparaison entre la tension de tenue CA mesurée (valeur crête) et deux simulations de la valeur d'amorçage U_{amor} en fonction de la distance inter-électrodes. Nota : pour fiabiliser la prédiction, il convient de multiplier les valeurs U_{amor} estimées pour le chemin A par un facteur empirique de 0,5 .

07d Affichage couleur en 3D de l'intensité du champ électrique et des deux chemins de décharge possibles évalués à proximité du point triple critique « 1 » avec la valeur de champ maximale. Le chemin B le long de l'isolant et toutes les lignes de champ sont dans le même plan, qui est orthogonal à la fois à l'isolant et à la surface de l'électrode. Dans la modélisation 3D, le chemin le long de l'isolant est orthogonal à la « ligne triple » (rouge foncé) représentée par les valeurs de contrainte élevées.

à la surface d'un isolant à la suite d'une décharge. Des essais ainsi que des simulations du premier principe ont confirmé le concept et la nature de ce phénomène, en particulier sa capacité à éliminer les apparitions de streamer qui l'accompagnent et à éviter le claquage dans les essais au choc de foudre [6]. Un des modèles de VHVLab permet de calculer simplement l'effet des charges de surface dans des dispositifs à la géométrie 3D très complexe. L'analyse de la charge de surface a l'intérêt d'expliquer, chiffres à l'appui, pourquoi certains appareils réussissent l'essai au choc de foudre alors même que les calculs omettant ce paramètre prédisent un claquage [7].

Perspectives de développement

VHVLab offre un environnement de simulation pour appareillages MT accessible même aux non-spécialistes. Le flux de développement inclut des itérations rapides et structurées pour tester diverses configurations, ce qui réduit la dépendance vis-à-vis des laboratoires et des essais physiques. Pour autant, VHVLab n'est pas (encore) un banc d'essai virtuel 100 % automatisé, où il suffirait d'appuyer sur un bouton pour simuler et visualiser une décharge. L'outil propose un jeu de procédures numériques et de règles empiriques dans lequel peuvent piocher les ingénieurs pour évaluer, visualiser et comprendre les phénomènes de décharge. VHVLab s'impose ainsi comme un outil de génie électrique, mais aussi comme une base de connaissances qui rassemble l'expérience des chercheurs et des développeurs, et pose les bases des essais numériques du futur. •

Remerciements
Ont contribué au développement de VHVLab les collègues du centre de recherche institutionnel et des centres de recherche sur les technologies d'électrification du Groupe, ainsi que les partenaires académiques et organismes suivants : universités techniques de Munich, d'Eindhoven (Pays-Bas) et de Rapperswil (Suisse), École polytechnique fédérale de Zurich, Centre de mathématiques et d'informatique d'Amsterdam, université de Tartu (Estonie), université norvégienne de science et de technologie et SINTEF (tous deux situés à Trondheim). Qu'ils en soient tous remerciés.

—
Bibliographie

[1] Attar, E., *et al.*, « La coupure d'arc s'affranchit du SF_6 », *ABB Review,* 2/2021, p. 72–77.

[2] Blaszczyk, A., *et al.*, « Tout bénéfice ! Marier CAO et Intranet pour le meilleur de la performance à moindre coût », *ABB Review,* 1/2002, p. 35–42.

[3] Simka, P., *et al.*, « Air breakdown at sharp edges », *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD),* p. 885–888, 2018.

[4] Støa-Aanensen, N. S., « Initial testing of breakdown voltage, 50 Hz stresses on triple junction setup », *Rapport interne SINTEF Energy Research AN 15.14.64* , Trondheim (Norvège), 2015.

[5] Chvyreva, A., *et al.*, « Raether-Meek criterion for prediction of electrodeless discharge inception on a dielectric surface in different gasses », *Journal of Physics D: Applied Physics,* vol. 51, n° 11, p. 1–11, 2018.

[6] Meyer, H. K., *et al.*, « Surface charging of dielectric barriers in short rod-plane air gaps – experiments and simulations », *2018 IEEE Conference on High-voltage Engineering and Application (ICHVE),* Athènes (Grèce), p. 1–4.

[7] Blaszczyk, A., *et al.*, « Surface Charging Models for Prediction of Withstand Voltage in Medium Voltage Range," *Proceedings of 19th Conference on Electromagnetic Field Computations (CEFC),* Pise (Italie), 16-18 novembre 2020.

ÉNERGIE ACTIVE

Véhicules particuliers, transports collectifs, ports : le transport s'électrifie

Inséparable d'une réduction de la pollution atmosphérique et sonore en ville, portée par la recherche d'une meilleure qualité de vie et, surtout, par la prise de conscience de l'urgence climatique, la demande en véhicules électriques de tous types explose dans le monde entier.

Alessandro Di Nicco
ABB Electric Vehicle Infrastructure
Terranuova Bracciolini (Italie)

alessandro.dinicco@it.abb.com

Diego Pareschi
ABB Electric Vehicle Infrastructure
Delft (Pays-Bas)

diego.pareschi@nl.abb.com

Kumail Rashid
ABB Electric Vehicle Infrastructure
Singapour

kumail.rashid@sg.abb.com

C'est dans le transport de personnes que l'électrification est la plus remarquable. Ainsi, selon les perspectives 2020 de BloombergNEF [1], le nombre de véhicules électriques (VE) de tourisme vendus chaque année atteindra 26 millions en 2030 ; de leur côté, les flottes de bus seront 100 % électriques dès la fin de cette décennie [2].

Cette transition ne concerne pas que le transport de personnes ou de marchandises. D'autres applications se prêtent très bien à l'électrification, comme celles dont s'acquittent les engins autoguidés, ou AGV.

Ces derniers ne manquent pas d'atouts : autonomes, ils libèrent un personnel qui peut être mieux affecté ; leur performance et les coûts qu'ils engendrent sont prévisibles ; opérationnels en continu, ils améliorent le niveau global de sécurité dans l'environnement automatisé où ils évoluent.

Face à cette prolifération de VE, les infrastructures de recharge doivent suivre le rythme. Dans ce domaine, ABB peut se targuer d'une longue expérience en développement, installation, mise en service et maintenance, que complète aujourd'hui son partenariat privilégié avec les principaux équipementiers de VE et les exploitants de réseaux de recharge nationaux.

ABB est le partenaire privilégié des principaux équipementiers de VE et exploitants de réseaux de recharge nationaux.

C'est cette assise qui a convaincu de grandes sociétés et des organismes publics de faire appel à ABB pour le déploiement de leurs infrastructures de recharge destinés aux transports en commun, aux véhicules particuliers ou aux AGV, comme l'illustrent les trois exemples qui suivent.

Bibliographie

[1] BloombergNEF, *Electric Vehicle Outlook 2020*, disponible sur : https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/#toc-download (consulté le 11 novembre 2020).

[2] Cunningham, N., « EVs to make up third of market in 2040, e-buses to dominate end 2020s », disponible sur : https://energypost.eu/evs-to-make-up-third-of-market-in-2040-e-buses-to-dominate-end-2020s/, 28 mai 2018 (consulté le 11 novembre 2020).

MILAN : ALLER SIMPLE VERS UN AVENIR PROPRE

La métropole industrielle du nord de l'Italie, peuplée de plus de trois millions d'habitants, prévoit de remplacer ses 1200 bus diesel par des modèles 100 % électriques flambant neufs d'ici à 2030.

À cette date, tout le réseau de transport en commun milanais, y compris les tramways et le métro, sera électrique. La régie municipale des transports publics Azienda Trasporti Milanesi (ATM), qui exploite 158 lignes de bus couvrant 1550 km, estime que cette électrification permettra de réduire chaque année la consommation de gasoil de 30 millions de litres et les émissions de CO_2 de 75 000 tonnes.

En outre, ATM s'est engagée à consommer exclusivement une électricité d'origine renouvelable et certifiée zéro émission. Évalué à plus de 1,5 milliard d'euros, ce plan de conversion du réseau de bus à l'électrique, y compris l'installation de l'infrastructure de recharge, fait suite à l'engagement pris par la ville à l'occasion de la COP21.

Trois des cinq dépôts de bus de la ville seront ainsi convertis en plates-formes de recharge pour les bus et l'importante flotte de véhicules utilitaires. Quatre nouveaux dépôts seront construits en parallèle. L'une des plates-formes est également en train d'être équipée de bornes de recharge ABB de 100 kW →**01** ainsi que de transformateurs modulaires et colonnes de recharge à branchement direct ABB, tous pilotés par des algorithmes conçus pour optimiser le processus tout en minimisant la consommation. Un système de parking automatisé qui optimisera les arrivées et départs de véhicules permettra également de réaliser des économies d'énergie substantielles.

D'ici à fin 2021, la ville espère exploiter 167 bus entièrement électriques et équiper 8 terminus de ligne de pantographes 200 kW, chacun capable de fournir 35 kWh en une recharge éclair de 8 à 10 minutes — plus qu'il n'en faut au bus pour revenir tranquillement au dépôt, quels que soient les besoins en chauffage ou en climatisation.

Quant aux véhicules eux-mêmes, ils rouleront sans émissions grâce des batteries à l'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (NMC) de 240 kWh, garantes d'une autonomie de 180 km dans les conditions les plus exigeantes. La recharge intégrale s'effectuera en 5 heures, toutes les nuits, au dépôt.

Un rapport McKinsey & Company de 2018 [1] classe Milan au rang des dix premières villes au monde en matière de mobilité urbaine, sur la base de critères comme la disponibilité, l'accessibilité, l'efficacité, la commodité et la durabilité, avant, durant et après un trajet, mais aussi l'avis des usagers.

01 D'ici à 2030, la ville de Milan prévoit de déployer 1200 nouveaux bus 100 % électriques, qui se rechargeront en cinq heures grâce à des bornes ABB installées dans les dépôts.

01

Bibliographie

[1] McKinsey & Company, *Elements of success: Urban transportation systems of 24 global cities*, disponible sur : https://www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/Business%20Functions/Sustainability/Our%20Insights/Elements%20of%20success%20Urban%20transportation%20systems%20of%2024%20global%20cities/Urban-transportation-systems_e-versions.ashx, juin 2018.

RECHARGE RAPIDE : PARTOUT, À TOUTE HEURE

Le Japon veut moderniser ses infrastructures de recharge et accélérer sa transition vers une mobilité durable. Alors que les véhicules électriques ou hybrides rechargeables ne représentaient que 1 % du parc nippon en 2018, le pays voudrait faire passer cette proportion à 20–30 % à l'horizon 2030 [2].

Dans cette optique, la coentreprise e-Mobility Power Co (eMP), qui associe TEPCO (Tokyo Electric Power) et Chubu Electric Power, deux des plus grands fournisseurs d'énergie japonais, a retenu le nouveau chargeur Terra 184 d'ABB. Ce modèle compact de forte puissance sera installé sur des bornes publiques, en voirie ou ailleurs dans tout le pays, où il permettra une recharge rapide et pratique, en tout temps et en tous lieux. Fin 2020, eMP a déjà amorcé le remplacement des anciens chargeurs par 250 unités Terra 184.

Ce dernier-né de la gamme ABB de chargeurs rapides en courant continu peut alimenter deux véhicules en même temps. D'une puissance de 180 kW, divisible en deux charges de 90 kW, il convient aux systèmes de batteries haute tension des futurs modèles de VE auxquels il procure, en moins de 8 minutes, une autonomie d'une centaine de kilomètres.

Terra 184 s'appuie sur le standard CHAdeMO, développé principalement par TEPCO, premier actionnaire de la coentreprise, ainsi que sur le protocole de communication OCCP destiné à la supervision et la maintenance à distance des bornes de recharge.

Grâce à cette double conformité normative, gage d'interopérabilité, Terra 184 peut se connecter via la plate-forme numérique ABB Ability™, qui couvre toute la chaîne de communication industrielle, du dispositif au cloud en passant par la périphérie de réseau. Contrôle-commande centralisé, mises à jour et maintenance logicielles réactives partout dans le monde sont autant de caractéristiques incontournables pour un déploiement rapide des infrastructures de recharge électrique. L'exploitant peut ainsi mieux comprendre et analyser les statistiques de consommation à l'échelle du chargeur, du site et du réseau [3].

L'utilisateur n'est pas en reste : fortement personnalisable, Terra 184 est fourni avec un écran et un terminal de paiement par carte bancaire →**02**. Cette solution de recharge sûre, intelligente et durable, qui s'inscrit dans l'objectif « Zéro émission » qu'ABB s'est fixé pour tous ses projets d'électrification, est commercialisée directement par le Groupe en Europe et en Amérique du Nord.

02 Le chargeur Terra 184 propose des options personnalisables, comme un écran et un terminal de paiement par carte bancaire.

02

Bibliographie

[2] ABB, « Terra 184 chargers to support modernization of Japan's EV charging infrastructure », disponible sur : https://new.abb.com/news/detail/66110/abbs-terra-184-chargers-to-support-modernization-of-japans-ev-charging-infrastructure (consulté le 24 novembre 2020).

[3] Anzaldua, A., « ABB chargers to boost modernization of Japan's EV charging », disponible sur : https://eepower.com/news/abb-chargers-to-boost-modernization-of-japans-ev-charging/ (consulté le 24 novembre 2020).

03a

03b

—
03 Le port de Tuas, à Singapour, comptera bientôt un terminal à conteneurs entièrement automatisé.

03a Les 162 engins autoguidés électriques du terminal seront alimentés par l'infrastructure de recharge ABB.

03b Chaque station de recharge sera intégrée dans un conteneur « eHouse » associé à tout l'équipement électrique nécessaire pour offrir une solution complète de mobilité.

—

UNE INFRASTRUCTURE DE RECHARGE POUR LE PORT DE SINGAPOUR

L'électrification et la percée des véhicules autonomes sont les deux grands moteurs de la mobilité sous toutes ses formes.

Singapour va combiner ces deux technologies dans le port de Tuas qui, d'ici à 2040, devrait posséder le plus grand terminal à conteneurs entièrement automatisé au monde. Avec une capacité annuelle de 65 millions EVP (équivalent vingt pieds), ce dernier marquera un jalon important dans le développement de la cité-État [4].

Prévu pour une mise en service à périmètre réduit fin 2021, le terminal verra le déploiement progressif sur deux ans d'une flotte de 162 engins autoguidés (AGV) électriques pour gérer le déplacement des gros conteneurs de transport. Ces véhicules seront alimentés par l'infrastructure de recharge en courant continu du port, fournie par ABB →**03a**. C'est aussi le Groupe qui, en partenariat avec la branche Land Systems de ST Engineering, a été retenu par l'autorité portuaire PSA de Singapour pour la fourniture et la mise en service de 18 stations intégrées de recharge rapide (avec fonctions d'autodiagnostic et de tolérance aux pannes) destinées à la flotte d'AGV.

Chacune sera installée dans un conteneur « eHouse » sur châssis mobile préfabriqué, qui embarque également des appareillages moyenne et basse tension, un transformateur et des chargeurs haute puissance de 450 kW, ainsi que les équipements de contrôle-commande correspondants [5]. Cette configuration regroupant chargeur et infrastructure électrique constitue une solution d'électromobilité complète →**03b**.

Les dispositifs de connexion par pantographe pour VE lourds de la gamme ABB étant inenvisageables, en raison de l'obstacle que constitue le conteneur entre le pantographe et l'AGV, ce sont des connecteurs Stäubli à broches latérales, spécialement conçus pour l'occasion, qui assureront la connectique de charge. Chaque véhicule communiquera avec l'infrastructure de recharge sous protocole normalisé, ouvert et universel, CCS (Combined Charging System).

Avec ses systèmes de gestion de flotte, PSA centralisera la surveillance de l'état des stations de recharge du port et du niveau des batteries des AGV, et planifiera les recharges en conséquence. Dès qu'un véhicule arrivera à la station qui lui est assignée, il signalera sa présence pour lancer la recharge.

Ce projet fera date pour ABB puisque c'est la première fois que ses chargeurs seront utilisés par une flotte de véhicules autonomes à vocation commerciale. •

—
Bibliographie

[4] ABB, « Smart charging infrastructure for Singapore port's automated guided vehicles », disponible sur : https://new.abb.com/ news/detail/63868/smart-charging-infrastructure-for-singapore-ports-automated-guided-vehicles (consulté le 24 novembre 2020).

[5] ABB, « ABB to electrify autonomous vehicles for new port in Singapore », disponible sur : https://new.abb.com/ news/detail/35893/abb-to-electrify-autonomous-vehicles-for-new-port-in-singapore (consulté le 24 novembre 2020).

ÉNERGIE ACTIVE

Disjoncteurs Tmax XT : taillés pour le numérique

Le nouveau disjoncteur en boîtier moulé SACE Tmax XT d'ABB, modèle de performance, de simplicité et de connectivité, assure une protection fine et globale de la distribution électrique tout en en facilitant l'installation, la gestion d'énergie et la maintenance.

01

Eumir Rizzi
ABB Electrification
Bergame (Italie)

eumir.rizzi@it.abb.com

Les premiers disjoncteurs se composaient d'un simple déclencheur magnétothermique, capable de détecter un niveau de courant supérieur à un seuil donné et d'actionner un interrupteur en cas d'échauffement ou de court-circuit. À la fin des années 1980 sont apparus les premiers déclencheurs électroniques à transformateurs de courant. Au-delà de la simple détection ou mesure de courant, ils permettent d'intégrer un élément de commande au dispositif, telle une temporisation de déclenchement.

Ces dernières années, la multiplication des appareils connectés et la complexification du contrôle-commande ont augmenté les besoins de surveillance et, de fait, accéléré le développement des disjoncteurs. Les capteurs de courant à bobine dans l'air ont remplacé les transformateurs d'intensité à circuit ferromagnétique, avec l'avantage d'une précision accrue de la mesure sur toute la plage de fonctionnement du déclencheur, soit dans bien des cas jusqu'à 12 fois son courant nominal. Les composants électroniques modernes permettent également d'intégrer la mesure de tension au disjoncteur sans passer par un transformateur : un gain de place et de temps d'installation !

Les progrès continus de l'intégration fonctionnelle ont rendu caducs bon nombre des transformateurs, compteurs, câbles, borniers et gaines qui encombraient les tableaux électriques.

Plus qu'une simple protection

Les déclencheurs de dernière génération embarquent des fonctions de mesure qui permettent de déployer une architecture de comptage complète, sans augmenter la complexité ni l'encombrement du réseau de distribution. Un progrès qui rend possible l'échantillonnage d'un plus grand nombre de variables, à des fréquences de l'ordre du kilohertz, ainsi que leur numérisation immédiate et leur traitement direct par le déclencheur lui-même. Si ce dernier intègre

Grâce aux composants électroniques modernes, la mesure de tension peut s'intégrer au disjoncteur.

—
01 Disjoncteurs en boîtier moulé Tmax XT

un enregistreur de données, il est alors possible de sauvegarder les valeurs de courant, de tension et d'autres paramètres à des fins d'analyse, de visualisation ou de chargement sous différents formats dans d'autres appareils.

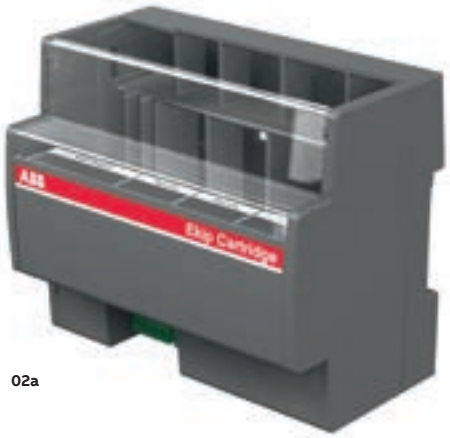
En dépit de sa complexité fonctionnelle, le nouveau disjoncteur en boîtier moulé SACE Tmax XT d'ABB se distingue par son ergonomie et sa simplicité d'utilisation, qui combleront les attentes des utilisateurs.

Gamme SACE Tmax XT
Les disjoncteurs en boîtier moulé Tmax XT →01, capables de couper des courants de 160 à 1600 A, offrent une performance, une protection et une précision de mesure inégalées par la concurrence. Le déclencheur de protection Ekip Touch d'ABB les enrichit d'interfaces numériques et analogiques préconfigurées ou paramétrables. L'association Tmax XT-Ekip Touch atteint des niveaux de performance auparavant réservés aux multimètres ou analyseurs de réseau : la précision de la mesure de tension, d'énergie, de puissance et d'harmoniques (jusqu'au 50e rang) est supérieure à 99 %, avec un seuil de détection inférieur à 0,4 % du courant nominal.

Le Tmax XT embarque des modules enfichables pour la mesure de température (thermocouples), de vibration, de pression ou encore de tension sur une autre ligne électrique. En fait, n'importe quel capteur 4–20 mA peut s'interfacer à au Tmax XT via le déclencheur Ekip Touch →02–03. Les informations obtenues sont alors traitées directement par le déclencheur aux fins d'alarme, de commande ou d'ouverture du disjoncteur. Plus besoin de les transférer à un superviseur sur un bus de communication !

Architecture unifiée
Le disjoncteur Tmax XT, qui abrite les déclencheurs électroniques les plus précis au monde, reprend l'architecture de l'Emax 2, premier disjoncteur ouvert basse tension « communicant ». Les similitudes ne s'arrêtent pas là : Tmax XT et Emax 2 partagent aussi les mêmes logique, fonctionnalités et interfaces, comme l'ensemble des disjoncteurs ABB. Pour l'utilisateur, c'est un gain de temps et la garantie d'une installation de qualité.

—
Tmax XT offre une performance, une protection et une précision de mesure inégalées.



02a

02b

L'information à portée de main
Les déclencheurs du Tmax XT disposent d'un écran tactile couleur alimenté par une batterie interne ; il est ainsi possible de consulter l'écran même lorsque l'appareil est hors tension et de parcourir les menus pour accéder aux données de déclenchement et comprendre ce qui s'est passé avant de réenclencher le disjoncteur.

Les icônes de l'écran ressemblent à celles de nos tablettes ou smartphones, si bien que l'utilisateur n'est pas dépaysé et peut facilement exécuter des fonctions complexes directement depuis cette interface, ou encore mettre à profit les communications Bluetooth du déclencheur Ekip Touch pour envoyer les valeurs remontées des différents capteurs vers un smartphone équipé de l'appli gratuite Epic →04 et, à l'inverse, faire redescendre les réglages du smartphone vers le disjoncteur.

Communication
Les données collectées par le Tmax XT ont d'autant plus de valeur quand elles sont agrégées à celles d'autres disjoncteurs installés dans divers sites. Deviennent ainsi possibles des comparaisons et des analyses globales, à condition bien sûr de disposer d'un moyen de transmission. Le déclencheur Ekip Touch, qui s'enfiche sur le Tmax XT, lui donne accès à toute la puissance du système de gestion de la distribution électrique ABB Ability™ Electrical Distribution Control System (EDCS). Forte de plus d'une dizaine de protocoles de communication, la plate-forme de cloud EDCS permet à l'utilisateur de surveiller et de gérer en temps réel la distribution électrique du site depuis son smartphone, sa tablette ou son ordinateur, afin d'optimiser sa consommation et ses dépenses énergétiques. Des coupleurs Modbus RTU, Profibus DP ou DeviceNet peuvent venir s'enficher sur le disjoncteur pour élargir les possibilités de communication.

—

Le client peut choisir un module Modbus pour une intégration rapide des nouveaux produits dans l'existant.

03

—
02 Les modules Ekip élargissent le spectre fonctionnel du disjoncteur Tmax XT.

02a Ekip Cartridge est un module externe, encliquetable sur profilé normalisé 35 mm, pour raccorder des accessoires au déclencheur Ekip Touch et au Tmax XT.

02b Ekip Signalling 3T, qui s'enfiche sur le module Ekip Cartridge, fournit trois entrées analogiques pour sondes thermique et une entrée analogique pour boucles de courant 4–20 mA.

—
03 Le déclencheur Ekip Touch est compatible avec diverses tailles du disjoncteur Tmax XT, comme ici le Tmax XT5 à 3 pôles.

—
04 L'application Epic tourne sur la plupart des smartphones actuels.

—
05 Le Tmax XT peut recevoir de nombreux modules Ekip Com pour offrir un large choix de protocoles de communication.

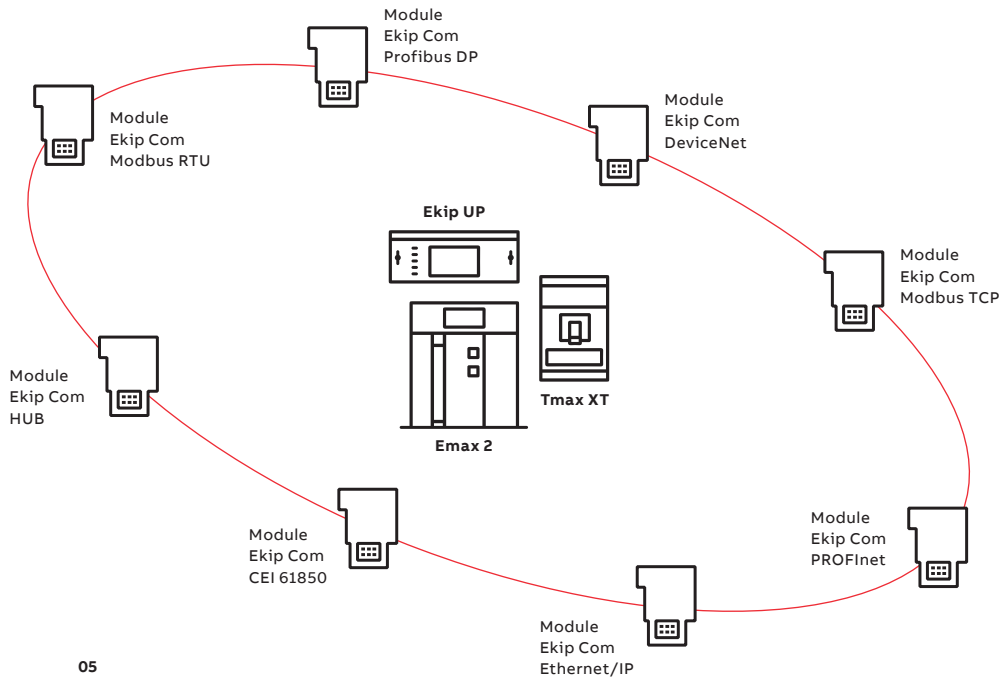
Le client est ainsi en mesure de choisir le bus de terrain le mieux adapté à ses besoins : Modbus pour une intégration rapide des nouveaux produits dans les systèmes existants, Profibus DP pour les automatismes exigeant des vitesses de transmission très élevées, jusqu'à 12 Mbit/s. Les disjoncteurs peuvent aussi se raccorder à Ethernet, grâce à des coupleurs Modbus TCP/IP à 100 Mbit/s qui font office de serveurs web pour accéder aux données stockées dans le déclencheur depuis n'importe quel navigateur.

Ouverture sur le monde

La norme CEI 61850 s'est imposée comme LE protocole de communication dédié au contrôle-commande et à la protection des réseaux électriques. Un disjoncteur doit réagir très rapidement sur détection d'un défaut ; c'est pourquoi le Tmax XT intègre les deux services de messagerie à faible latence décrits dans la CEI 61850 : MMS (« Manufacturing Message Specification ») pour la communication verticale et GOOSE (« Generic Object Oriented Substation Event ») pour la communication horizontale.

04

Cette connectivité fait évoluer la stratégie de maintenance : de réactive, voire curative, elle devient prédictive. Plus besoin d'attendre le déclenchement du disjoncteur puisqu'il suffit d'analyser les données d'un ou de plusieurs appareils pour intervenir avant apparition du défaut.



05

06

Autre possibilité offerte par ce disjoncteur communicant : la télésurveillance et la conduite en temps réel de l'installation, fonctions clés des réseaux électriques du futur. Plusieurs déclencheurs Ekip dotés de modules spécifiques →05 permettent d'exécuter une logique de commande, de configurer un réseau ou de piloter des générateurs, entre autres possibilités. Enfin, l'ajout d'un module Ekip Com HUB au déclencheur permet de centraliser les données issues de plusieurs disjoncteurs et de raccorder le réseau à un cloud distant géré par ABB.

Pour des installations écologiques

Tout industriel qui souhaite optimiser son efficacité énergétique, réduire sa facture et éviter les pénalités pour dépassement de puissance souscrite ne peut faire l'impasse sur la maîtrise de la consommation électrique à chaque échelon de l'usine. De même, la comparaison de données multisites peut aider à mettre le doigt sur les meilleures pratiques applicables à toute l'entreprise.

Autre argument en faveur d'une régulation fine de la puissance : les normes de construction durable et écologique deviennent incontournables dans de nombreux pays pour le résidentiel et le tertiaire (hôpitaux, centres commerciaux, datacenters, etc.). Aux États-Unis, la certification « Green Mark Platinum », plus haute distinction en matière d'efficacité énergétique, figure de plus en plus souvent dans le cahier des charges du constructeur.

Avec sa connectivité intégrée, le disjoncteur Tmax XT est le dispositif idéal pour un suivi énergétique aussi poussé. L'utilisateur accède en toute simplicité, via son smartphone, sa tablette ou son ordinateur, à la plate-forme cloud ABB

—

Trois scénarios de fonctionnement cloud sont possibles, chacun avec des implications de sécurité spécifiques.

Ability EDCS pour surveiller, optimiser, piloter et prédire l'évolution du système électrique →06. L'exactitude des données de mesure facilite la surveillance des appareils et aide à identifier les gisements d'économies. Le régulateur de puissance embarqué permet à cette fin de réduire la consommation électrique, de réaliser un diagnostic énergétique de qualité en vue de la certification Green Mark et de diminuer d'autant les dépenses d'audit externes.

Cybersécurité

Le cloud peut aider les architectures à grandir, améliorer la flexibilité des interconnexions entre appareils d'anciennes et de nouvelles générations, et pérenniser les investissements. Pour autant, toute architecture distribuée, par l'augmentation de son périmètre d'action, augmente l'exposition aux cybermenaces, intentionnelles comme accidentelles. ABB a développé sa plate-forme de cloud en partenariat avec Microsoft dans le but de doper, de fiabiliser et de sécuriser la distribution électrique →07. Trois scénarios de fonctionnement sont possibles, chacun avec des implications de sécurité spécifiques :

- En mode « appareil vers cloud », le réseau dispose d'une liste blanche d'appareils autorisés à s'authentifier ; seule une mise en service locale est possible. Le canal de communication chiffré utilise le même protocole que les systèmes bancaires. Aucune commande ne peut transiter du cloud à l'usine.
- En mode « dans le cloud », la communication a lieu entre datacenters. Les données d'ABB et du client sont stockées dans des centres certifiés, répondant aux normes les plus strictes en matière de cybersécurité et protégés par la politique de sécurité du cloud Microsoft Azure.

— 06 Aperçu de la plate-forme cloud ABB Ability™ EDCS

— 07 Le Tmax XT allie connectivité, fiabilité et sécurité hors pair.

- En mode « navigateur vers cloud », l'accès aux données s'effectue après une authentification ABB par identification unique (SSO), assortie d'une autorisation spéciale. Les communications empruntent un canal chiffré et, là encore, aucun envoi de commande n'est possible du cloud vers l'usine.

Toutes ces mesures, qui tiennent compte de l'analyse des menaces potentielles, s'appuient sur les principes directeurs de sécurité et des analyses de code récurrentes. Cette stratégie de cyberdéfense fait de plus l'objet d'évaluations permanentes ; des tests d'intrusion sont régulièrement effectués pour vérifier sa robustesse.

Tourné vers l'avenir

La gamme de disjoncteurs Tmax XT n'a de cesse d'évoluer pour s'adapter à la diversité et à la complexité croissante de la protection électrique. Sa richesse fonctionnelle en fait une plate-forme intelligente, modulaire et polyvalente, à des années-lumière de son ancêtre des années 1980. La précision de la mesure, la vaste plage d'acquisition des données, la puissance de communication, la connexion au cloud et la cybersécurité ne sont que quelques-uns de ses points forts. Les disjoncteurs Tmax XT préfigurent les installations électriques de demain que les clients pourront doter d'un niveau d'« intelligence » sans précédent. •

Les multiples fonctionnalités du disjoncteur en font une plate-forme intelligente, modulaire et polyvalente.

07

01

ÉNERGIE ACTIVE

Nouveau système de connexion rapide ABB

Les tableaux ReliaGear® neXT et ReliaGear® SB d'ABB révolutionnent le raccordement des appareillages électriques. Leur architecture modulaire, couplée aux disjoncteurs ABB SACE® Tmax® XT, participe grandement à la fiabilité et à la qualité de l'installation.

Bhavya Kapadia
Kiran Bhattar
Harshada Nagare
ABB Smart Power
Hyderabad (Inde)

bhavya.kapadia@in.abb.com
kiran.bhattar@in.abb.com
harshada.nagare@in.abb.com

Tim Ford
ABB Smart Power
Cary (Caroline du Nord, États-Unis)

tim.ford@us.abb.com

Steven Greenwald
ABB Smart Power
Plainville (Connecticut, États-Unis)

steven.greenwald@us.abb.com

Dans l'industrie, la majorité des raccordements électriques utilise des connecteurs enfichables ou boulonnés, qui ne sont pas toujours sans inconvénients. Les assemblages boulonnés, par exemple, peuvent se desserrer au fil du temps, engendrant une augmentation des contraintes thermiques (échauffement, entre autres), mais aussi la formation d'arcs électriques et des courts-circuits. L'état des connexions électriques est donc déterminant pour la sécurité, la performance, la fiabilité et la longévité d'une installation. Des enjeux auxquels répond ABB avec sa nouvelle solution de raccordement enfichable, ultrarapide et sûre, ReliaGear →01.

ReliaGear neXT et ReliaGear SB

Le système de raccordement et de montage des tableaux ReliaGear d'ABB apporte un progrès notable par rapport aux jonctions boulonnées classiques. L'innovation réside principalement dans un jeu de barres vertical fixe doté de rainures de montage →02 dans lesquelles les connecteurs (côté réseau) des disjoncteurs appairés viennent directement se clipser, grâce à leur géométrie adaptée →03. Alors que les forces dues aux courants de défaut ont tendance à desserrer les connexions classiques, ReliaGear les exploite intelligemment pour renforcer cette connectique.

La nouvelle solution enfichable ReliaGear optimise les performances du raccordement électrique.

Disjoncteur et connecteur côté réseau constituent un ensemble ReliaGear préfabriqué. Adieu la complexité des kits de pièces, straps et autres accessoires de raccordement sur le terrain : l'installation est simple et directe.

ReliaGear est une marque déposée d'ABB Inc. ; tous droits réservés.
SACE et TMax sont des marques déposées d'ABB S.p.A. ; tous droits réservés.

—
01 Face avant du tableau ABB ReliaGear neXT, en position fermée

—
02 Connecteurs enfichables

—
03 Les appareils (ici, un disjoncteur) se montent en un tour de main.

Montage

La modularité du tableau ReliaGear neXT joue un rôle clé dans la rapidité de raccordement de l'appareillage. À l'arrière du disjoncteur, un étrier de fixation en acier sert de plaque d'appui et de levier pour bien positionner l'appareil, puis le clipser dans le jeu de barres vertical. Reste à le verrouiller en place à l'aide des vis de montage facilement accessibles, à travers l'étrier. Nul besoin de recourir à un outillage spécial ni de vérifier le couple de serrage de la connexion. Le connecteur est conçu de manière à faciliter l'alignement de l'ensemble et soutenir les clips lors de la pose et de la dépose du disjoncteur.

Les profilés de la gamme neXT disposent de rainures équidistantes qui simplifient l'installation d'appareils de différentes largeurs et longueurs. Ils peuvent accepter n'importe quel appareil équipé d'étriers de fixation dont les rainures viennent s'enclencher dans les perforations du profilé pour se monter sur le jeu de barres. À l'inverse, un appareil trop grand ne trouvera pas sa place dans le tableau.

—

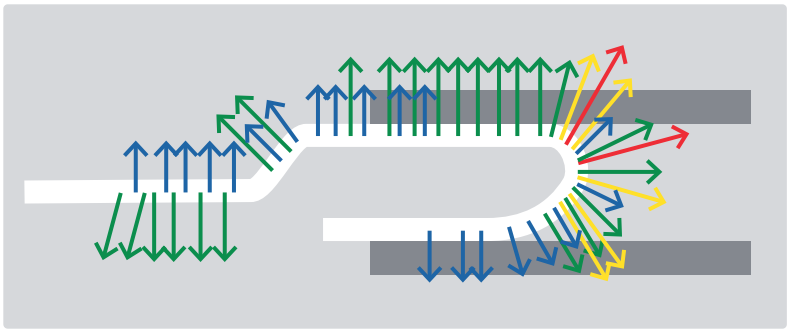
La modularité du tableau ReliaGear neXT joue un rôle clé dans la rapidité de raccordement de l'appareillage.

Par leur écartement « x » (nombre de positions de montage), ces rainures conviennent à plusieurs largeurs d'appareil. Chaque châssis de disjoncteur a ses propres spécifications « x », tout comme les accessoires montés sur les barres. Des entretoises sont également prévues pour combler les espaces vides.

Une fois l'appareil monté sur le profilé, le trou du châssis s'aligne avec le trou de boulon de

02

03



04

l'étrier pour permettre le passage et le serrage des vis. Cette conception ingénieuse garantit un positionnement parfait et un enclenchement à fond des appareils, tout en préservant l'intégrité des contacts. Au montage, les forces d'insertion s'adaptent au courant maximal admissible de l'appareil : les disjoncteurs de faible intensité peuvent alors s'enficher sans grand effort ni soutien, tandis que les gros appareils, plus lourds, sont supportés par le tableau ReliaGear neXT jusqu'à leur insertion complète.

S'il faut une bonne dizaine de minutes au technicien expérimenté pour monter un disjoncteur, le raccorder et vérifier les serrages avec une clé dynamométrique, moins de 30 secondes et un outillage simple suffisent pour ajouter le même disjoncteur au tableau ReliaGear neXT, sans toucher aux appareils voisins.

Performance en régime nominal…
Sur le connecteur réseau du disjoncteur, un ressort de compression intégré au clip maintient la pression de contact requise en conditions normales de fonctionnement. La technologie à ressort a l'avantage d'éviter le desserrage de la connexion dans le temps et le contrôle du filetage. Ce système de clipsage breveté ReliaGear exerce une force de contact reproductible et fiable, garante d'un raccordement sûr et robuste.

Quand on étudie la surface de contact des connexions électriques, il importe de tenir compte du ratio entre zone de contact apparente et zone de contact réelle. Si en toute logique ce rapport devrait être plus élevé sur une surface parfaite que sur un contact de ligne, l'expérience et le calcul montrent que c'est l'inverse qui se produit : grâce à la connectique à ressort de compression intégré, ce rapport passe de quelque 20 % avec la méthode traditionnelle à plus de 40 % avec ReliaGear neXT. Obtenir une surface de contact équivalente avec une liaison boulonnée classique obligerait à serrer le connecteur à fond, au risque de rigidifier l'ensemble et le rendre particulièrement vulnérable sur le terrain.

… et en court-circuit
Les forces électromagnétiques produites lors de courants de défaut peuvent altérer la résistance de la liaison boulonnée, et par voie de conséquence, dégrader ses performances thermiques. Dans un tableau ReliaGear, c'est l'effet contraire : les forces répulsives entre clip et barres sont annulées par les forces répulsives générées dans les bras du clip lui-même →04. Autrement dit, la répulsion se transforme en attraction. De même, la force de contact croît proportionnellement à l'intensité du courant, ce qui maintient le clip en place en cas de défaut et de court-circuit.

Moins de 30 secondes et un outillage standard suffisent pour équiper ReliaGear neXT d'un disjoncteur supplémentaire.

Tenue vibratoire
Les vibrations étant une importante source de défaillance de la connectique, ABB a soumis ReliaGear neXT à des essais de qualification sismique sur table vibratoire, avec des valeurs égales ou supérieures aux critères d'acceptation du code ICC-ES AC156 : une référence propre à garantir l'intégrité structurelle et fonctionnelle du tableau.

—
04 Diagramme vectoriel des forces répulsives dans un clip de fixation ReliaGear neXT et SB ; ces forces agissent sur les barres verticales, engendrant une compression progressive (représentée ici en bleu, vert, jaune et rouge) qui, en présence de courant fort ou de court-circuit, renforce la connexion.

—
05 Test par sonde étalonnée de la protection IP20 contre le toucher du jeu de barres par un doigt

Protection IP20

Les indices de protection IP, définis par la norme internationale CEI 60529, caractérisent le niveau de protection mécanique qu'offre une enceinte à la pénétration de corps solides (poussière, par exemple) et liquides (eau). En l'occurrence, les tableaux ReliaGear intègrent une barrière moulée qui protège certaines configurations de barres principales contre le contact accidentel d'objets de plus de 12,5 mm (soit environ le diamètre d'un doigt). La conception du tableau minimise également le risque qu'un corps étranger entre en contact avec le jeu de barres →**05**.

Un tableau sûr et fiable

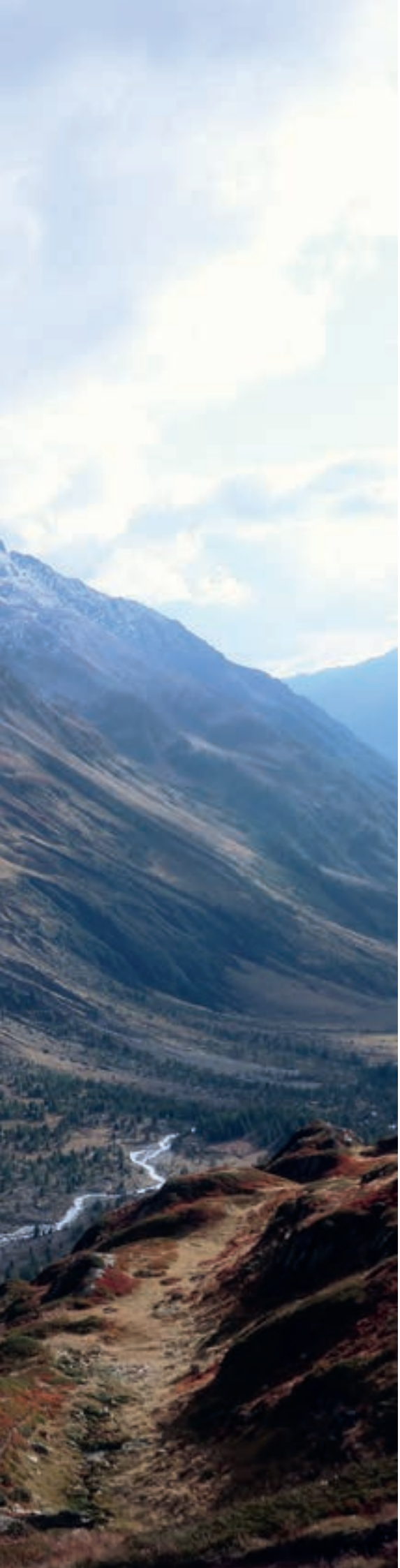
Le tableau ReliaGear neXT a été conçu et éprouvé pour accroître durablement la sécurité et la fiabilité, deux aspects essentiels de l'installation. Sa connectique surpasse les connexions embrochables utilisées de longue date dans la distribution électrique et le contrôle-commande industriel, et assure un meilleur rapport contact

—

ABB a soumis la connectique ReliaGear neXT à des essais sur table vibratoire pour en vérifier l'intégrité structurelle et fonctionnelle.

réel/contact apparent au courant nominal que les jonctions boulonnées. Elle exploite même les forces électromagnétiques résultant de conditions de défaut pour améliorer la liaison électrique. Bref, le tableau ReliaGear est gage de sécurité, de facilité, de rapidité, de qualité et de pérennité de l'installation électrique. •

05



Crédit photo : Michael Vogel

ÉNERGIE ACTIVE

La coupure d'arc s'affranchit du SF_6

Les appareillages électriques remplis d'un isolant moins nocif pour l'environnement que l'hexafluorure de soufre sont souvent équipés de sectionneurs coupe-charge à vide, lesquels ne sont pas sans inconvénients. La chambre de coupure à soufflage forcé promet d'y remédier en offrant une solution fiable, simple et peu coûteuse à mettre en œuvre.

—
Elham Attar
Magne Saxegaard
ABB Electrification
Skien (Norvège)

elham.attar@no.abb.com
magne.saxegaard@no.abb.com

Nitesh Ranjan
Jan Carstensen
Anciens collaborateurs ABB

L'hexafluorure de soufre (SF_6), gaz isolant au potentiel de réchauffement global désormais avéré, n'est plus le bienvenu dans les appareillages à isolation gazeuse (GIS), où on lui préfère des alternatives plus respectueuses de l'environnement. Dans ce domaine, la coupure dans le vide appliquée aux sectionneurs coupe-charge a concentré l'essentiel des efforts de recherche sur les problèmes thermiques et diélectriques inhérents à cette technologie [1–2]. Les interrupteurs à vide, plus coûteux, exigent de surcroît un inter-sectionneur supplémentaire, dont l'actionneur est un mécanisme complexe.

Une chambre de coupure à soufflage forcé pourrait apporter une solution fiable, simple d'emploi et peu coûteuse à mettre en œuvre →**01**.

Soufflage forcé avec isolant gazeux écoperformant

Un disjoncteur à soufflage forcé se compose

01

d'une chambre de compression et d'une chambre de coupure →02. Le piston, en se déplaçant, comprime le gaz et crée une surpression qui « souffle » l'arc électrique : le gaz sous pression est libéré dans la zone d'arc où il refroidit l'arc qui s'est formé entre les contacts. L'extinction se produit au premier passage par zéro du courant si l'écartement des contacts et le refroidissement sont suffisants pour résister à la tension transitoire de rétablissement (TTR). Celle-ci est due à l'énergie magnétique qui, en étant bloquée côté charge du disjoncteur, génère un courant entre les inductances et les condensateurs. C'est l'écart entre les valeurs de tension en amont et en aval du disjoncteur qui constitue la TTR.

Le SF_6 a des propriétés intrinsèques de refroidissement de l'arc et de rétablissement rapide du niveau d'isolement après la manœuvre du disjoncteur, qui en font un excellent gaz de coupure. Les substituts écocompatibles ont généralement de moins bonnes caractéristiques d'extinction d'arc et une moindre rigidité diélectrique, ce qui dégrade la performance de coupure, tant au niveau thermique que diélectrique.

ABB a conçu une chambre de coupure qui remédie à ces inconvénients en favorisant la formation d'un « point d'arrêt » de l'écoulement du gaz autour de la zone de formation d'arc. Une innovation qui améliore beaucoup la performance de coupure des alternatives au SF_6. Autre inconvénient des sectionneurs coupe-charge : la faible rigidité diélectrique entre les zones chaudes et froides, source de réamorçages. ABB a trouvé des solutions innovantes pour canaliser l'écoulement des gaz chauds et éviter ainsi tout réallumage de l'arc. Même si la performance de coupure était la préoccupation majeure du Groupe, les concepteurs du nouveau sectionneur coupe-charge ont aussi optimisé sa conception thermique et diélectrique. Résultat : un dispositif compact, rempli de gaz isolant écocompatible, qui n'a rien à envier à la technologie GIS au SF_6 en termes d'encombrement et de maintien des caractéristiques nominales.

Coupure thermique

La figure →03 illustre les différents schémas d'écoulement du gaz dans la zone d'arc d'une chambre de coupure. L'écoulement simple, où le gaz traverse directement le contact mobile et la buse pour aller vers le contact fixe, est le plus courant dans la coupure moyenne tension (MT) au SF_6. Toutefois, des essais à différentes charges et pressions de gaz ont montré que ses performances n'étaient pas à la hauteur des exigences des applications MT sans SF_6 [3].

Ont donc été envisagées deux autres architectures, à simple et double flux. Toutes deux comportent un point d'arrêt qui améliore notablement la performance de la coupure dans l'air par rapport à l'écoulement simple. On entend par « point d'arrêt » un endroit où la vitesse d'écoulement locale devient nulle et où la totalité de l'énergie cinétique est convertie en pression. Un principe couramment utilisé dans les disjoncteurs haute tension mais qui n'avait pas encore trouvé d'application commerciale dans les sectionneurs coupe-charge MT.

Le piston, en se déplaçant, comprime le gaz et crée une surpression qui souffle l'arc électrique.

Pendant la manœuvre d'ouverture, le piston monté sur le contact mobile comprime le gaz, générant une surpression dans la chambre de compression. Simultanément, la tulipe de contact d'arc est repoussée loin de la broche d'amorçage, ce qui provoque un arc et échauffe le gaz. L'élévation de la température « bouche » en partie l'ouverture de la buse, d'où une surpression encore plus élevée dans la chambre de compression.

—
01 La nouvelle chambre de coupure à soufflage forcé présente divers avantages sur le disjoncteur à vide utilisé dans de nombreux appareillages à isolation gazeuse, à l'image du SafePlus Air CCV d'ABB (2 disjoncteurs à vide + 1 interrupteur-sectionneur).

—
02 Vue en coupe d'une chambre de coupure à soufflage forcé

—
03 Les trois schémas d'écoulement du gaz

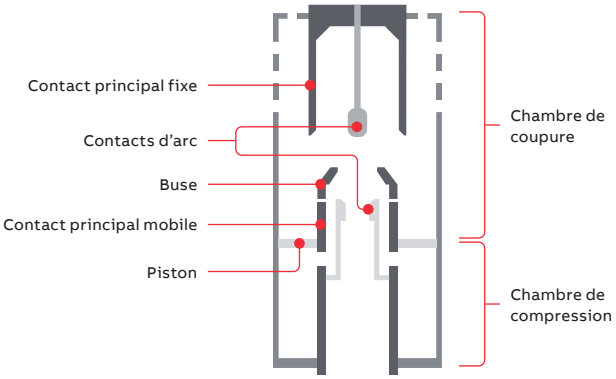
—
04 Cinétique de l'écoulement double flux lors d'une manœuvre d'ouverture

La conception originale de l'écoulement dans la zone d'arc améliore nettement les performances de coupure.

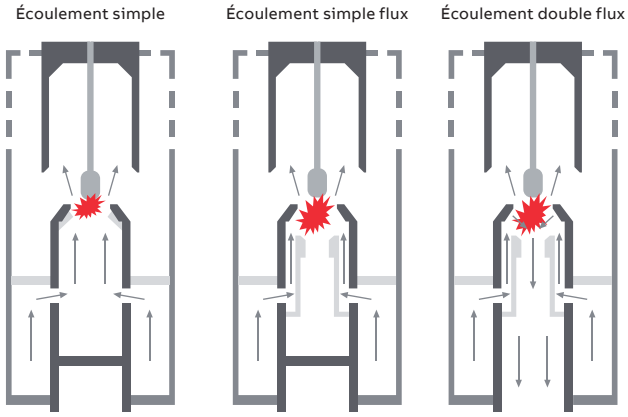
Au final, le gaz sous pression envahit la zone d'arc et contribue à l'extinction de ce dernier →04. Dans l'idéal, l'extinction devrait avoir lieu au premier passage par zéro du courant. La pression du gaz doit donc être suffisante pour souffler l'arc à ce moment. Des ouvertures sur mesure ont été pratiquées autour de la zone d'arc pour laisser entrer du gaz frais qui vient rapidement remplacer le gaz chaud éjecté.

La nouvelle architecture a tenu compte de nombreux paramètres susceptibles de jouer sur l'écoulement des gaz et sur la montée en pression à l'intérieur du disjoncteur, et donc de faire varier ses performances de coupure. L'interrupteur présenté ici utilise le gaz à la fois comme isolant et milieu d'extinction. La conception originale de l'écoulement dans la zone d'arc débouche sur une nette amélioration des caractéristiques de coupure.

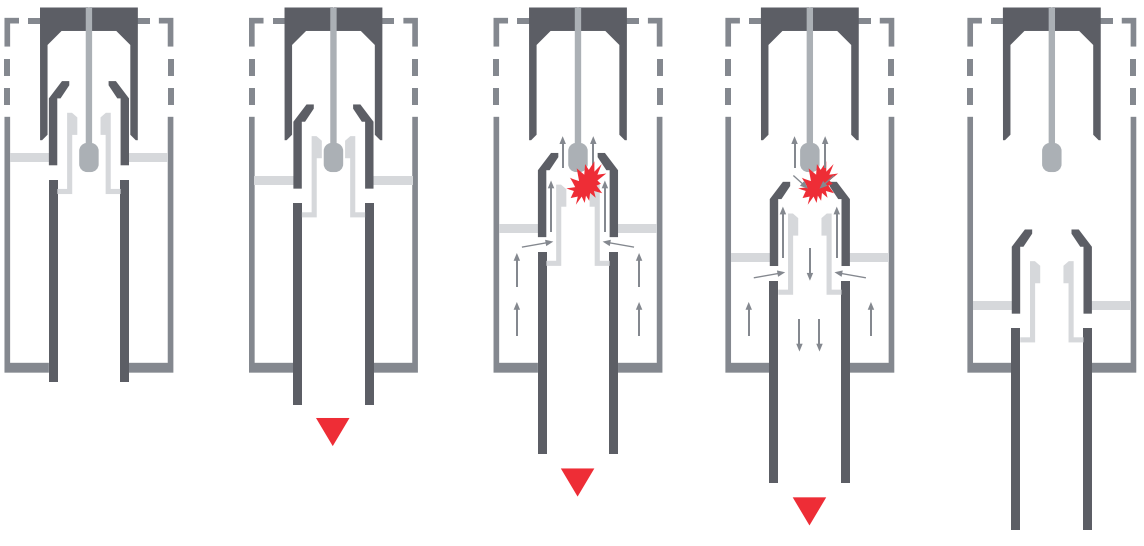
Réamorçage diélectrique
La phase diélectrique, qui se produit entre 10 et



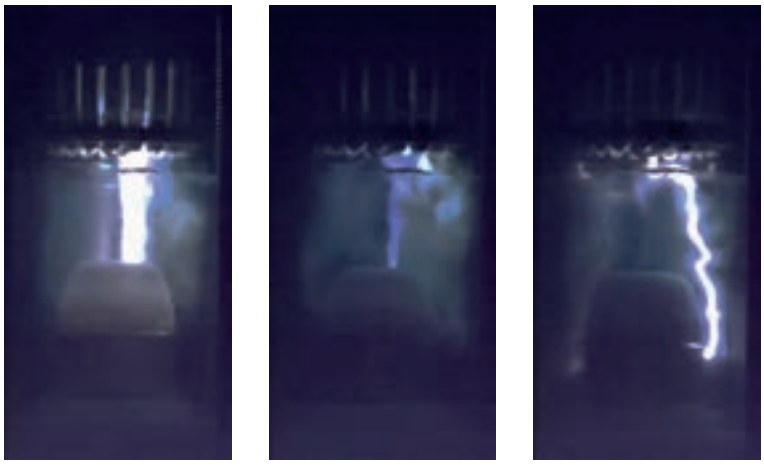
02



03



04



05

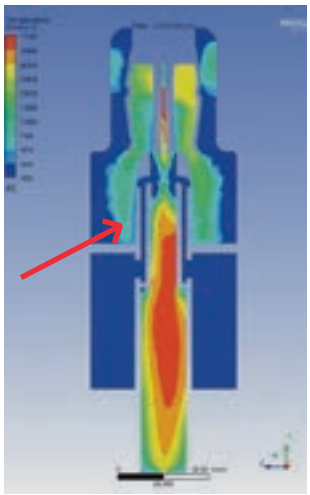
100 µs après le passage par zéro et se caractérise par un courant résiduel proche du zéro, peut donner lieu à des réamorçages si le mélange de gaz chaud et de vapeurs métalliques généré par l'arc reste au voisinage des contacts. En effet, la rigidité diélectrique du mélange est inférieure à celle du gaz isolant froid si bien que la hausse de la TTR est susceptible d'entraîner des réamorçages à l'intérieur ou à l'extérieur de la colonne de plasma →05. Des essais menés à différents stades du développement ont permis de quantifier la robustesse de la nouvelle architecture.

Outre les expériences en vraie grandeur, les ingénieurs ont à leur disposition un autre outil incontournable pour mener à bien les analyses des causes de défaillance et de sensibilité sur les nouvelles architectures des appareillages de coupure : la simulation numérique d'écoulement des fluides (CFD). Cette dernière permet de modéliser l'accumulation de gaz chauds autour des contacts dans une architecture double flux, à deux instants de formation d'arc différents →06. Dans l'idéal, les gaz chauds seraient expulsés loin du contact mobile principal ; autrement dit, il est essentiel de canaliser l'écoulement des gaz produits par la coupure de manière à éviter tout réamorçage de l'arc pendant la phase diélectrique. Pour cela, il est possible de dédoubler le contact d'arc fixe (broche d'arc) et de donner au contact principal fixe de nombreuses interfaces avec des évents de surpression. Par ailleurs, les sorties de gaz doivent être assez grandes pour éviter que le gaz chaud ne s'échappe vers le contact principal; toute modification des contacts ne doit pas se faire au détriment de la section minimale requise pour le passage du courant →07.

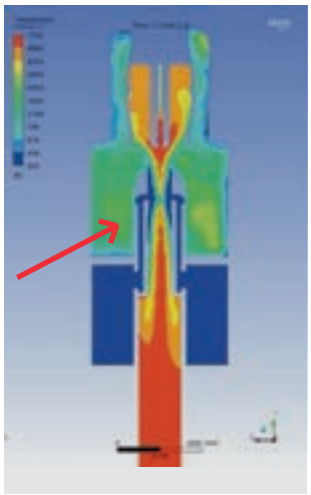
—

La modélisation CFD permet de soumettre les nouveaux développements à des analyses des causes de défaillance et de sensibilité.

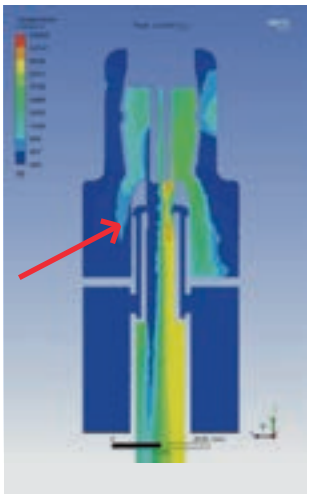
Des ouvertures pratiquées sur les contrôleurs de champ autour de la chambre de coupure permettent aux gaz chauds, vapeurs et autres produits générés pendant l'arc d'être transportés loin des régions soumises à un champ électrique élevé. Un bon point non seulement pour le refroidissement, mais aussi pour le maintien d'une rigidité diélectrique suffisante entre les phases.



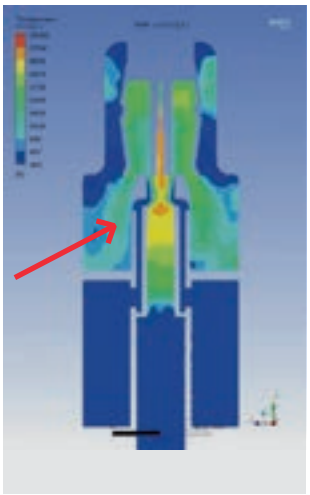
06a



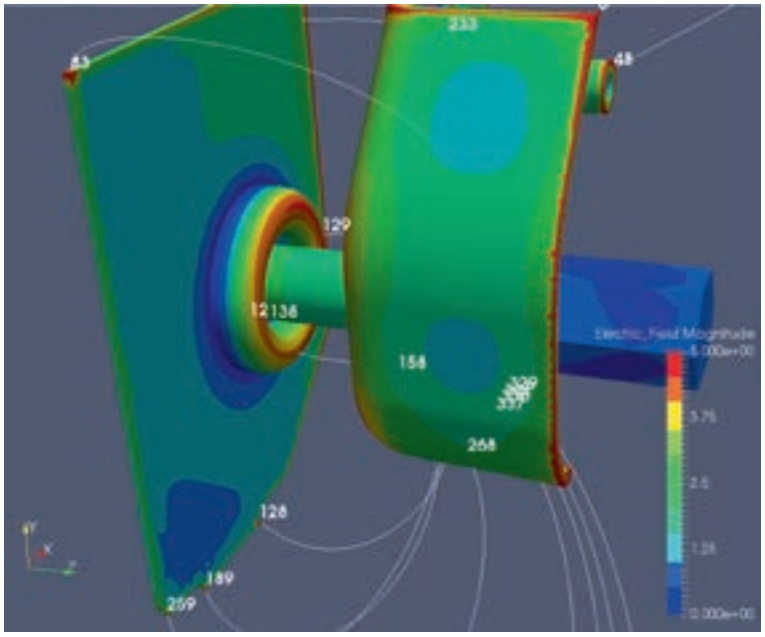
06b



07a



07b



08

Essais de type en vraie grandeur
Un tableau SafeRing/SafePlus Air d'ABB a été soumis à des séquences d'essais de coupure de « charge active » pour appareils de classes E3 et C2 normalisés CEI, à des valeurs nominales de 12 kV/630 A [6].

Une solution compétitive et facile à mettre en œuvre
Les chambres de coupure à soufflage forcé, qui utilisent l'énergie cinétique produite par le déplacement des contacts mobiles par rapport aux contacts fixes, sont monnaie courante dans les appareillages au SF_6. Elles sont appréciées pour leur compacité, leur simplicité constructive et leur excellent pouvoir de coupure. Ce dernier dépend des interactions entre l'arc, les propriétés du gaz, le schéma d'écoulement, la montée en pression et la géométrie du disjoncteur. L'écoulement à point d'arrêt améliore les performances de coupure par rapport à l'écoulement simple dans les gaz autres que le SF_6. Les résultats tout à fait remarquables de cette nouvelle architecture en font une alternative compétitive et facile d'utilisation aux chambres de coupure sous vide utilisées dans les sectionneurs coupe-charge. De quoi envisager une nouvelle génération de tableaux monoblocs plus respectueux de l'environnement ! •

—
De nouvelles architectures permettent d'éviter les zones de fortes contraintes au niveau des points triples.

Tenue diélectrique
Si la rigidité diélectrique de l'air est trois fois moindre que celle du SF_6, par exemple dans un tableau monobloc (RMU), il n'est pas pour autant envisageable qu'un nouvel appareillage isolé dans l'air soit plus encombrant que son homologue à isolation gazeuse. C'est pourquoi une attention particulière a été portée à la réduction des contraintes de champ électrique à proximité des composants [3]. Résultat : des pièces extrêmement lisses qui se comportent comme des boucliers →08. De nouvelles architectures permettent de s'affranchir des zones de fortes contraintes au niveau des points triples, là où les solides conducteurs et isolants rencontrent le gaz isolant [4]. Enfin, la conception pointue de la chambre de coupure à soufflage forcé satisfait à toutes les exigences diélectriques normatives, notamment la CEI 62271-1 [5].

—
05 Le nuage de gaz chaud généré par l'arc stagne autour du contact mobile principal et entraîne un réamorçage. Pour l'éviter, la nouvelle architecture d'ABB éloigne le gaz chaud du contact mobile.

—
06 Carte thermique juste après passage par zéro du courant ; les flèches indiquent l'endroit où le gaz est refoulé.

06a Instant de formation d'arc = 5,25 ms

06b Instant de formation d'arc = 13,3 ms

—
07 L'écoulement double flux améliore nettement l'évacuation en bout de chambre du gaz chaud accumulé autour du contact principal juste avant le passage par zéro du courant.

07a Double flux

07b Simple flux

—
08 Contraintes de champ électrique dans une région critique ; les repères numérotés signalent les points utilisés pour l'extraction des données ; les couleurs indiquent l'amplitude du champ.

—
Bibliographie

[1] Bjørtuft, T. R., *et al.*, « Dielectric and thermal challenges for next generation ring main units (RMU) », *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, Stockholm, janvier 2013.

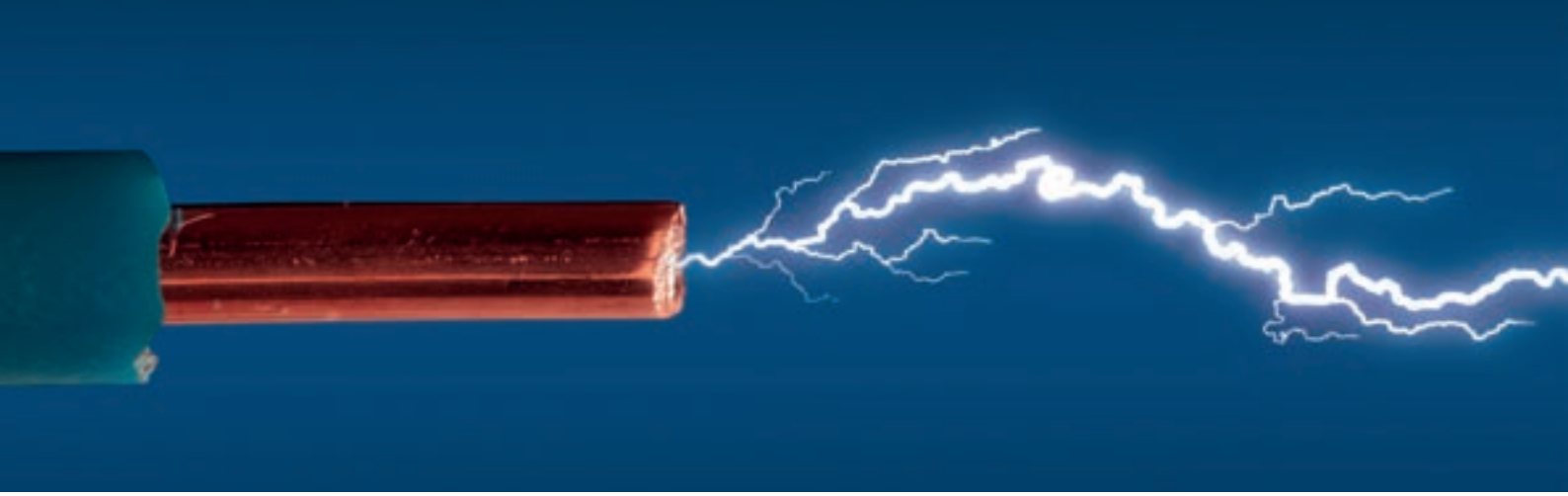
[2] Hyrenbach, M., *et al.*, « Alternative gas insulation in medium-voltage switchgear », *23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015)*, Lyon, juin 2015.

[3] Saxegaard, M., *et al.*, « Dielectric properties of gases suitable for secondary medium-voltage switchgear », *23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2015)*, Lyon, juin 2015.

[4] Blaszczyk, A., *et al.*, « Un labo virtuel pour la haute tension », *ABB Review*, 2/2021, p. 52–57.

[5] Norme CEI 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1 : Spécifications communes pour appareillage à courant alternatif*, édition 2.0, 2017.

[6] Norme CEI 62271-103, *Appareillage à haute tension – Partie 103 : Interrupteurs pour tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*, édition 1.0, 2011.



ÉNERGIE ACTIVE

Des bobines de Rogowski pour détecter les défauts d'arc

Le système de surveillance d'arc TVOC-2 Arc Guard System™ d'ABB offre d'ores et déjà des temps de réaction parmi les meilleurs du marché. L'ajout d'un capteur de courant à bobine de Rogowski CSU-2 vient encore renforcer l'efficacité de la protection grâce à une détection de surintensité qui évite les déclenchements intempestifs.

01

—
Jemima Widforss
Jan-Peter Antin
ABB Electrification
Västerås (Suède)

jemima.widforss@se.abb.com
jan-peter.antin@se.abb.com

Michal Bures
ABB Electrification
Brno (République tchèque)

michal.bures@cz.abb.com

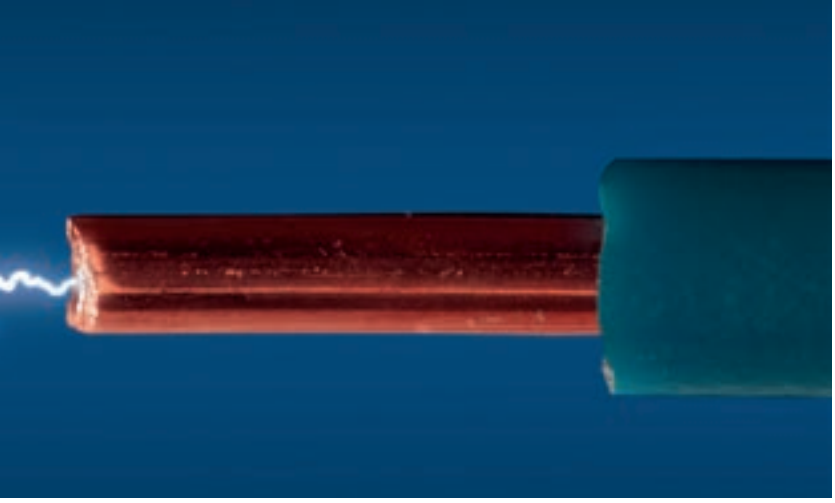
Des températures pouvant dépasser 10 000 °C, des densités de courant atteignant 100 A/cm², de violentes ondes de pression… sans aucun doute, l'amorçage d'un arc dans une armoire électrique est un événement aussi indésirable que dangereux !

La plupart des défauts d'arc sont imputables à l'erreur humaine (mauvaise manœuvre, par exemple), à des raccordements défectueux ou à la pénétration d'animaux. Le phénomène se produit le plus souvent lors du montage de l'appareillage ou d'une intervention de maintenance, porte de l'armoire ouverte. Le premier rempart de protection, à savoir une porte robuste, s'avère alors inopérant.

Bien que rares, ces accidents peuvent avoir de lourdes conséquences sur le matériel et les personnes exposées (brûlures graves, voire blessures mortelles) mais aussi des retombées économiques puisque le remplacement et la réparation des appareils endommagés allongent inutilement les arrêts de production.

C'est pourquoi les industriels cherchent à se prémunir des arcs électriques ou, du moins, à en minimiser les effets en équipant l'appareillage d'un système de protection contre les arcs.

Crédit photo : Cherkas/stock.adobe.com



— 01 Capteur de courant CSU-2 d'ABB

— 02 Système de surveillance et de protection d'arc TVOC-2 Arc Guard System™

Beaucoup a été fait au cours des dernières décennies pour réduire l'impact des arcs électriques sur une installation. Le nouveau TVOC-2 Arc Guard System™ d'ABB constitue un produit phare du marché →02. Héritier de plus de 35 années de technologie ABB dans la protection des personnes et des équipements, le système se combine parfaitement au disjoncteur Emax 2 pour réaliser un dispositif anti-arc très réactif.

Détection optique

Le TVOC-2 utilise des capteurs optiques pour détecter le flux lumineux associé au phénomène d'arc et, en cas de forte intensité, envoyer un ordre de déclenchement au disjoncteur. La coupure de l'alimentation électrique stoppe net les mécanismes d'entretien et de propagation de l'arc. Le tout, en moins d'une milliseconde. Un positionnement judicieux des capteurs optiques dans l'armoire permet en outre d'éviter les interférences

— Le TVOC-2 Arc Guard System™ d'ABB utilise des capteurs optiques pour détecter les arcs.

entre zones de détection →03. Pré-étalonnés en usine pour garantir la même sensibilité lumineuse, ces capteurs disposent d'une lentille grand angle leur assurant un vaste champ de vision, sans souci d'orientation.

Des câbles à fibres optiques leur confèrent une excellente immunité aux perturbations électromagnétiques qui accompagnent toujours le défaut d'arc, mais aussi une plus grande vitesse de transmission des signaux de déclenchement ; des atouts décisifs quand chaque microseconde compte pour éteindre l'arc !

Pour éviter les déclenchements intempestifs causés par le soleil, le flash d'un appareil photo ou une opération de soudage à proximité, le détecteur d'arc peut être couplé à un capteur de courant et ne déclencher que sur défaut de surintensité. C'est là qu'entre en jeu le capteur à bobine de Rogowski.

Nouveaux capteurs de courant ABB

Cela fait plusieurs décennies qu'ABB développe ce type de capteurs de courant pour les appareillages électriques. Cette technologie est aujourd'hui au fondement de son nouveau capteur CSU-2 →01 associé à la surveillance d'arc TVOC-2. Sa mission : détecter l'augmentation rapide du courant qui accompagne les défauts d'arc. Pour éviter tout déclenchement intempestif, le disjoncteur ne s'ouvre que si deux conditions sont simultanément remplies : la détection d'arc par TVOC-2 et la détection de surintensité par CSU-2.

La bobine de Rogowski se présente sous la forme d'une boucle entourant le conducteur →05. La circulation de courant dans le conducteur produit un champ magnétique qui induit une tension dans le bobinage du capteur. Le signal restitué au secondaire est proportionnel à la première dérivée du courant primaire. L'absence de circuit magnétique procure au capteur une parfaite linéarité sur toute la plage de mesure (jusqu'aux courants de court-circuit) et, partant, un très vaste champ d'application.

Des avantages qui font toute la différence avec les transformateurs de courant (TC) traditionnels !

Des atouts en boucle

Bien moins encombrants et plus sûrs que les instruments de mesure de courant classiques, les capteurs Rogowski se distinguent également par une plus grande plage d'utilisation, conforme aux exigences normatives.

02

Un système de fixation et verrouillage variable, pour les nouvelles installations, de même qu'une solution à tore ouvrant et boucle ouverte, pour les projets de modernisation, accélèrent, simplifient et sécurisent le montage de la bobine. Le capteur est relié au CSU-2 par un connecteur RJ45 ; un témoin vert sur le dessus du CSU-2 confirme la sécurité de la connexion. Le CSU-2 supervise en permanence la fonctionnalité des bobines de Rogowski afin de garantir la rapidité et la fiabilité de la détection de surintensité.

Un seul appareil est capable de mesurer des courants nominaux de 100 A à 4 kA, tout comme des courants de crête de plus de 150 kA, sans saturation. Cette vaste étendue de mesure permet d'utiliser le même capteur de courant à des régimes de charge très différents (arrivées et départs réseau, par exemple). Autres atouts au bénéfice des tableautiers : la réduction du nombre de pièces et leur interchangeabilité. Qui plus est, les mêmes capteurs peuvent être utilisés dans le cadre de la modernisation d'un poste électrique pour accepter des courants primaires plus élevés.

Leur faible masse permet de gagner de la place dans l'armoire et les rend plus maniables et plus faciles à stocker, tandis que l'absence de matériau ferromagnétique les affranchit des pertes électriques, faisant chuter la consommation d'énergie. Des « plus » indéniables en matière d'économie et d'écologie par rapport aux TC classiques ! Enfin, la bobine placée dans l'air évite le phénomène de

Un seul capteur peut mesurer des courants de 100 A à 4 kA et des courants de crête de plus de 150 kA, sans risque de saturation.

saturation qui entache la mesure de courant dans les TC à noyau ferromagnétique →04.

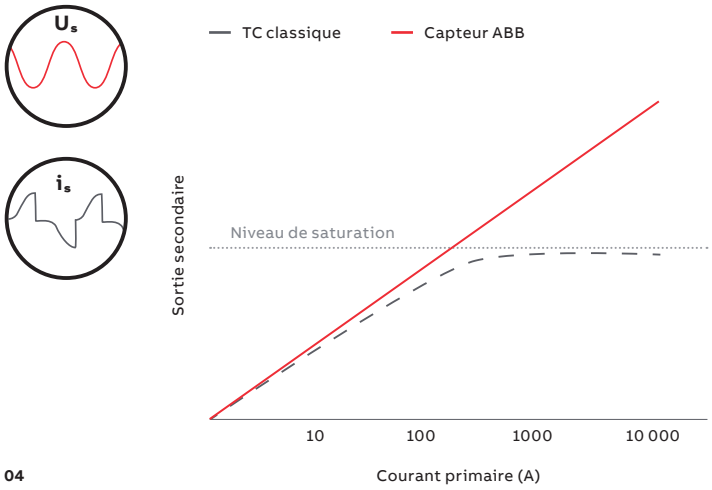
Le CSU-2 utilise des bobines de Rogowski dédiées et pré-étalonnées, garantes de déclenchements rapides et sûrs, à des courants faibles et forts.

La protection du futur

Les systèmes de protection d'arc font aujourd'hui partie intégrante de la conception d'une armoire électrique. Ils diminuent les risques d'accident et les coûts d'immobilisation de la production, au point que certains assureurs encouragent leur emploi en revoyant à la baisse les primes des sites qui en sont équipés. La protection d'arc est désormais encadrée par la réglementation, notamment européenne : la Directive Basse Tension, par exemple, impose de prendre des mesures pour éviter les dégâts consécutifs à l'échauffement causé par l'amorçage d'arc.

Le duo TVOC-2 et CSU-2 garantit la parfaite adéquation de la surveillance d'arc et de l'installation électrique pour une exploitation continue et sécurisée des appareillages ainsi qu'une protection

03



04

05a

optimale des personnes. Facile à installer, dans le neuf comme dans la rénovation, le capteur à bobine de Rogowski délivre une mesure de courant fiable et durable, sans grand besoin de maintenance.

—

Le duo TVOC-2 et CSU-2 compte parmi les solutions de protection les plus performantes et fiables du moment.

En capitalisant sur les décennies d'expérience ABB dans la réduction des défauts d'arc, TVOC-2 et CSU-2 garantissent la sécurité du personnel intervenant sur l'armoire électrique, même porte ouverte, ainsi qu'une protection complète de l'appareillage, des équipements voisins et du site tout entier. L'ensemble constitue l'une des protections anti-arc les plus performantes et fiables du moment. •

—
03 Exemple de positionnement des capteurs optiques pour optimiser la détection d'arc

—
04 La linéarité du capteur empêche la saturation et la déformation du signal secondaire.

—
05 Le capteur à bobine de Rogowski se décline en plusieurs versions :

05a Boucle ouvrable pour la moyenne tension

05b Boucle fixe pour la moyenne tension

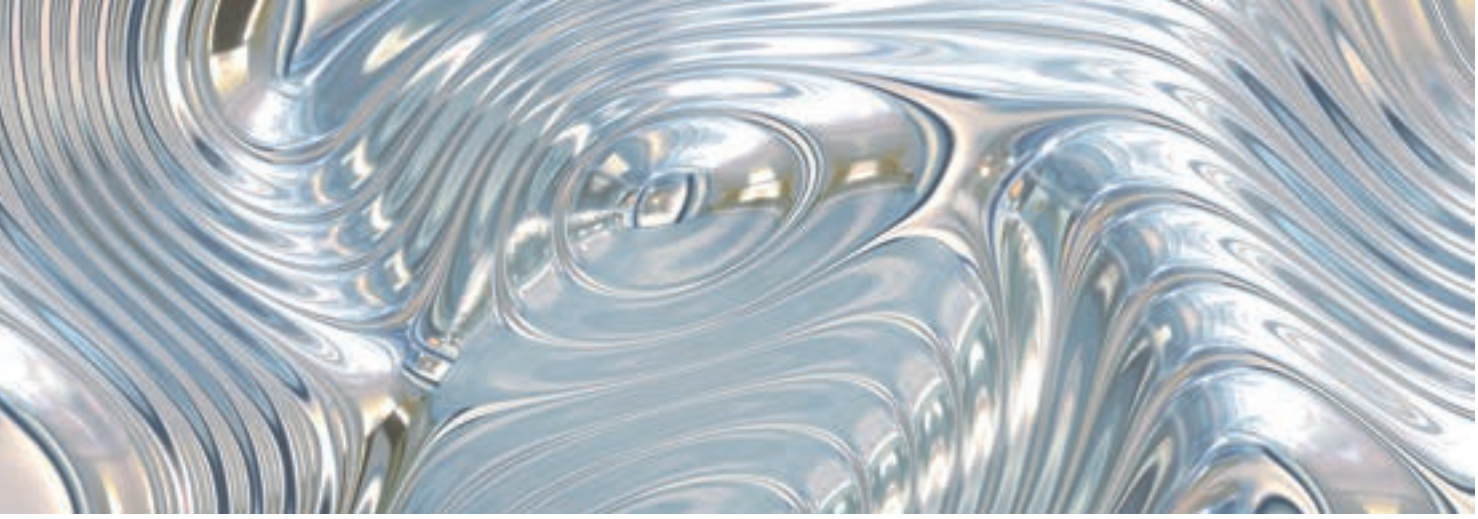
05c Boucle de faible diamètre pour la basse tension

05d Boucle de grand diamètre pour la basse tension

05b

05c

05d



LE MOT DU MOMENT

Matériaux intelligents

Des matériaux doués d'« intelligence » et de mémoire ? Oui, c'est possible !

Sebastian Breisch
ABB Process Automation
Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

sebastian.breisch@
de.abb.com

À la différence des matériaux classiques, rigides et immuables, ces matériaux peuvent changer de forme en réponse à des stimuli externes, comme un changement de température ou un champ magnétique. Certains sont même capables de se souvenir de cette nouvelle forme et d'alterner entre les deux en fonction du stimulus reçu. Un matériau intelligent est ainsi apte à remplir des fonctions de commande, de détection ou de collecte d'énergie sans modification de sa structure fondamentale.

Les matériaux intelligents déploient leur vaste palette fonctionnelle dans de multiples applications.

Quatre catégories de matériaux intelligents ont déjà rejoint les rangs des applications industrielles ou s'apprêtent à le faire :

- Les matériaux piézo-électriques ;
- Les alliages à mémoire de forme (AMF) thermiques ;
- Les AMF magnétiques ;
- Les élastomères diélectriques (DE).

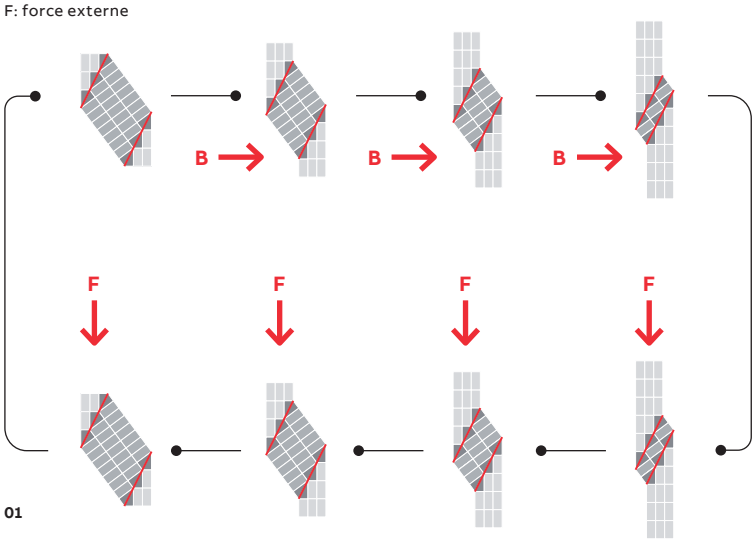
Les matériaux piézo-électriques, qui affichent la plus grande maturité technologique, sont déjà omniprésents dans l'industrie, notamment l'automobile avec les rampes communes d'injection. Parmi leurs autres applications de détection industrielle, citons la mesure d'effort ou de tension de bande.

Les AMF thermiques, parfaitement au point, trouvent dans la médecine (stents, par exemple) leur principal champ d'application. Le plus connu est un trombone en alliage de nickel-titane : capable de déformations extrêmes, il reprend sa forme d'origine lorsqu'il est chauffé à l'aide d'une bougie ou plongé dans l'eau chaude. L'alliage possède en effet deux structures cristallines bien distinctes, en fonction de la température. À température ambiante, le matériau est dans sa forme « froide » ; au-delà d'une certaine température, dite de transition, la structure cristalline se réorganise et le matériau prend sa forme « chaude ». Après un entraînement de plusieurs milliers de cyclages thermiques, le matériau a appris les deux formes, si bien que les deux structures cristallines présentent la même stabilité : on parle d'effet mémoire double sens. La température de transition des alliages courants avoisine 60 °C.

Les actionneurs industriels en AMF thermique se composent d'un simple câble qui peut s'étirer puis se rétracter sous l'effet de la chaleur (au passage d'un courant par exemple). Si la section du câble est importante, le changement de structure exercera une force élevée.

Crédit photo : kentoh/stock.adobe.com

B: champ magnétique externe
F: force externe



01

— 01 En présence d'un champ magnétique externe (B), la structure cristalline en feuillets du matériau se déforme ; il faut ensuite appliquer une force externe (F) au matériau pour qu'il retrouve sa structure d'origine.

Les AMF magnétiques, quant à eux, réagissent non seulement aux changements de température, mais aussi aux variations du champ magnétique. Leur fabrication, qui exige de couler un lingot monocristallin, est complexe. Une structure cristalline en feuillets, magnétique et polarisée, se forme au cours de la solidification du lingot. On découpe, dans le « bon sens » du lingot, des éléments magnétiques à mémoire de forme dont la structure cristalline se modifie en présence d'un champ magnétique externe →01.

Ces AMF combinant propriétés thermiques et magnétiques, ils conviennent à merveille aux applications qui exigent une réponse dans les deux domaines, à l'image des disjoncteurs miniatures domestiques.

Enfin, les matériaux intelligents à base d'élastomères diélectriques (DE) sont généralement composés d'une couche de DE prise entre deux électrodes de polarité opposée, comme c'est le cas dans un condensateur. En appliquant une tension aux bornes du dispositif, les électrodes s'attirent et compriment l'élastomère. Cette déformation de base autorise une grande diversité d'architecture d'actionneurs. Lorsque le DE est configuré comme membrane, par exemple, son déplacement modifie la capacité du condensateur et indique donc avec précision la valeur de déformation. Les premiers composants industriels s'appuyant sur ce principe seront bientôt commercialisés.

Les matériaux intelligents déploient leur vaste palette fonctionnelle dans de multiples applications de détection ou de commande. Leur simplicité architecturale et leur faible nombre de pièces ne sont pas les moindres de leurs atouts par rapport aux solutions classiques : vraiment, un choix intelligent ! •

RECEVOIR ABB REVIEW

S'abonner
Contactez votre correspondant ABB ou souscrivez en ligne sur www.abb.com/abbreview.

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

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

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

PUBLICATION ABB

Rédaction

Theodor Swedjemark
Head of Corporate Communications

Adrienne Williams
Senior Sustainability Advisor

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation

Bernhard Eschermann
Chief Technology Officer, ABB Process Automation

Amina Hamidi
Chief Technology Officer, ABB Electrification

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

Édition
ABB Review est publiée par le Groupe ABB.

ABB Ltd
ABB Review
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zurich
(Suisse)
abb.review@ch.abb.com

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 ©2021
ABB Switzerland Ltd.
Baden (Suisse)

Impression
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn (Autriche)

Maquette
Publik. Agentur für Kommunikation GmbH
Ludwigshafen (Allemagne)

PAO
Konica Minolta Marketing Services
Londres (Royaume-Uni)

Traduction française
Cléa Blanchard
clea.blanchard@gmail.com

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

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

ISSN: 1013-3119

abb.com/abbreview

Dans le numéro 03/2021

Actifs connectés

Au même titre que tout un chacun prend soin de son corps pour être au meilleur de sa forme, l'industriel se doit de protéger et d'affûter ses outils pour optimiser leur productivité. Dans le prochain numéro de la Revue, nous nous intéresserons aux dispositifs et solutions ABB qui aident les clients à maintenir leurs actifs au top.

Crédit photo : MaciejBledowski/stock.adobe.com