

ABB

1 | 16
fr

review

Un flot d'innovations 6

Électrification rurale 12

Des variateurs à l'essai 30

Visualisation 3D 49

La revue
technologique
du Groupe ABB

Innovation



Power and productivity
for a better world™





Traditionnellement, *ABB review* consacre son premier numéro de l'année aux innovations de la recherche-développement du Groupe. Parmi ces avancées, citons l'*Azipod* (*en couverture*), cette nacelle immergée orientable qui améliore grandement la manœuvrabilité et le rendement énergétique des navires (p. 11), et le transformateur de services auxiliaires « SSVT » d'ABB, petit bijou de technologie (p.12-17) installé ici dans un imposant poste électrique de 50 MVA.

Avancées

- 6 **Avant-première**
Le meilleur de l'innovation ABB en 2016

Démonstration de force

- 12 **L'électricité pour tous**
Transformateurs simplifiés pour applications de faible puissance
- 18 **Se déformer sans céder**
Des transformateurs ABB à cuve souple pour diminuer les risques d'explosion
- 23 **Protection rapprochée**
Comment protéger des défauts les microréseaux en courant continu basse tension comportant des générateurs photovoltaïques ?

Mouvement de fond

- 30 **Les variateurs au banc**
Optimiser les solutions moteur et variateur dans le nouveau laboratoire d'essais ABB
- 34 **Tour de force**
Des moteurs électriques sans terres rares pour des solutions d'entraînement écoénergétiques

Le réseau apprivoisé

- 41 **Au quart de tour**
Amortissement des oscillations de torsion à l'intersection des variateurs de fréquence et des systèmes mécaniques élastiques

Fabrique de savoir

- 49 **Visionnaire**
La visualisation 3D au service de la production
- 53 **ABB met la main à la pâte**
Stabiliser et optimiser la production de pâte à papier de qualité avec la commande avancée ABB
- 60 **Alarmer, informer, guider**
Une plus grande efficacité opérationnelle par la gestion de cycle de vie des systèmes d'alarme
- 65 **Vers le papier connecté**
Un projet de recherche ABB pour extraire des descriptions orientées objets des schémas de tuyauterie et d'instrumentation

Enquête de satisfaction

- 70 **Le verdict de nos lecteurs**

Flux d'innovation



Bazmi Husain

Chers lecteurs,

Lecteur assidu d'*ABB review* depuis 1981, date à laquelle j'ai rejoint le Groupe, j'ai aujourd'hui le plaisir et l'honneur d'inaugurer mon mandat de Directeur des technologies en signant, aux côtés de la rédaction, ce premier éditorial 2016.

La recherche ABB est résolument axée sur les besoins et les attentes de nos clients et de la société en général, à savoir, au premier chef, un moindre impact sur l'environnement et une fiabilité, une sécurité et une productivité accrues.

La transition numérique ouvre à cette fin de fabuleuses perspectives de progrès avec l'interconnexion croissante des équipements et des systèmes, et une collaboration homme-machine sans précédent. C'est pourquoi ABB se veut le fer de lance des technologies regroupées sous la bannière de « l'Internet des objets, des services et des humains ». Certaines de ces avancées sont dévoilées en avant-première p. 6–11.

D'autres innovations ABB sont abordées dans ce numéro, notamment l'électrification rurale et la protection des microréseaux contre les défauts, la visualisation 3D au service du *process*, l'amélioration de l'efficacité opérationnelle par une gestion des alarmes sur le cycle de vie et l'automatisation de la conversion numérique des documents techniques et dessins industriels.

Dans la même ligne, le troisième opus de notre série « Le réseau apprivoisé » s'intéresse à la diminution des phénomènes oscillatoires à l'interface des variateurs de fréquence et des systèmes mécaniques élastiques.

Au service de ses lecteurs, la revue a besoin de leur avis pour progresser. Je tiens à remercier tous ceux qui ont participé à notre enquête de satisfaction, dont nous publions les résultats en p. 70.

2016 sera l'occasion de fêter deux anniversaires : la fondation, il y a 125 ans, de l'entreprise Brown, Boveri & C^{ie}, ancêtre d'ABB, et le centenaire de notre premier laboratoire de recherche institutionnelle. Ces temps forts seront illustrés tout au long de l'année par des articles qui reviendront sur le riche patrimoine technologique dont se nourrit ABB pour aller de l'avant et inventer l'avenir.

J'en profite pour rappeler qu'*ABB review* est disponible en version papier mais aussi en ligne, sous forme de fichier PDF et d'application téléchargeable sur <http://www.abb.com/abbreview>.

Les innovations égrenées dans ces pages ne sont que quelques exemples des nombreux progrès accomplis dans nos laboratoires pour résoudre les problématiques auxquelles sont confrontés nos clients.

Nous restons à l'écoute de vos suggestions d'articles et d'améliorations.

Bazmi Husain
Directeur des technologies
Directeur général adjoint
du groupe ABB



Avant-première

Le meilleur de l'innovation ABB en 2016

La recherche-développement n'a de cesse d'inventer et de dessiner le futur de la technologie. Chaque année voit des centaines de découvertes et d'améliorations sortir de nos laboratoires.

En voici un florilège. Si certaines innovations ABB sont déjà à l'honneur dans ces colonnes, d'autres seront abordées plus longuement dans nos prochains numéros.

Alternative au SF₆

Les remarquables propriétés de l'hexafluorure de soufre (SF₆) en ont fait depuis des décennies l'isolant privilégié des appareillages électriques. Toutefois, le SF₆ est un gaz à effet de serre très puissant, dont l'usage induit des coûts de gestion du cycle de vie croissants.

Jusqu'à présent, la recherche s'était avérée impuissante à proposer des matériaux de remplacement offrant les mêmes propriétés d'isolation et de coupure d'arc, mais plus respectueux de l'environnement.

ABB a la solution. En partenariat avec 3M, ses chercheurs ont mis au point un fluide diélectrique écoresponsable, aux propriétés similaires à celles du SF₆ : il s'agit d'un mélange gazeux à base de fluorocétone à 5 atomes de carbone, commercialisé sous le nom de Novec 5110. Sous l'effet des ultraviolets, la molécule fluorée se décompose dans la basse atmosphère en une quinzaine de jours, alors que la durée de vie du SF₆ est



de 3200 ans ! Autre vertu écologique, son potentiel de réchauffement global est inférieur à 1.

ABB s'est associé à l'énergéticien suisse ewz pour déployer la première installation pilote d'appareillages à isolation gazeuse (GIS) utilisant le nouveau mélange : ce sont au total 8 cellules GIS haute tension et 50 cellules moyenne tension isolées

au fluorocétone qui équipent le poste situé à proximité de l'usine ABB de Zurich.

Alimentation allégée, protection renforcée

L'offre de protections électriques ABB pour l'industrie se compose d'un large éventail de produits, des convertisseurs de fréquence statiques et conditionneurs de tension et de puissance aux alimentations sans interruption (ASI). Elle s'enrichit d'une nouvelle ASI à double conversion pour les applications industrielles peu contraignantes mais stratégiques : **PowerLine DPA**.

Modulaire, la solution est bâtie sur l'architecture parallèle décentralisée DPA (*Decentralized Parallel Architecture*) d'ABB : chaque module embarque tout le matériel et le logiciel nécessaires à un fonctionnement

autonome, et peut être retiré/inséré en service, sans interruption du système. Sa configuration redondante permet de répartir et de protéger la charge ; tolérante aux pannes, elle ne présente aucun point individuel de défaillance.

PowerLine DPA protège les charges industrielles sensibles qui nécessitent une alimentation hautement sécurisée. Sa construction robuste s'accommode des ambiances difficiles (chaleur, poussière, humidité, corrosion). Sa modularité se traduit par une disponibilité élevée, une grande facilité de maintenance, une haute sécurité électrique et un faible coût de possession.



Troisième génération de mécanismes de commande HM pour disjoncteurs haute tension

Depuis le lancement des commandes de type HMA et HMB pour les disjoncteurs haute tension, ABB en a vendu plus de 110 000 exemplaires. La dernière génération, baptisée « HMC », offre encore plus de performance, de qualité et de fiabilité.

Améliorer les caractéristiques existantes (excellente fonctionnalité, compacité et adaptation aisée au disjoncteur) tout en innovant au niveau structurel et technologique pour gagner en qualité et fiabilité : telle est l'idée qui a présidé au développement de la commande HMC. Économies d'échelle et maintenabilité accrue ont été les maîtres-mots de cette nouvelle conception qui privilégie :

- la modularité ;
- un socle de pièces commun ;
- des options standardisées ;
- des montages simplifiés ;
- l'excellence de la fabrication, de l'assemblage, du service, de la protection contre les anomalies de fonctionnement, etc.

La famille HMC, qui convient à des disjoncteurs jusqu'à 550 kV, dispose d'options lui conférant une grande souplesse d'adaptation aux exigences du client. Des améliorations renforcent en outre la fiabilité et la sécurité opérationnelle : citons par exemple un dispositif d'antipompage à entraînement direct, le couplage direct des dispositifs de commutation du module de commande ou encore un interverrouillage automatique intégré, débouchable sans dommage.

Innovation majeure, la résistance du module d'accumulation d'énergie est fonction de la course. On peut ainsi utiliser des ressorts de compression hélicoïdaux, associés à des caractéristiques de commutation optimisées. Enfin, ces mécanismes bénéficient des dernières avancées dans les domaines des matériaux et des



composants hydrauliques, tels que des systèmes d'étanchéité à joints racleurs.

La voix de son maître

ABB a dévoilé son système de domotique intelligent ABB-free@home, le plus perfectionné au monde, qui permet de piloter par commande vocale plus de 60 fonctions de l'habitat domotisé.

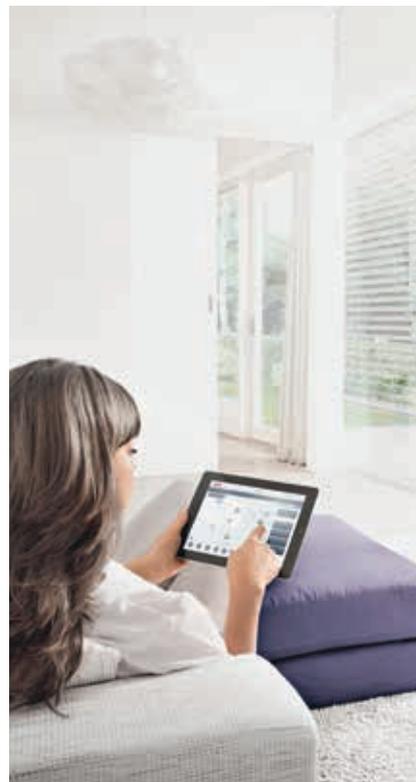
ABB-free@home centralise les commandes de pilotage et de surveillance de tout le logement : éclairage, programmation horaire, manœuvre des stores, chauffage et climatisation, système d'interphone. Il est aujourd'hui capable d'obéir aux ordres donnés par l'occupant en langage naturel (comme « *veuillez allumer la chambre de Pierre* » ou « *allumer chambre de Pierre* »), de lui confirmer l'activation d'une commande et de

répondre à ses questions sur l'état d'une fonction, d'une pièce, etc.

Le processeur de dialogue du système de commande vocale, qui associe reconnaissance de la parole et modélisation statistique, utilise des algorithmes pour reconnaître l'intention du locuteur et le contexte ; le modèle puise pour cela dans une importante bibliothèque de mots préprogrammés. Si la commande est incomplète, le système demande plus d'informations à l'utilisateur.

Cette solution domotique est vendue sous la marque Busch-Jaeger en Allemagne, aux Pays-Bas et en Autriche, et ABB dans le reste du monde.

Intéressé ? Lire « Intelligence domestique », *ABB review*, 3/15, p. 48-49.



FlexFeeder et robot, main dans la main

La solution d'alimentation flexible FlexFeeder, associée à la fonction de vision intégrée d'ABB, facilite le tri de composants de 3 mm à 30 mm, sans avoir à changer de dispositif à chaque changement de fabrication.

L'assemblage automatisé de petites pièces exige flexibilité, fiabilité et rapidité. Le nouveau FlexFeeder d'ABB peut être couplé à la commande de robot IRC5 ou à n'importe quel automate programmable. Proposé en deux tailles, simple ou double (pour allonger les intervalles de réapprovisionnement), il bénéficie en option d'un rétroéclairage intégré qui optimise la distribution des petites pièces.

Les deux variantes sont conçues pour gagner de la place et raccourcir les temps de cycle. Mieux, deux dispositifs ou plus peuvent travailler côte à côte sans nécessiter de systèmes de vision distincts.



Actionné par des vérins pneumatiques, FlexFeeder saisit les pièces en vrac pour les déposer en petites quantités sur la surface de prise, dans le champ de vision du robot. Ses capteurs détectent le moment où il faut recharger le bac. Celui-ci peut être vidé sans alimentation électrique ; le changement de pièces se fait aisément, en sécurité.

Posé au sol ou monté sur rack, FlexFeeder est facile à déplacer et à lever par ses poignées. L'interface graphique permet de tester le dispositif en un clic et de suivre l'avancement de la production.

Des moteurs avisés

Bientôt, une nouvelle fonctionnalité de télésurveillance des moteurs permettra de faire des économies de maintenance en mieux planifiant les interventions et en évitant les arrêts intempestifs. Grâce à des étiquettes électroniques, il sera possible de suivre de près des paramètres fondamentaux et de pointer les équipements problématiques devant être réparés ou remplacés. L'outil est à un stade avancé de développement.

Ces étiquettes de communication sans fil (ou *tags*) seront directement apposées en usine sur une sélection de moteurs basse tension (BT) d'ABB,

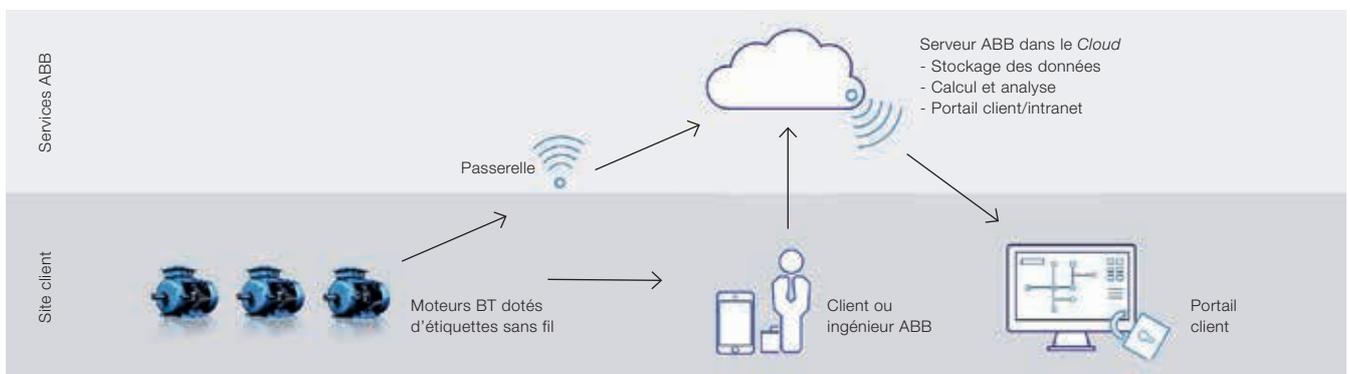
mais elles pourront aussi s'appliquer sur d'autres moteurs candidats à la modernisation. Les informations embarquées seront régulièrement transmises par ondes radio à Internet, par l'intermédiaire d'un téléphone mobile ou d'une passerelle de communication. Plusieurs paramètres opérationnels sont ainsi visés :

- Caractéristiques de fonctionnement ;
- Consommation d'énergie (dans une fourchette de 10 %) ;
- Surcharge ;
- Temps de marche et démarrages ;
- Vibration de la carcasse et température ;
- État fonctionnel ;
- État de santé des bobinages rotoriques ;
- Défauts d'alignement interne ;

- État des organes de roulement ;
- Refroidissement.

La consultation de ces données par une application en ligne sur smartphone aidera l'opérateur à identifier les problèmes potentiels et à planifier les interventions en conséquence, allégeant le budget de maintenance global et réduisant, voire éliminant les arrêts inopinés.

C'est également l'occasion d'optimiser la consommation énergétique des moteurs : en croisant ces données avec les informations d'exploitation de l'usine, il sera possible d'améliorer les plans de charge pour réduire la facture énergétique du parc.



Premier moteur sans aimants ABB à rendement IE5 pour la vitesse fixe

Au cours de cette décennie, les moteurs basse tension commercialisés sur la plupart des marchés mondiaux devront satisfaire à la classe de rendement IE3 « premium », la plus élevée de la norme CEI 60034-30 pour les moteurs asynchrones triphasés monovitesse. Le cap de l'harmonisation internationale étant franchi, l'attention se tourne désormais vers les machines. Deux grandes questions se posent aux constructeurs : comment faire profiter leurs machines de ces gains de rendement ? Comment se

démarrer de la concurrence sur le plan de l'efficacité énergétique ?

La première moitié de cette décennie a vu l'essor des moteurs à aimants permanents à terres rares pour repousser les limites de la technologie asynchrone. Or ces matériaux ont le défaut d'être chers et peu respectueux de l'environnement. C'est pourquoi ABB travaille sur d'autres solutions de motorisation écopéformante et durable, pour la vitesse variable comme pour la vitesse fixe.

Son moteur synchrone à réluctance SynRM (*Synchronous Reluctance Motor*) et ses deux variantes, sans aimants ou avec aimants en ferrite, en font partie. Le dernier-né de la gamme est un moteur de classe IE5 dénué d'aimants, pouvant démarrer en direct sur le réseau : DOLSynRM. Le modèle



de 1,5 kW présenté en septembre lors de la Conférence internationale EEMODS 2015 sur l'efficacité énergétique des systèmes motorisés, à Helsinki, a rencontré un franc succès. Devenue réalité, cette technologie de moteurs à très haut rendement aide les clients ABB à maintenir leur avantage concurrentiel tout en préservant l'avenir de la planète. Il appartient désormais aux constructeurs de machines d'en tirer parti !

Des variateurs accessibles sur smartphone

Pour suivre, piloter et mettre en service un variateur de vitesse, l'opérateur doit disposer d'informations pertinentes, et ce de la manière la plus intuitive possible. Quoi de mieux pour cela qu'un smartphone ? ABB répond à cette demande avec deux applications dédiées, *Drivebase* et *Drivetune*.

Drivebase est conçue pour suivre les variateurs à la trace. L'application identifie l'appareil par son code QR qu'elle utilise pour analyser les défauts, préconiser des interventions, fournir des rapports de maintenance, faciliter l'accès à la documentation produit et rechercher des contacts

dans l'annuaire ABB. Elle permet également d'enregistrer le variateur pour souscrire des garanties supplémentaires.

Les opérateurs suivent ainsi l'ensemble du parc de variateurs en bénéficiant d'un accès rapide et facile aux services ABB. L'appli est téléchargeable gratuitement sur Apple Store, Google Play et Windows Store.

Drivetune est une application de pointe pour le contrôle-commande à distance des variateurs. Son interface intuitive permet à l'opérateur de visualiser l'état de ses appareils et de les piloter en toute simplicité. Une liaison Bluetooth autorise l'échange de données dans les deux sens.

Drivetune est gratuite et téléchargeable sur Google Play. Une version sous iOS sera bientôt disponible.



Bain de soleil en stock

L'optimisation de la production locale d'électricité solaire est l'un des enjeux de la nouvelle génération de systèmes photovoltaïques (PV). Encore faut-il parvenir à aligner au quotidien le profil de production et la courbe de consommation domestique pour satisfaire le client résidentiel comme le gestionnaire de réseau. Le système de stockage d'énergie REACT (*Renewable Energy Accumulator and Conversion Technology*) d'ABB vise le compromis optimal entre le coût de la solution de stockage et la taille de l'installation PV.

La solution se compose d'un onduleur PV réseau (jusqu'à 5 kW) alimenté par un bus continu (CC) auquel sont raccordés un chargeur de batteries bidirectionnel et des optimiseurs de puissance MPPT (*maximum power point tracking*), à raison d'un par rangée de modules PV. Si cette architecture de couplage CC est la



solution la plus rentable dans le neuf, elle permet aussi de moderniser les installations PV existantes sous forme de chargeur de batterie sur bus CA ; il suffit de ne pas raccorder la rangée PV à son entrée. La partie stockage énergétique de REACT est constituée de batteries Li-ion dont la modularité

permet de porter la capacité d'origine de 2 kWh à 6 kWh. REACT embarque un système simple mais performant de gestion de charge qui interagit avec certains consommateurs et appareils du logement pour atteindre en configuration de base une indépendance énergétique de 60 %.

Rentabilité à flot

Le système de propulsion marine électrique Azipod® d'ABB équipe déjà de nombreux paquebots, brise-glaces ou bâtiments d'hébergement offshore. Le dernier-né de la famille, l'Azipod D, étend ce champ d'application en ciblant tout particulièrement les navires de forage, les ravitailleurs de plates-formes, les bateaux de construction et les transbordeurs, qui exigent manœuvrabilité (en mode de positionnement dynamique, par exemple) et fiabilité.

Azipod est une nacelle orientable hydrodynamique, montée sous le navire, qui renferme un système de propulsion électrique entraînant une hélice. Sa souplesse d'orientation offre une grande maniabilité.

L'Azipod D diminue le budget de maintenance et de carburant du navire, augmentant sa rentabilité. Grâce à cet investissement compétitif, le navire est plus maniable et plus facile à entretenir, affichant des performances bien supérieures à celles de la propulsion mécanique.

La solution s'adapte à une large gamme de formes de coque et de tailles d'hélice, ce qui facilite la tâche des bureaux d'études et chantiers navals, et simplifie son installation. Elle peut économiser 25 % de la puissance installée, grâce notamment à un nouveau refroidissement hybride qui augmente jusqu'à 45 % les performances du moteur.

Selon une étude de Clarkson Research Services sur les transports maritimes, le nombre de navires à propulsion électrique a progressé de 12 % par an dans le monde au cours des dix



dernières années, un rythme trois fois supérieur à celui de la flotte mondiale.

L'intégration unifiée

Dans l'industrie de transformation, la multiplication des capteurs/ actionneurs connectés et le foisonnement des protocoles de communication donnent le tournis aux exploitants ! Si plusieurs standards de pilotes logiciels assurent l'intégration des appareils de terrain dans les outils de maintenance ou les systèmes de contrôle-commande, chacun ne régit malheureusement qu'un sous-ensemble de tâches spécifiques à un site. D'où des problèmes de compatibilité et d'interopérabilité. ABB a pris la tête d'un consortium industriel qui a développé un nouveau standard unifié, baptisé FDI (*Field Device Integration*), cumulant tous les avantages des protocoles existants pour une interopérabilité inédite.

Anticipant l'évolution technologique, ABB a interrogé les utilisateurs pour connaître les problèmes rencontrés avec l'instrumentation. Ce retour



d'expérience lui a permis de créer un nouvel outil de gestion au service du technicien d'atelier comme de l'ingénieur de maintenance, qui se concentre sur les données et fonctions essentielles des équipements de process. La technologie FDI comble ainsi le fossé traditionnel entre les outils sur PC aux graphiques pléthoriques et les matériels utilisés en pied de machine, aux fonctionnalités restreintes et à l'interface de communication limitée. Ce nouveau logiciel est paré pour la prochaine génération

d'appareils mobiles durcis, à l'épreuve des environnements exposés aux risques d'explosion tels que les usines pétrochimiques.

L'association d'un standard d'intégration pointu et d'un outil logiciel moderne devrait révolutionner la gestion de l'instrumentation de procédé.



L'électricité pour tous

Des transformateurs simplifiés pour applications de faible puissance

MATHEW PAUL – Quelque 1,3 milliard de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité, souvent parce qu'il est trop coûteux d'installer un poste électrique dans une région isolée ou peu peuplée. La solution ABB? Un « micro-poste » qui utilise des transformateurs SSVT (*station service voltage transformers*) pour alimenter à moindre coût les populations locales. De conception aisée, il se contente d'une maintenance minimale. Un SSVT est un transformateur de puissance monophasé réduit à sa plus simple expression: un seul appareil monté sur socle, au primaire raccordé entre phase et terre, suffit à passer directement de la haute tension à la moyenne ou basse tension, sans échelon intermédiaire. Le SSVT évite ainsi l'emploi de deux transformateurs abaisseurs ou plus en cascade, d'où un gain d'argent, de rendement et de fiabilité. L'appareil assure l'alimentation électrique de sites trop isolés pour justifier l'installation d'un poste complet, comme les stations de pompage de pétrole et de gaz, les mines, les antennes relais ou les hôpitaux, etc.



Il est souvent trop coûteux d'installer un poste électrique dans une région isolée ou peu peuplée. ABB a la solution avec son « micro-poste ».

Le SSVT, ou son équivalent SSMV pour la moyenne tension (MT), associe les caractéristiques d'un transformateur de puissance et d'un transformateur de mesure dans un appareil très fiable, peu coûteux, simple et compact : l'idéal pour les applications de faible puissance. Il est ainsi capable de couvrir à lui seul les besoins de sites reculés ou de postes monocellulaires. Peu encombrant, il se configure facilement grâce à sa conception monophasée.

Exécution

Le SSVT ou SSMV est un appareil cuirassé monophasé, raccordé au primaire entre la phase et la terre. Un écran à la terre est interposé entre les enroule-

ments haute tension (HT) et basse tension (BT) pour protéger le secondaire des surtensions transitoires. La construction d'un SSVT ou d'un SSMV respecte en grande partie les exigences des normes ANSI C57.13 [1] et CEI 61869-3 [2] sur les transformateurs de mesure, et est conforme C57.12.00 [3] et CEI 60076 [4] pour les transformateurs de puissance → 1. La nouvelle norme C57.13.8 (*IEEE Station Service Voltage Transformers*), en cours de rédaction, reprendra les parties applicables des normes C57.12.00 et C57.13.

Protection

Le SSVT est équipé d'un transformateur de courant (TC) sur le conducteur de terre ou de neutre HT pour signaler tout défaut phase-terre au secondaire → 2 ;

la cuve du transformateur est mise à la terre par un TC masse-cuve qui permet de détecter un défaut d'isolement au primaire. En option, un relais de pression

Peu encombrant, le SSVT se configure facilement grâce à sa conception monophasée.

soudaine, immergé dans l'huile, détecte les défauts internes, comme dans un transformateur de puissance.

En cas de défaut côté primaire, la protection de ligne peut isoler le SSVT. La ligne de transport constituant un élément critique du réseau, de nombreux exploitants tiennent à cette précaution : c'est pourquoi une protection par fusible à expulsion isole le SSVT/SSMV défectueux jusqu'à une tension de choc de

Photo

Le transformateur SSVT d'ABB (ici, immergé dans l'huile) remplace avantageusement un poste électrique complet pour alimenter des sites isolés à partir du réseau haute tension.

Le « micro-poste » ABB est un poste économique à base de SSVT, facile à concevoir et à entretenir.

1 Comparaison des normes ANSI

Transformateur de puissance classe II	Transformateur de mesure SSVT/SSMV
ANSI C57.12.00	ANSI C57.13
Tension de choc 115–450 kV (550 kV en option)	Tension de choc 115–550 kV
Tension de choc 138–550 kV (650 kV en option)	Tension de choc 138–650 kV
Tension de choc 161–650 kV (750 kV en option)	Tension de choc 161–750 kV
Tension de choc 230–750 kV (825 kV en option)	Tension de choc 230–900 kV
Tension de choc 345–1050 kV (1175 kV en option)	Tension de choc 345–1300 kV
Décharge partielle: 500 pC	Décharge partielle: 10 pC; tension d'extinction de décharge partielle: 135 % de la tension assignée
Facteur de surtension: tension de fonctionnement maximale permanente 105 %; temporaire 110 %	Facteur de surtension: tension de fonctionnement maximale permanente 115 %; temporaire 125 %
	Écran de protection

750 kV → 3. Au-delà, on peut avoir recours à un disjoncteur monophasé → 4. Les SSVT à isolation gazeuse intègrent un disjoncteur ou un isolateur pour une protection renforcée.

Niveau de défaut et tenue aux surtensions

Un SSVT/SSMV a une impédance de base d'environ 5 à 10 %. Étant donné la faible puissance apparente de l'appareil, le courant de défaut au secondaire n'atteint jamais un niveau dangereux. En service normal, un fusible ou un disjoncteur modulaire peut protéger le SSVT des surcharges côté secondaire. Dans un SSMV, un disjoncteur MT remplit la même fonction. Avec une tension assignée au primaire de 230 kV, le courant à pleine charge atteint 1,5 A sous 200 kVA; le défaut le plus grave côté secondaire induirait un courant de 30 A au primaire.

Écobilan

La suppression d'un ou de plusieurs échelons de tension intermédiaires diminue les pertes à vide et les pertes cuivre, d'où un meilleur rendement énergétique. En outre, à caractéristiques égales, le SSVT contient beaucoup moins d'huile qu'un transformateur de puissance, ce qui diminue nettement les conséquences d'une perte de diélectrique, les besoins en remplissage ainsi que les exigences de protection incendie et de confinement. Avec un niveau sonore d'environ 30 dBA, contre 70 pour un grand trans-

formateur, le SSVT ne fait pratiquement pas de bruit.

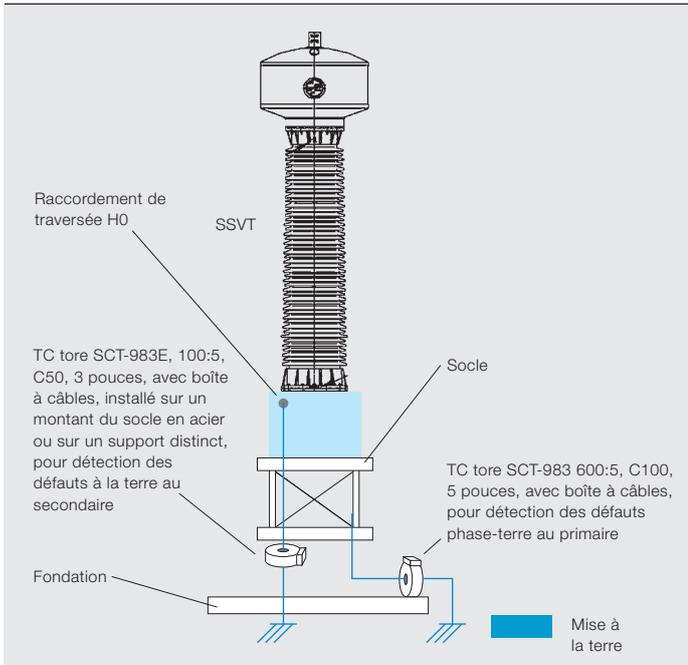
Alimentation du contrôle-commande

Les postes électriques ont des tailles et des fonctions très variées. Un poste de répartition ou de distribution abaisse le niveau de tension (HT/MT ou MT/BT) pour alimenter un certain nombre de départs de lignes. Un poste d'interconnexion raccorde les transformateurs de puissance d'un réseau HT ou simplement relie les lignes de transport situées au même niveau de tension. D'autres postes encore sont connectés à des groupes de production souvent distants pour soutirer leur puissance et l'injecter sur le réseau.

Dans tous les cas, un poste électrique intègre des systèmes de comptage et de protection alimentés en BT. Deux sources redondantes sont pour cela nécessaires: une première, normalement assurée par le transformateur principal du poste, et une seconde pour fiabiliser l'alimentation. À cela, plusieurs raisons: dans un poste de transformation de centrale, par exemple, les générateurs qui fournissent souvent l'alimentation primaire peuvent être arrêtés pour maintenance ou mis hors tension pendant longtemps; dans une centrale solaire ou éolienne, la source d'énergie peut fluctuer.

En l'absence de production électrique, c'est du réseau que doit être soutirée l'alimentation du contrôle-commande. Plusieurs

2 Protection du SSVT



3 SSVT immergé avec protection par fusible à expulsion



méthodes s'y emploient. On peut garder sous tension un grand transformateur pour fournir la puissance secondaire mais la solution souffre de pertes élevées par rapport à la charge, sans compter le coût de l'investissement dans l'appareil. Autre possibilité : tirer cette alimentation d'un départ relié au réseau de distribution local BT ou d'un groupe de secours, ce qui est toutefois coûteux et sensible aux perturbations d'origine externe.

En dernier ressort, les concepteurs de poste peuvent utiliser une ligne de distribution d'un autre site : une solution onéreuse qui pose des problèmes de qualité et de fiabilité, et est sujette à des perturbations échappant au contrôle de l'exploitant.

Dans certains cas, on ajoute un troisième enroulement au transformateur HT principal. Ce n'est toutefois pas la panacée car cela restreint les choix de conception, complique inutilement l'appareil et diminue sa fiabilité. Les pertes supplémentaires, l'augmentation de taille de la cuve et de la quantité d'huile nécessaire, tout comme le surdimensionnement des conducteurs et bobines, alourdissent la

facture. Autre inconvénient, le transformateur de puissance doit rester sous tension même en l'absence de charge secondaire.

Une autre solution réside dans un groupe électrogène. C'est probablement la moins chère à l'achat mais la plus onéreuse sur le cycle de vie, par rapport à un SSVT ou un transformateur de puissance. De surcroît, les groupes diesel posent des problèmes de fiabilité et de maintenance, et présentent un risque d'incendie et de dommage écologique (pollution sonore, fuite de carburant, etc.).

Le SSVT associe les caractéristiques d'un transformateur de puissance et d'un transformateur de mesure dans un appareil très fiable, peu coûteux, simple et compact, idéal pour les applications de faible puissance.

Le SSVT/SSMV peut bien souvent se substituer à ces solutions et fournir l'alimentation de contrôle-commande à moindre coût et beaucoup plus facilement.



Le micro-poste ABB

Dans de nombreuses régions du globe, le coût d'installation d'un poste électrique est un frein à l'électrification. Même si une ligne de transport HT passe à proximité, il est impossible de s'y raccorder pour alimenter un réseau de distribution d'eau, une école ou un dispensaire. Sans prétendre remplacer un poste complet, un SSVT ou SSMV permet de desservir des populations jusqu'ici privées d'électricité → 5. Puis, lorsque le niveau de vie et la demande de puissance augmentent et justifient l'installation d'un grand poste, il est facile de redéployer le SSVT/SSMV ailleurs.

Les coûts d'acquisition et de possession d'un SSVT en font une solution de choix pour ces applications → 6.

Un transformateur de puissance n'est pas seulement plus coûteux; son fonctionnement nécessite aussi beaucoup de surveillance et de maintenance. Au cours de sa vie, il faudra par exemple remplacer son diélectrique liquide. Or un transformateur de puissance de 230 kV/100 MVA renferme jusqu'à 25000 kg

d'huile, contre 2000 kg pour un SSVT de 230 kV/200 kVA.

Sans compter qu'un poste équipé d'un SSVT ou SSMV monophasé peut fonctionner sans intervention humaine, le plus simplement du monde: il suffit d'un parafoudre, d'un disjoncteur HT, d'un

La suppression d'un ou de plusieurs transformateurs intermédiaires diminue les pertes à vide et les pertes cuivre pour un meilleur rendement énergétique.

isolateur, d'un circuit de mise à la terre et d'un tableau de distribution BT, tous monophasés. Cette simplicité est aussi synonyme de moindre encombrement.

En monophasé, le SSVT/SSMV peut être raccordé en étoile ou en triangle, côté secondaire. Une configuration triphasée en couplage triangle au secondaire, avec deux SSVT/SSMV fournissant une alimentation triphasée (triangle ouvert) à puissance réduite, offre encore plus de souplesse qu'un transformateur de puissance triphasé → 7. L'exploitant peut aussi, en cas d'urgence, retirer un SSVT d'un système triphasé pour alimenter un autre lieu.



7 SSVT en montage triphasé



Un SSVT/SSMV est nettement plus petit et plus léger qu'un transformateur de puissance ; c'est l'appareil de prédilection pour les sites difficiles d'accès.

Après avoir servi de source d'alimentation en phase de construction, il peut être reconfiguré pour alimenter le contrôle-commande du poste en exploitation.

Applications

De nombreuses charges isolées, non desservies par le réseau de distribution, exigent de tirer une ligne : stations de pompage de pétrole ou de gaz, plates-formes pétrolières, sites miniers, antennes relais, bases militaires, hôpitaux, sous-stations ferroviaires ou encore éclairage de pylônes HT. Un SSVT/SSMV peut être conçu pour fonctionner en altitude, à des températures extrêmes, en zone sismique, en milieu salin ou poussiéreux. Sa plage de puissance

s'étend de 25 à 333 kVA, avec certaines limitations de tension, à 50/60 Hz. Si nécessaire, un essai sur table vibrante permet de valider sa tenue aux séismes.

Un SSMV doté d'un secondaire MT est capable d'alimenter des charges distantes à travers un départ MT. En bout de ligne, des transformateurs de distribution sur poteau abaissent la puissance, réduisant les pertes en ligne et améliorant la régulation de tension.

Le SSVT peut être équipé d'enroulements de mesure pour assurer une double fonction. Des SSVT offrant des puissances assignées plus élevées sont à l'étude ; ils renforceront l'attrait de la solution et permettront à des populations et à des applications isolées plus importantes de bénéficier des avantages du raccordement au réseau.

Mathew Paul

ABB Power Grids, High Voltage Products
Lexington (Kentucky, États-Unis)
mathew.paul@us.abb.com

Bibliographie

- [1] Norme IEEE C57.13, *IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers*, 1993.
- [2] Norme CEI 61869-3, *Transformateurs de mesure*, 2011.
- [3] Norme IEEE C57.12.00, *IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 2010.
- [4] Norme CEI 60076, *Transformateurs de puissance*, 2011.



Se déformer sans céder

Des transformateurs ABB
à cuve souple
pour diminuer
les risques d'explosion

SAMUEL S. BRODEUR, YASSER S. SALMI, ANDREW COLLIER – Dans un transformateur immergé, l'apparition d'un arc électrique entre des parties de cuve à des potentiels différents constitue la principale cause d'explosion. Sous l'effet de l'arc, l'huile se vaporise presque instantanément; le gaz ainsi généré augmente rapidement de volume et crée une surpression interne qui dilate et déforme la cuve jusqu'à la rupture, avec de graves conséquences sur le transformateur et les appareils avoisinants: fuite du diélectrique et, suivant les circonstances, inflammation, voire explosion. Les parades habituelles (disjoncteurs, dispositifs de détente, chambre d'expansion, par exemple) ont toutes des inconvénients, notamment en termes de performance, d'encombrement ou de coût. Sans aucun de ces défauts, le transformateur à cuve souple d'ABB constitue une solution simple et économique pour limiter le risque de rupture.



Même si des dispositions constructives permettent d'éviter la formation d'arc dans les transformateurs immergés et les inductances de puissance, il existe toujours un risque de déformation et d'éclatement de la cuve qui peut provoquer l'incendie voire l'explosion du transformateur, menaçant la sécurité des personnes et l'environnement. Selon une étude statistique effectuée sur des transformateurs de 735 kV, environ 32 % des explosions sont imputables à des défaillances de traversées se soldant dans près de la moitié des cas par un incendie [1]. Ce risque est considérablement limité par l'utilisation de traversées en papier imprégné de résine (RIP) ou en fibres synthétiques imprégnées de résine (RIS).

De même, la rupture de la cuve ou des brides de traversées est responsable de 54 % des incendies. D'après une étude d'envergure portant sur 47 000 transformateurs [2], les taux de défaillance les plus élevés se rencontrent parmi les transformateurs équipés de changeurs de prises en charge, les appareils fonctionnant dans des domaines de tension supérieurs à 300 kV, les autotransformateurs et les transformateurs élévateurs de centrale. Pendant les 40 années de vie d'un transformateur, la probabilité moyenne d'explosion est de 40 % ; dans 4 % des cas, l'accident entraîne un incendie → 1 et dans 22 % une perte de liquide diélectrique aux conséquences désastreuses. Le risque de catastrophe n'est donc pas négligeable !

Stratégies de prévention classiques

Dans un grand transformateur de transport, l'énergie d'arc potentielle libérée par un défaut de faible impédance peut atteindre 147 MJ. Pour éviter ce risque, plusieurs dispositifs de protection électrique ou mécanique sont utilisés seuls ou combinés.

Protections électriques

- Disjoncteurs à action rapide : ce sont les premiers dispositifs utilisés car ils minimisent la durée du défaut, qui est directement proportionnelle à l'énergie d'arc générée ;
- Protections Buchholz : ces relais détecteurs de défaut par accumulation de gaz dans l'huile ont l'inconvénient d'être à une certaine distance de la source potentielle de la

décharge interne à haute énergie, si bien qu'ils risquent de déclencher uniquement après la propagation de l'onde de pression ;

Malgré les précautions prises pour éviter la formation d'arc dans un transformateur immergé, il y a toujours un risque de rupture de la cuve.

- Protection différentielle ou détection de défauts à la terre : ces techniques doivent être assez robustes pour résister aux appels de courant, déséquilibres de phase et fluctuations de charge quotidiens tout en affichant une tolérance suffisante pour éviter les déclenchements intempestifs.

Malgré l'apport des outils modernes de mise en service, le facteur humain joue encore dans bien des cas un rôle central dans le choix du dispositif et des réglages.

Protections mécaniques

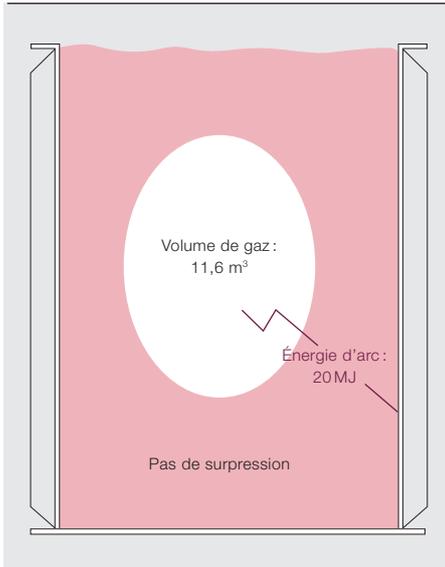
La soupape de surpression en est un exemple simple, tout comme le disque de rupture, qui s'ouvre plus vite et s'oppose moins à l'évacuation de la surpression mais exige un système de confinement, compliquant l'installation. La chambre d'expansion est une autre possibilité : une grosse tubulure relie la cuve à un réservoir ou à un conservateur d'huile, qui absorbe toute dilatation brusque.

Dans les transformateurs à isolation gazeuse, l'utilisation du gaz inerte SF₆ comme réfrigérant et diélectrique règle

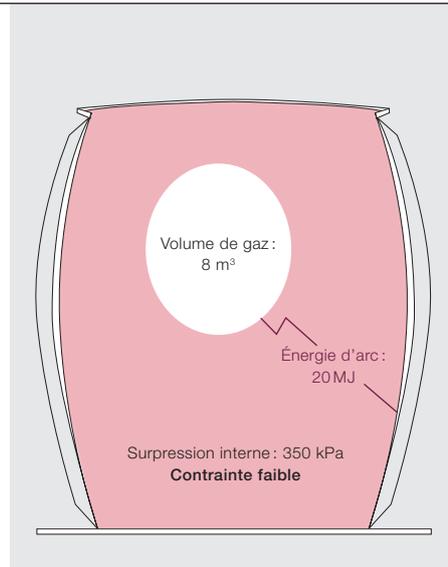
Photo p. 18

Quelle que soit la qualité de conception ou d'exécution d'un transformateur, il est impossible d'éliminer complètement le risque d'incendie ou d'explosion. Les méthodes de prévention classiques ont chacune leurs inconvénients. Qu'apporte de nouveau le concept de cuve « souple » d'ABB ?

2 Soumise à un arc de 20 MJ, la cuve souple subit des contraintes bien moindres que si elle était rigide, d'où un risque de rupture plus faible.



2a Cuve ouverte



2b Cuve souple



2c Cuve rigide

le problème de l'huile. Reste que c'est un gaz à effet de serre très actif qui, en cas de fuite, présente de graves risques de pollution atmosphérique.

Déformable

ABB étudie les moyens de diminuer le risque feu dans les transformateurs de forte puissance depuis les années 1990. Après avoir examiné plusieurs technologies, le Groupe décida en 2007 de travailler sur le concept de cuve « souple ».

L'idée est d'absorber une certaine quantité d'énergie d'arc confinée par la déformation de la cuve jusqu'à un seuil de rupture. Par sécurité, le point de rupture est généralement

situé au bord du couvercle afin de réduire le risque de projection dangereuse et d'épandage d'huile.

Dans un transformateur équipé d'un dispositif d'évacuation de la pression (disque de rupture ou chambre d'expansion), des études ont montré que même une grande surface de détente (1 à 1,5 m²) ne diminuait le pic de pression que de 10 à 30 % lors d'un arc interne, ce qui ne suffit pas à réduire le risque d'éclatement en conditions normales [4]. Un inconvénient que n'a pas la cuve souple.

Tenue en surpression

Le concept de cuve souple inclut de nombreuses fonctions de sécurité qui réduisent le risque d'incendie ou de perte de diélectrique en cas de défaut interne → 3.

Structure de la cuve → 3a

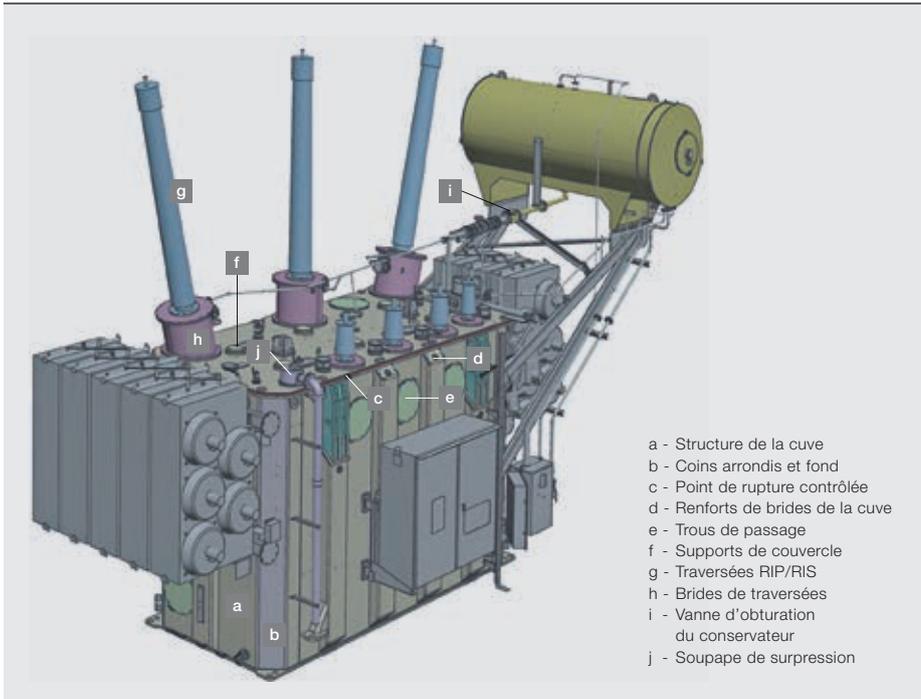
et point de rupture contrôlée → 3c

La résistance théorique de la cuve a été étudiée et validée par une simulation numérique en 3D reposant sur une ana-

Après avoir étudié plusieurs technologies, ABB a décidé en 2007 de miser sur le concept de cuve « souple ».

lyse par éléments finis (AEF). Celle-ci a tenu compte de la non-linéarité des matériaux, de la grande déformation et d'un maillage fin soigneusement choisi; les résultats ont été soumis à un ingénieur expérimenté. L'AEF applique le modèle d'état quasi statique qui repose sur l'hypothèse prudente d'une expansion isotherme de la bulle de gaz et d'une distribution uniforme de la pression, amplifiée par un facteur dynamique. La résistance de la cuve est fonction de la prédiction du point de rupture contrôlée, prédéfini au niveau de la soudure du couvercle. Les résultats de l'étude sont détaillés dans un rapport technique, fourni au client à la commande du transformateur.

3 Tenue mécanique de la cuve



Par sécurité, le point de rupture est généralement situé au bord du couvercle pour réduire le risque d'écoulement ou de projection d'huile.

4 Casse des renforts de brides



Coins arrondis et fond de cuve → 3b

Les joints de soudure au niveau des coins de cuve ainsi qu'entre les parois et la plaque de fond sont des points probables de défaillance en cas de formation d'arc. C'est pourquoi une cuve souple a des coins arrondis pour éloigner la soudure de ces zones sous forte contrainte. La liaison paroi-fond est également souple, ce qui réduit encore le risque de rupture. Pour renforcer la sécurité, toutes les soudures de la cuve sont à pénétration complète et leur résistance est contrôlée par ultrasons en fabrication.

Renforts de brides → 3d et supports de couvercle → 3f

Des recherches sur les défaillances de transformateurs ont montré que les renforts de brides et les supports de couvercle, soumis à une forte charge, étaient les premiers à lâcher en cas de défaut

5 Essai en pression du trou d'homme



interne → 4. L'AEF en tient compte pour améliorer la précision des résultats.

Trous de passage → 3e et brides de traversées → 3h

Un essai expérimental [5] effectué au laboratoire de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) a validé la résistance à la surpression du trou d'homme de la cuve → 5, de même que celle du système de boulonnage avec joints toriques des brides, soupapes et traversées.

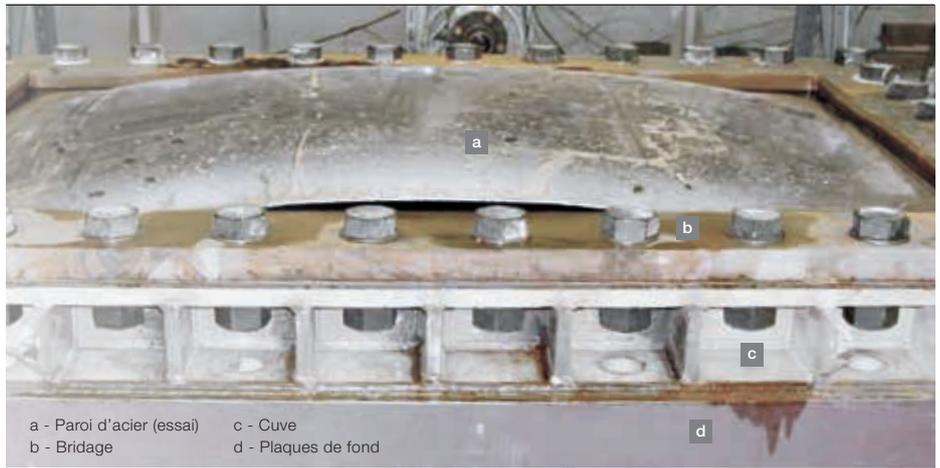
Traversées RIP et RIS → 3g

Les traversées RIP et RIS, qui ne contiennent qu'une très petite quantité d'huile, réduisent le risque de fuite, d'incendie et d'explosion de la porcelaine.

Vanne d'obturation du conservateur → 3i

et soupape de surpression → 3j

Située sur la canalisation de raccordement à la cuve, la vanne du conserva-



Toutes les soudures sont à pénétration complète et leur résistance est contrôlée par ultrasons en fabrication.

teur → 6 laisse s'écouler librement l'huile dans les deux sens mais elle se ferme et déclenche une alarme si le débit dépasse un certain seuil. Ainsi, l'huile ne risque pas de s'échapper ni d'alimenter l'incendie.

L'expertise ABB

En un quart de siècle, ABB a acquis de précieuses connaissances sur les méthodes pour diminuer les risques de rupture de cuve de transformateur. Les premiers transformateurs à cuve souple ont vu le jour en 2007, dans l'usine ABB de Varennes, au Canada. Ces cinq dernières années, ABB a conçu, analysé et livré plus d'une vingtaine de ces appareils (autotransformateurs, transformateurs élévateurs, inductances shunt et transformateurs monophasés ou triphasés), qui ont encore enrichi son retour d'expérience. Les développements en cours améliorent la corrélation entre prédictions de défaillance AEF et essais expérimentaux → 7. En conclusion, la cuve souple constitue la réponse la plus simple et la plus efficace au risque de rupture de cuve.

Samuel S. Brodeur

Yasser S. Salmi

ABB Power Grids,
Large and Medium Power Transformers
Varennes (Canada)
samuel.s.brodeur@ca.abb.com
yasser.s.salmi@ca.abb.com

Andrew Collier

ABB Power Grids,
Large and Medium Power Transformers
Bad Honnef (Allemagne)
andrew.collier@de.abb.com

Bibliographie

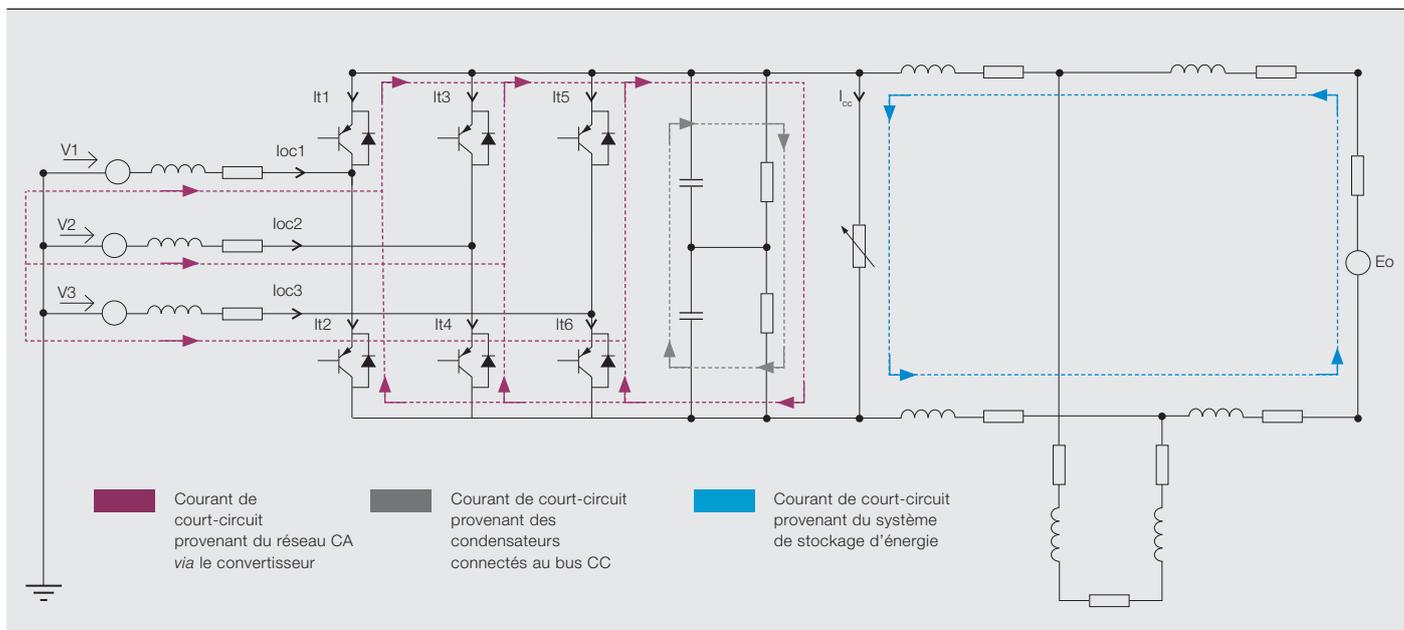
- [1] Foata, M., Dastous, J.-B., *Power transformer tank rupture prevention*, Cigré, Paris, 2010.
- [2] Cigré, *Guide des meilleures pratiques de sécurité incendie des transformateurs*, groupe de travail A2.33, brochure technique n° 537, 2013.
- [3] Dastous, J.-B., *et al.*, « Numerical Method for the Investigation of Fault Containment and Tank Rupture of Power Transformers », *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n° 3, p. 1657–1665, juillet 2010.
- [4] Foata, M., *Transformer Fire Risk and Mitigation*, session Cigré 2010, Paris.
- [5] Beauregard, S., *et al.*, *Essai en pression du trou d'homme sur enceinte rigide*, rapport IREQ EMMH-2013-015, Varennes (Canada), 2013.



Protection rapprochée

Comment protéger des défauts les microréseaux en courant continu basse tension comportant des générateurs photovoltaïques ?

MARCO CARMINATI, ENRICO RAGAINI – Le raccordement de microréseaux alimentés par des sources d'énergie renouvelables aux grands réseaux de distribution a bien des avantages. Il convient néanmoins d'être prudent dans le couplage de ces deux « domaines électriques » très différents et de s'assurer que les régimes de défaut sont correctement pris en compte. C'est notamment le cas quand un microréseau comprenant une installation photovoltaïque (PV) ou un système de stockage d'énergie est raccordé au réseau en courant alternatif (CA) par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance. Dans cette configuration, des courants de défaut peuvent transiter du réseau CA directement dans le convertisseur, aggravant la situation. Les convertisseurs de puissance connectés au réseau sont dans leur majorité constitués de transistors bipolaires à grille isolée IGBT, associés à des diodes de roue libre; ils sont généralement incapables de couper les courants de défaut. Il faut donc un système de protection spécifique pour éliminer ces défauts et sécuriser le réseau, surtout en présence de générateurs à courant continu (CC) ou de dispositifs de stockage d'énergie.



Le raccordement aux systèmes CA de microréseaux en courant continu basse tension (CCBT) comportant des centrales PV est de plus en plus au cœur des débats que soulève l'injection croissante d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution. Au-delà des questions électriques que pose habituellement ce couplage, il faut aussi s'intéresser à la façon d'en traiter les défauts. En effet, selon les différents schémas possibles de liaison à la terre, les centrales PV, les systèmes de stockage et leur électronique se comportent différemment en régime de défaut, ce qui peut avoir diverses conséquences sur l'exploitation du réseau et la perturbation.

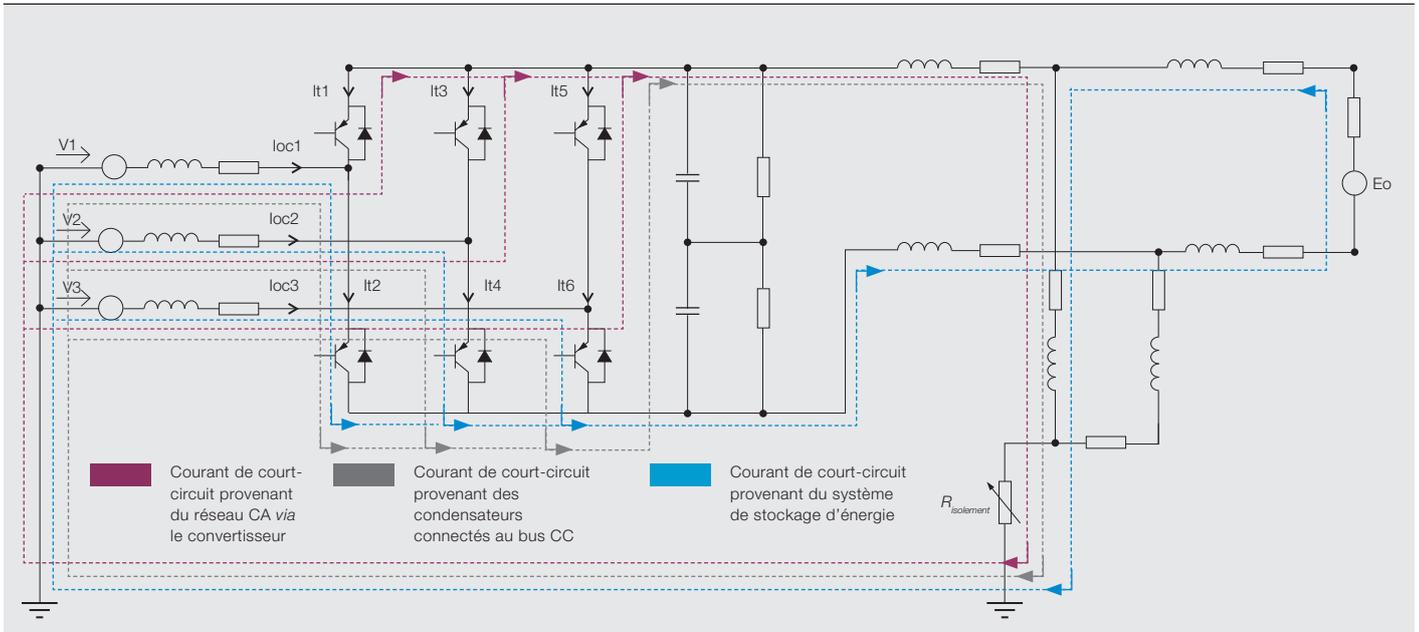
Photo p. 23

L'injection croissante d'électricité renouvelable en provenance des microréseaux oblige à protéger les équipements contre les défauts du réseau de distribution principal.

Dans un microréseau CCBT, la partie CC est traditionnellement séparée du réseau CA par un convertisseur de puissance qui injecte le surplus de production du microréseau sur le réseau principal. Ce principe se heurte à une difficulté majeure: lorsque des courts-circuits et des défauts d'isolement à la terre surviennent côté CC, les convertisseurs classiques sont globalement incapables de limiter les courants de défaut. Il en va ainsi des convertisseurs à IGBT dotés de diodes de roue libre montées en

Il faut réfléchir à la façon de traiter les défauts car les centrales photovoltaïques, les systèmes de stockage d'énergie et leur électronique peuvent y réagir différemment.

antiparallèle → 1, configuration la plus répandue. Sachant qu'un courant important en provenance du réseau CA peut passer dans ces diodes, il faut une protection spécifique pour y remédier. Précisons au passage que les redresseurs commandés à thyristors ne peuvent pas faire office de convertisseurs côté réseau: en effet, en cas d'inversion du flux de puissance, ils nécessitent un changement de polarité de la tension, ce qui a évidemment des conséquences



désastreuses sur les dispositifs reliés au bus CC.

Le recours à des disjoncteurs correctement calibrés, en dépit du risque d'échauffement des semi-conducteurs causé par l'énergie traversant l'équipement, permet de limiter le courant, de préserver la sécurité et d'éviter une plus grande détérioration de l'installation.

Les deux grands types de défauts en cause sont les courts-circuits et les défauts d'isolement à la terre.

Courts-circuits

L'apparition d'un court-circuit entre les bornes du bus CC d'un microréseau sans aucune source côté CC donne lieu à plusieurs scénarios, selon la valeur de la résistance de défaut: si, pour une résistance élevée, le convertisseur est capable de maintenir la tension CC au nominal, en dessous d'une certaine valeur, il commence à fonctionner en surmodulation.

Une résistance de court-circuit très faible, proche de zéro, est la condition limite; le courant circulant dans les diodes de roue libre, le convertisseur fonctionne alors comme un redresseur en court-circuit. Dans ce cas, le courant n'est plus limité par le convertisseur. Le courant de court-circuit est la somme des contributions du réseau CA, des condensateurs connectés au bus CC et, s'il y a lieu, des générateurs CC ou du

système de stockage d'énergie dans le convertisseur → 1.

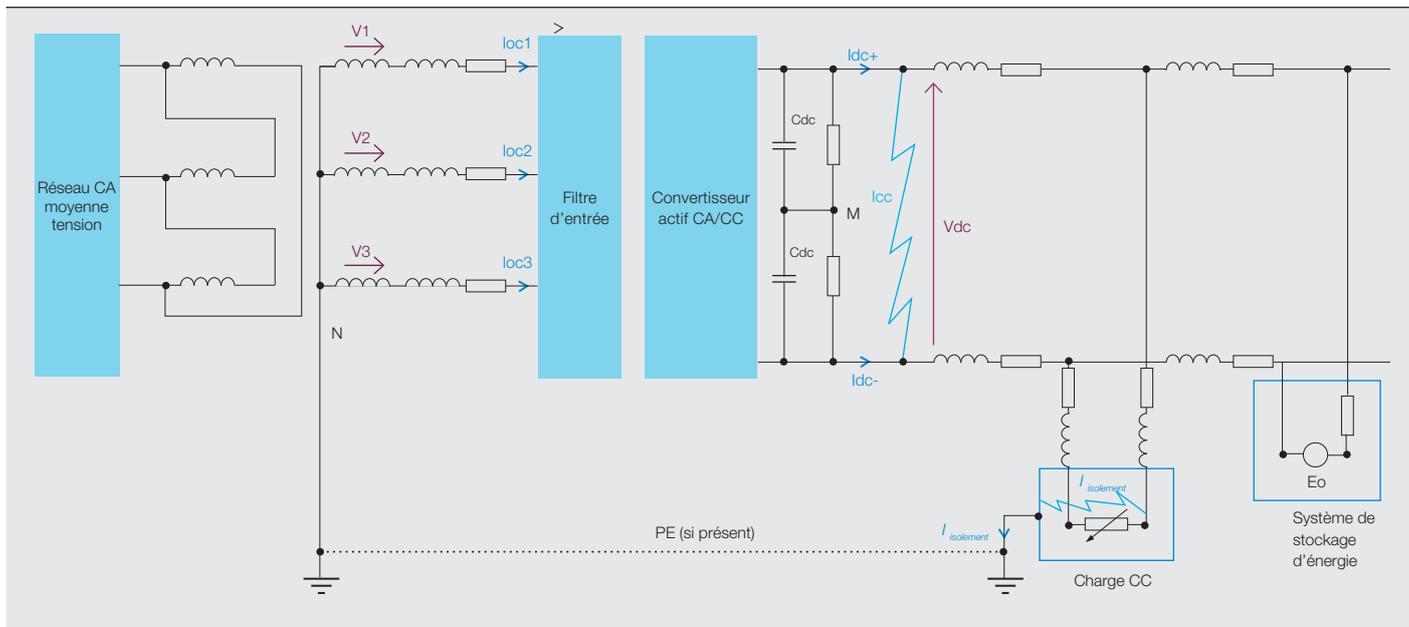
Si une centrale PV ou un dispositif de stockage est installé côté CC, un courant de défaut supplémentaire est fourni par le générateur actif, chaque contribution étant fonction de l'architecture du microréseau. Par ailleurs, la composante active, qui comprend une commande avec sa propre boucle de tension, permet également de maintenir la tension CC à une valeur supérieure à celle d'un réseau CC passif. Par conséquent, les valeurs de la résistance de court-circuit pour lesquelles le convertisseur commence à limiter le courant absorbé en provenance du côté CA (et auxquelles la commande passe en surmodulation) sont inférieures à celle d'un réseau CC passif.

Cela signifie qu'il est impossible, dans les microréseaux équipés de centrale PV ou de système de stockage, de calculer le courant de défaut en superposant les valeurs obtenues de chaque source, car celles-ci s'influencent mutuellement de diverses façons qui ne sont pas toujours manifestes à première vue. Il faut donc, dans chaque cas, calculer les courants de défaut en tenant compte du système dans sa globalité.

Défauts d'isolement

Les parties CC des installations électriques sont en général isolées de la terre. Par ailleurs, pour des questions de

Lors de courts-circuits et de défauts d'isolement à la terre côté CC, les convertisseurs classiques sont majoritairement incapables de limiter les courants de défaut.



Il existe deux grands types de défauts dont il faut se prémunir côté CC : les courts-circuits et les défauts d'isolement à la terre.

sécurité, le transformateur côté CA du convertisseur est normalement mis à la terre.

Quand survient un défaut d'isolement côté CC, les courants de défaut peuvent traverser le convertisseur, avec des effets inattendus.

Dans le cas d'un réseau CC passif, selon la résistance de défaut, c'est le même scénario que celui décrit plus haut : le convertisseur passe en surmodulation et finit par se comporter comme un redresseur. Un générateur PV ou un système de stockage, même s'il contribue à maintenir la tension CC à une valeur supérieure à celle d'un microréseau purement CC passif comparable, fournit un chemin de retour pour une composante de courant unidirectionnelle, à de faibles valeurs de résistance de défaut.

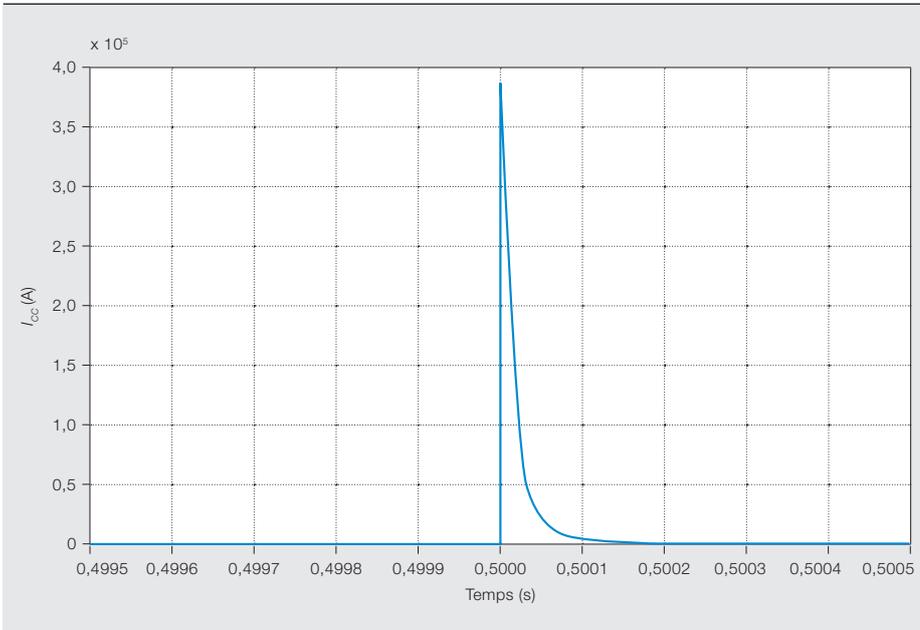
En fait, un défaut d'isolement à la terre dans l'un des deux pôles du réseau CC crée pour le courant un chemin de retour vers le point neutre CA. Pour de faibles

valeurs de résistance de défaut, et dans le cas d'un défaut sur le pôle positif, la contribution au défaut du réseau CA passe dans les diodes de roue libre de la cathode du convertisseur, alors que celle du système de stockage traverse les IGBT de l'anode → 2. C'est l'inverse si le défaut se produit sur le pôle négatif.

Les courants peuvent alors s'évacuer par les deux bornes CC du convertisseur, et non par une seule, comme c'est

Dans les microréseaux équipés de centrale PV ou de système de stockage, il est impossible de calculer le courant de défaut en superposant les valeurs obtenues de sources individuelles, car chacune influence les autres de façons qui ne sont pas évidentes à première vue.

normalement le cas. Ces courants sont suffisamment élevés pour endommager le convertisseur. On a tort de les négliger quand on calcule en conception le courant de défaut à la terre.



Dans le cas d'un court-circuit CC avec une faible résistance de défaut, le courant de défaut circule dans les diodes de roue libre sans que les IGBT n'aient un quelconque moyen de le limiter.

Concrètement, le système de protection électronique intégré au convertisseur mesure la tension aux bornes de l'IGBT lorsqu'une tension V_{CE} est appliquée sur l'électrode de grille. Si V_{CE} est supérieure à la tension de seuil V_{ref} , le circuit de commande bloque le transistor, ouvrant la grille. Cette protection par « mesure de désaturation » (abrégée *DESAT*) bloque les IGBT quelques microsecondes après que le courant les parcourant a dépassé un seuil de référence. Par conséquent, la contribution au courant de défaut de la centrale PV ou du système de stockage est interrompue en arrêtant la modulation du signal de commande des IGBT. Reste la contribution au défaut du réseau CA, toujours alimentée par le convertisseur au travers de ses diodes de roue libre non commandées : d'où l'installation d'une protection externe appropriée pour interrompre le courant de défaut et préserver le convertisseur.

Étude de cas

Plusieurs simulations ont permis d'étudier le comportement du microréseau → 3 sur défauts de court-circuit et d'isolement. D'habitude, le neutre du transformateur est mis à la terre pour éviter un transfert de tension dangereux vers le côté BT en cas de défaut entre primaire et secondaire.

Dans le cas du court-circuit CC avec faible résistance de défaut, le courant de défaut circule dans les diodes de roue libre sans que les IGBT n'aient un quelconque moyen de le limiter, même si la

commande leur envoie un signal de blocage. L'arrêt de la modulation IGBT est ici inefficace car la diode en antiparallèle fait fonctionner le convertisseur en redresseur à pont de diodes triphasé. Les courants peuvent atteindre des valeurs égales à plusieurs fois le courant nominal du convertisseur côté CC (125 A, avec $R_{court-circuit} = 1 \text{ m}\Omega$) → 4.

Avec de faibles résistances de défaut, la contribution du convertisseur au courant de court-circuit peut valoir jusqu'à 16 fois son courant nominal côté CC.

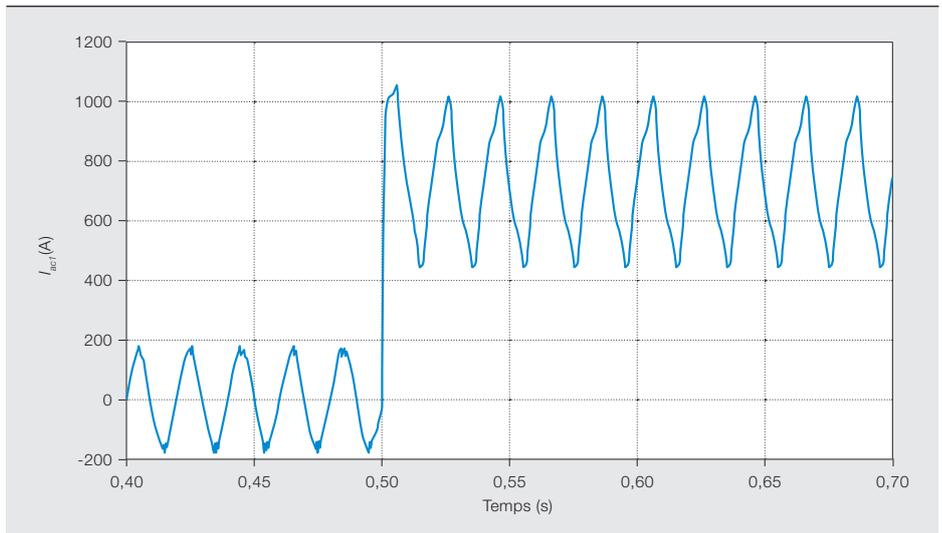
Dans le cas du défaut d'isolement CC avec faible résistance de défaut, le courant de défaut circule dans les diodes de roue libre de la cathode, sans que les IGBT n'aient un moyen de le limiter, tout comme les IGBT de l'anode. Les courants atteignent des valeurs égales à plusieurs fois le courant nominal du convertisseur côté CC (125 A, avec $R_{isolement} = 100 \text{ m}\Omega$) [1]. L'arrêt de la modulation IGBT n'interrompt que la contribution au défaut du système de stockage d'énergie.

Suivant la valeur de $R_{isolement}$, le courant côté CA peut être complètement positif ; toute la composante CA absorbée par le convertisseur pendant un défaut transfère la puissance au défaut [1] → 5.

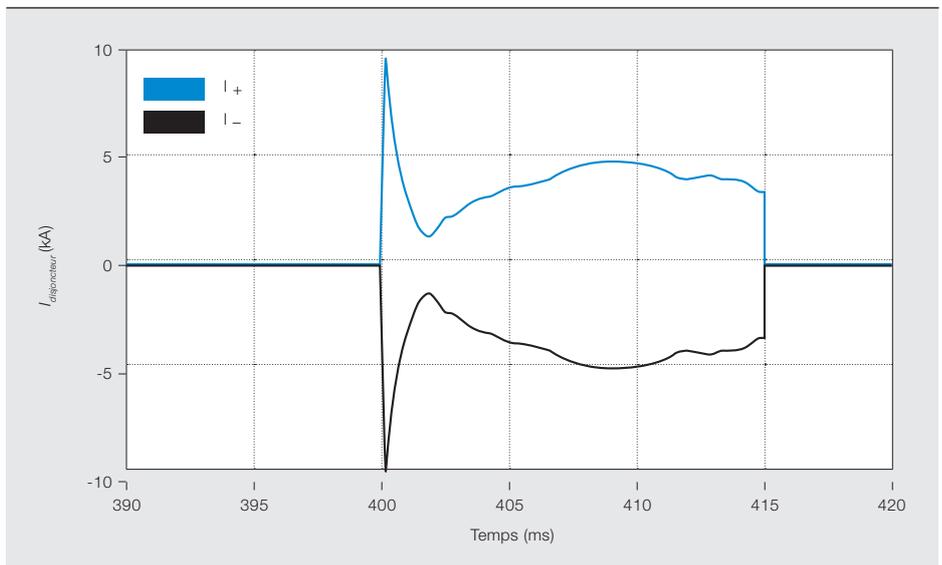
Avec la diminution de $R_{isolement}$, la contribution du convertisseur au courant de court-circuit peut atteindre 27 fois son courant nominal côté CC. Il est impos-

Face à l'interconnexion croissante des micro-réseaux en courant continu basse tension et des réseaux de distribution en courant alternatif, la protection contre les défauts pèsera de plus en plus sur la conception du système électrique.

5 Variation du courant lors d'un défaut d'isolement côté CC (avec système de stockage d'énergie et $R_{\text{isolement}} = 100\text{ m}\Omega$)



6 Courants circulant dans les deux pôles du disjoncteur



sible de la supprimer par le blocage des IGBT puisqu'elle passe dans les diodes de roue libre.

Protection

Notons que si un disjoncteur unipolaire convient à la protection contre les courts-circuits CC, il faut un disjoncteur bipolaire pour les défauts d'isolement à la terre car la centrale PV et le système de stockage peuvent fournir le défaut par le pôle CC sain. Qui plus est, le défaut d'isolement risque de se produire aussi bien sur le pôle positif que sur le pôle négatif.

Court-circuit

Pour simuler le court-circuit CC, la modulation est arrêtée après un temps de protection DESAT de $2\ \mu\text{s}$; pour simuler un disjoncteur CC, le déclenchement est retardé de $15\ \text{ms}$ → 6 [2].

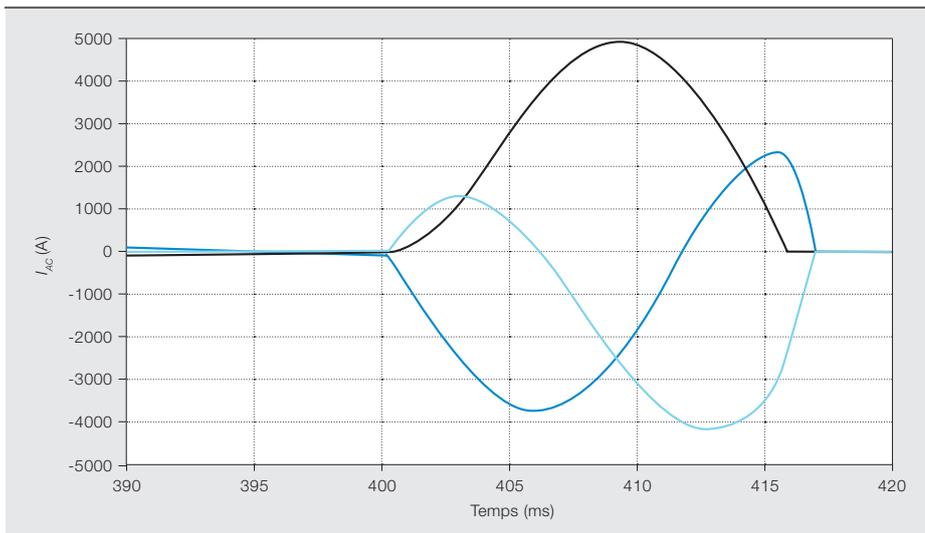
On réduit la surtension en installant le disjoncteur à l'aval des condensateurs du bus CC. Avec la protection DESAT, les courants → 7 circulent dans les diodes du convertisseur.

Le contenu énergétique d'un transitoire I^2t pendant l'interruption est d'environ $170\ \text{kA}^2\text{s}$; c'est trop pour le convertisseur utilisé. Les semi-conducteurs de la simulation admettant $42\ \text{kA}^2\text{s}$, il faut surdimensionner les diodes pour permettre au convertisseur de résister au transitoire.

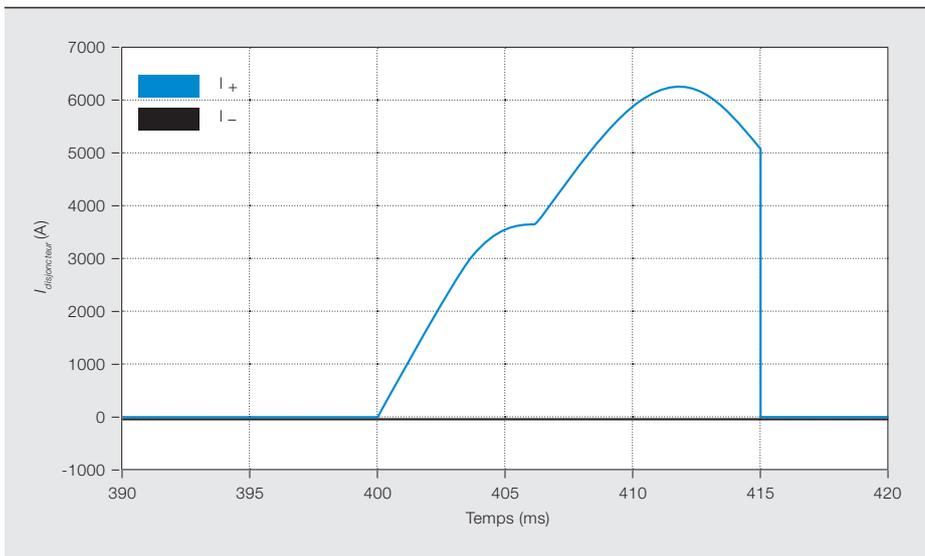
Isolement à la terre

Le même défaut que le précédent est simulé entre le pôle CC positif et la terre, et interrompu par un disjoncteur CC [2]. Les courants CA résultants sont semblables à ceux du court-circuit entre

7 Courants CA dans les trois phases pendant le déclenchement du disjoncteur



8 Courants circulant dans les deux pôles du disjoncteur



pôles. Par contre, les courants circulant dans les pôles CC du convertisseur sont très différents → 8 : le courant traversant le pôle en défaut augmente, quand celui parcourant l'autre pôle reste proche de zéro, grâce à la protection DESAT. Le transitoire I^2t d'environ 157 kA²s est comparable à celui du court-circuit : là encore, il faut surdimensionner les diodes.

En résumé, les défauts CC entre pôles et entre pôles et terre dans des réseaux CC alimentés par un convertisseur et équipés de générateurs PV et/ou de systèmes de stockage d'énergie ne sauraient être négligés. Or la protection DESAT ne suffit pas à protéger les composants de commutation du convertisseur car l'arrêt de la modulation IGBT ne limite pas les courants circulant dans les diodes de roue libre. C'est pourquoi il faut insérer et

soigneusement calibrer des dispositifs de protection spécifiques pour couper en sécurité les courants de défaut et limiter les conséquences dommageables à l'installation.

L'interconnexion croissante des micro-réseaux CCBT et des réseaux de distribution CA oblige à renforcer et à perfectionner la protection contre les défauts, qui jouera de plus en plus un rôle capital dans la conception du système électrique.

Marco Carminati

Enrico Ragaini

ABB Electrification Products,
Protection and Connection
Bergame (Italie)

marco.carminati@it.abb.com

enrico.ragaini@it.abb.com

Bibliographie

- [1] Carminati, M., *et al.*, « DC and AC ground fault analysis in LVDC microgrids with energy storage systems », actes *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Rome, p. 1047–1054, 2015.
- [2] Carminati, M., *et al.*, « Fault protection analysis in low-voltage DC microgrids with PV generators », actes *5th International Conference on Clean Electrical Power Renewable Energy Resources Impact*, Taormine (Sicile), p. 190–197, 2015.

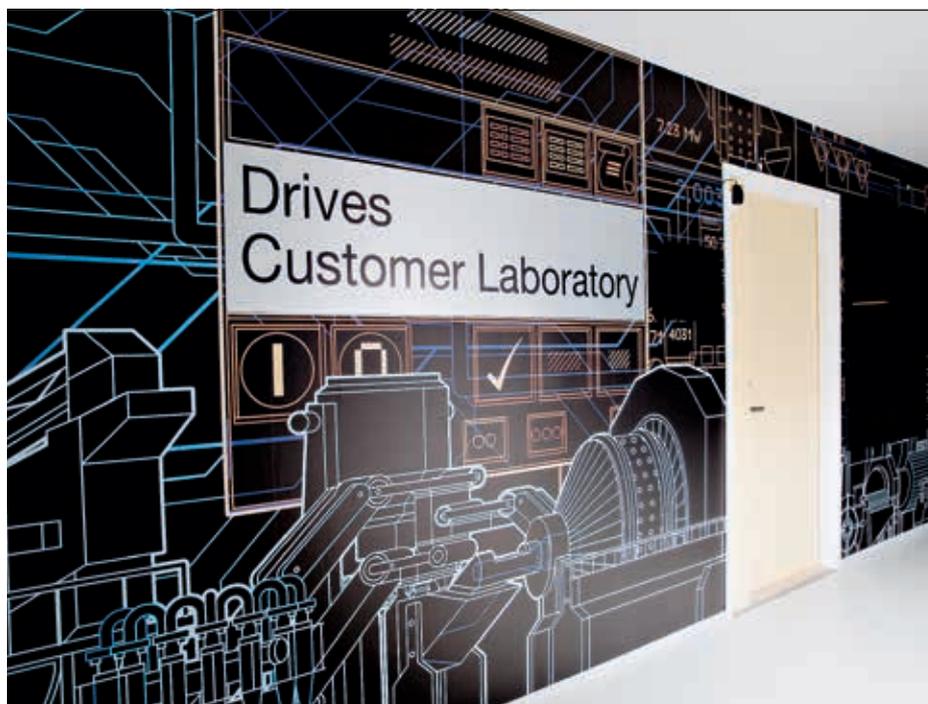


Les variateurs au banc

Optimiser les solutions moteur et variateur grâce au nouveau laboratoire d'essais ABB

JUKKA JUOTTONEN – Le laboratoire d'essais d'ABB, qui jouxte son usine d'Helsinki, est l'une des rares installations du Groupe destinée en priorité à ses clients. Ces derniers peuvent y faire mesurer, au moyen d'appareils de très grande précision, la dynamique, la capacité de charge et le rendement de l'association moteur-variateur afin de déterminer l'entraînement optimal pour l'applica-

tion et donc diminuer les coûts, l'encombrement et la consommation énergétique de l'ensemble. Il est également possible de vérifier la performance de la commande moteur et d'adapter les moteurs du client aux variateurs ABB : un excellent moyen pour valider et agréer rapidement la fourniture ABB.



Depuis quelques décennies, les moteurs sont de plus en plus conçus pour être associés à des variateurs de fréquence, toujours plus performants et moins chers. Parallèlement, l'intérêt économique de la vitesse variable est devenu une évidence pour les constructeurs de machines et autres utilisateurs.

Ce laboratoire d'essais → 1 facilite la procédure d'agrément d'ABB en tant que nouveau fournisseur. Le client peut ainsi tester sur banc une combinaison moteur-variateur avant même d'intégrer un nouveau produit ABB à sa production. C'est là une méthode simple et fiable pour définir au plus juste les spécifications optimales de l'entraînement, évitant ainsi de surdimensionner l'appareil, ses protections et son câblage.

Photo p. 30

Dans le nouveau laboratoire d'essais ABB dédié à la vitesse variable, les clients peuvent tester leurs moteurs avec des variateurs ABB pour trouver l'accord parfait.

Optimisation et validation à la clé

Ce laboratoire d'essais clients est un concept inédit qui s'adresse en priorité aux grands comptes tels que les constructeurs OEM, les intégrateurs de systèmes et les partenaires ABB, notamment de l'industrie mécanique.

L'achat d'un variateur est un investissement ; avant de se décider, le client veut disposer de mesures objectives et de fonctionnalités éprouvées. Pour cela, il peut désormais tester ses moteurs chez ABB et obtenir des mesures précises sur les performances dynamiques, la capacité de charge et le rendement pour valider sa solution d'entraînement.

Il peut aussi y vérifier les performances de la commande moteur et adapter ses moteurs aux variateurs ABB : une démarche particulièrement utile quand il s'agit d'investir dans un nouveau produit. Les clients d'ABB attendaient ce service depuis des années ; pour preuve, tous les créneaux d'essais étaient déjà réservés plusieurs mois avant l'ouverture du laboratoire.

Le client envoie normalement son moteur quelques semaines auparavant pour préparer le banc. L'essai se déroule en présence d'une équipe du client qui

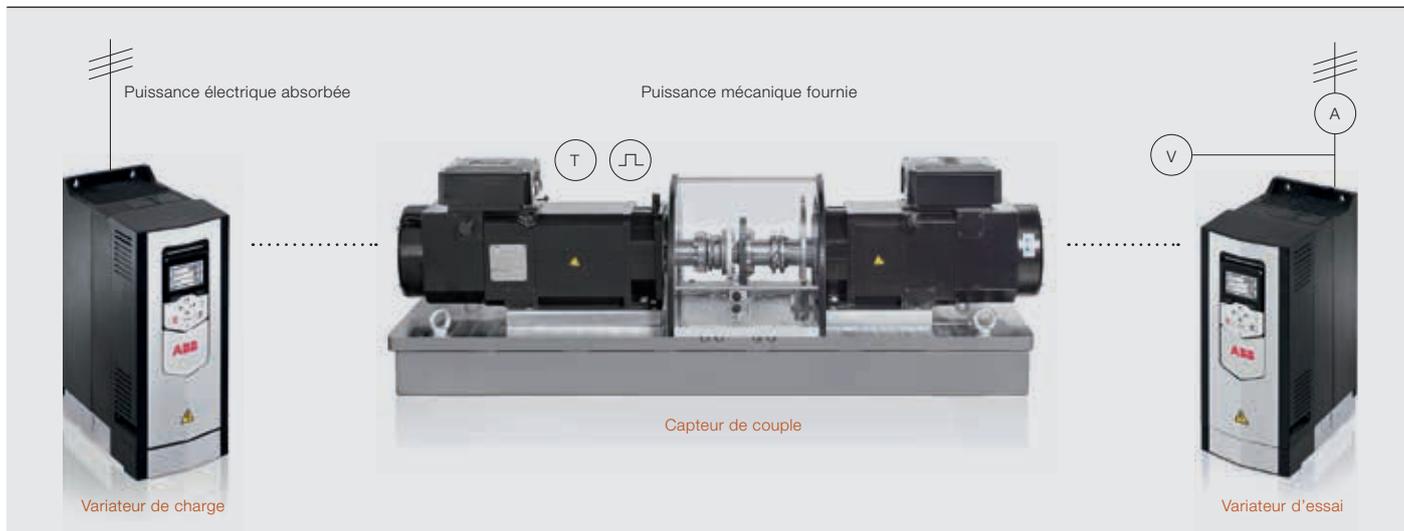
Le laboratoire d'essais de variateurs ABB est un concept inédit destiné en priorité aux constructeurs OEM, intégrateurs et autres partenaires du Groupe.

assiste au relevé des mesures en temps réel ; leur extrême précision garantit un fonctionnement du système conforme aux spécifications.

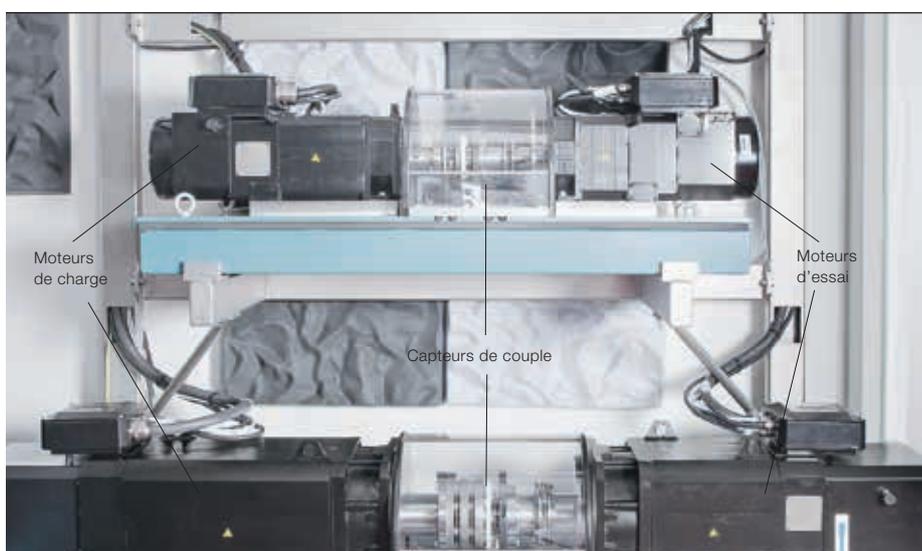
Une fois connues les exigences de performance de l'entraînement, il ne reste plus qu'à sélectionner le variateur *ad hoc* ou à le concevoir sur mesure pour coller à l'application.

Autrement dit, l'acheteur peut s'appuyer sur des données objectives, précises et vérifiées pour prendre sa décision : un gain de temps indéniable !

2 Le variateur de charge simule l'application cliente et mesure les performances du variateur d'essai.



3 Moteurs d'essai client (à droite) et moteurs de charge ABB (à gauche)



Haute précision

L'un des points forts du laboratoire est la fiabilité de son banc de mesure de couple haute précision → 4 qui convient à pratiquement tous types de moteurs jusqu'à 385 kW.

Il est également possible de tester tous les moteurs ABB, et pas seulement ceux du client.

Vitesse de rotation, couple et rendement peuvent être mesurés à n'importe

Trois configurations sont possibles en fonction de la hauteur d'axe (100, 160 ou 250 mm).

Un moteur ABB de la série HDP à performances dynamiques élevées simule la charge réelle de l'application cliente. Le moteur de charge et le moteur d'essai sont chacun raccordés à un variateur ABB → 2,3. Ce montage permet de vérifier et d'optimiser l'adéquation moteur-variateur.

Ce nouveau laboratoire simplifie la validation de la solution moteur-variateur du client.

quel régime de fonctionnement donné ; le client a même la possibilité de définir ses propres points de test → 5.

4 Capteur numérique pour la mesure de couple et de vitesse de rotation



Le laboratoire permet aussi de vérifier les performances de la commande moteur et d'adapter les moteurs du client aux variateurs ABB.

5 Caractéristiques techniques du laboratoire d'essais

Paramètres et essais

- Paramètres : mesure de grandeurs électriques et mécaniques
- Essais : performance dynamique, capacité de charge, rendement à différents régimes de charge (au choix du client)
- Fonctionnement des variateurs ABB à différents réglages de vitesse et de couple

Méthodes

- Mesure de la puissance électrique dans le réseau en amont du variateur d'essai ABB
- Mesure de la puissance mécanique entre moteur de charge et moteur d'essai
- Calcul du rendement du système à partir des mesures de puissance électrique et mécanique

Matériels

- Analyseur de puissance haute précision Yokogawa WT3000
- Capteur de couple HBM T40B
- Système de mesure de courant haute précision Hitec MACC plus

Étendues de mesures

- Trois configurations : configuration maxi jusqu'à 385 kW ; mini jusqu'à 8,2 kW (plus faible point de charge 25 %)
- Capteur de couple : vitesse maxi 20 000 tr/min

Avec ce nouveau laboratoire, ABB renforce sa position de partenaire agile et réactif, particulièrement attentif aux exigences de proximité et de collaboration étroite avec les clients, en particulier les constructeurs de machines.

Avant lancement sur ses chaînes de production, le client peut tester le couple moteur-variateur et vérifier son adéquation aux besoins de l'application.

Jukka Juottonen

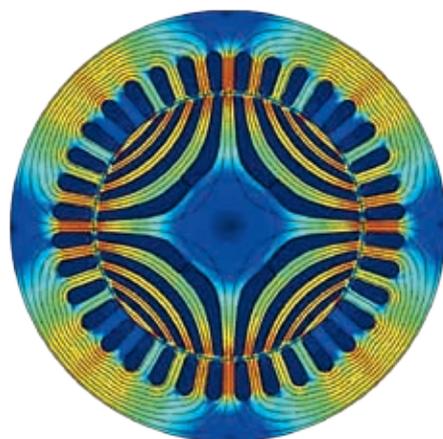
ABB Discrete Automation and Motion,
Drives and Controls
Helsinki (Finlande)
jukka.juottonen@fi.abb.com



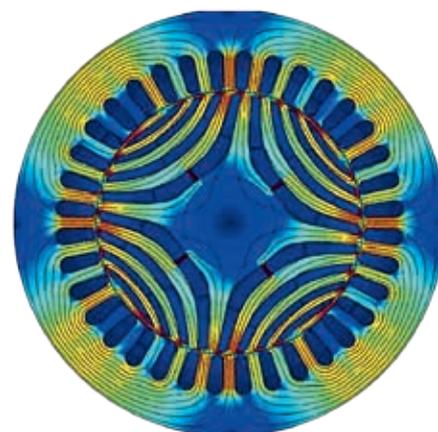
Tour de force

Des moteurs électriques sans terres rares pour des solutions d'entraînement écoénergétiques

FREDDY GYLLENSTEN, PETER ISBERG, ALESSANDRO CASTAGNINI, GIULIO SECONDO, JOUNI IKÄHEIMO, ARI TAMMI – Dans l'industrie, les moteurs électriques à haut rendement énergétique utilisent souvent des aimants permanents contenant des terres rares, comme le néodyme et le dysprosium. Or ces matériaux essentiels à leur fabrication souffrent de la volatilité des prix sur des marchés tendus. Heureusement, les récents progrès des technologies de moteurs commandés en vitesse variable permettent de s'en affranchir. À la solution des moteurs synchrones à réluctance *SynRM* d'ABB, que caractérisent un très haut rendement, une grande fiabilité opérationnelle et une remarquable facilité d'entretien, s'ajoute celle du moteur à aimants en ferrite *SynRM²*, encore plus puissant et écoperformant.



1a Rotor-champ alignés : pas de couple



1b Rotor-champ non alignés : couple dans le sens anti-horaire

Utilisés depuis plus d'un siècle, les moteurs électriques ont accompli d'immenses progrès technologiques qui se sont spectaculairement accélérés ces dernières années pour répondre aux exigences d'efficacité énergétique.

Ces moteurs jouent un rôle important dans la conversion de l'énergie en force motrice, absorbant 28 à 30 % de la production électrique. On comprend dès lors que leur rendement soit pointé du doigt ! En témoignent les exigences minimales de la réglementation MEPS (*Minimum Energy Performance Standard*) définies par la norme harmonisée de classement IE (*International Efficiency*), auxquelles se plient toutes les grandes régions industrielles ; des seuils parfois relevés dans chaque pays pour réduire encore la consommation énergétique et l'empreinte carbone de l'industrie. À terme, quasiment toute la plage de puissances (0,12 à 1000 kW) des moteurs basse tension (50 à 1000 V) directement

couplés au réseau électrique devra être de classe IE3 « premium ». Si cette obligation de haut rendement énergétique ne s'applique pas encore aux moteurs associés à un variateur de fréquence, une classification devrait bientôt voir le jour.

Moteurs asynchrones (MAS)

Le moteur à induction ou « asynchrone » est de loin le plus répandu dans l'industrie. Dépourvu de collecteur ou de balais, il concilie puissance et performance, fiabilité et maintenance allégée. Il ne cesse d'évoluer pour gagner des points de rendement.

Malgré son universalité, le MAS présente quelques inconvénients liés précisément à sa vitesse de rotation asynchrone, génératrice de pertes rotoriques qui dégradent le rendement, dissipent plus de chaleur et échauffent les roulements, réduisant considérablement leur durée de vie.

Moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP)

Connus de longue date, les moteurs à courant alternatif à aimants n'ont pu vraiment rivaliser avec leurs concurrents asynchrones que dans les années 1980 avec l'apparition d'une nouvelle génération d'aimants permanents à terres rares comme l'alliage néodyme-fer-bore (NdFeB), développé indépendamment en 1982 par

General Motors (États-Unis) et Sumitomo (Japon). Pour autant, l'introduction de ces nouveaux aimants dans les moteurs était tributaire du progrès parallèle de la commande en vitesse variable.

Les aimants sont montés sur le rotor ou lui sont intégrés. À la différence des moteurs asynchrones, le rotor tourne sans « glissement », en synchronisme avec le champ magnétique. D'où une régulation plus précise de la vitesse, un meilleur rendement et une température du rotor et des roulements abaissée. Sans pertes rotoriques, les MSAP subissent

28 à 30 % de l'électricité produite est convertie en énergie mécanique dans les moteurs électriques.

moins de pertes fer ou pertes par effet Joule dans le stator (surtout à cause du courant plus faible) et affichent une courbe de rendement aplatie. Ils chauffent moins que les MAS, prolongeant la durée de vie de l'isolant et des roulements. De même, ils développent plus de couple à taille égale ou un couple identique à taille inférieure.

Ils ont aussi des inconvénients : l'utilisation de métaux rares et coûteux, comme le néodyme et le dysprosium, et un champ magnétique tournant élevé qui complique

Photo p. 34

En simplifiant la structure du rotor de ses nouveaux moteurs synchrones à réductance variable SynRM et SynRM², ABB s'affranchit des terres rares, augmente le rendement comme la densité de puissance et réduit l'encombrement.

La CEI 60034-30-1 définit des seuils de rendement énergétique pour les moteurs alimentés par le réseau (moteurs asynchrones et moteurs capables de démarrer sans convertisseur de fréquence, comme les moteurs à aimants permanents à cage). Par contre, les moteurs synchrones à réluctance variable SynRM et ceux spécialement conçus pour la vitesse variable en sont exclus ; difficile dans ces conditions de spécifier le rendement de ces types de machines. Pour autant, la normalisation évolue et la future CEI 60034-30-2 en tiendra compte. Pour l'heure, la classe de rendement des SynRM d'ABB a été définie suivant les seuils CEI 60034-30-1, même si ces moteurs ont été associés à un variateur pour les essais de classification. Par rapport à une alimentation sinusoïdale, la commande en vitesse variable augmente toujours les pertes pour le même point de fonctionnement car le variateur induit dans le moteur des tensions harmoniques élevées dues à la commutation à modulation de largeur d'impulsions, associées à de plus grandes pertes moteur. En conséquence, les gains énergétiques annoncés pour les moteurs SynRM sont des estimations basses.



Le fonctionnement à froid du moteur SynRM allonge la durée de vie de l'isolant et des roulements, permettant d'espacer les intervalles de lubrification.

la maintenance, argument pénalisant pour un grand moteur industriel.

Dans ces conditions, il se peut que les applications et clients privilégiant aujourd'hui les MSAP cherchent à terme des solutions de remplacement pour parer à l'évolution des prix et du marché.

Sans terres rares

La réponse économique et écologique à ces enjeux tient dans des moteurs affranchis des aimants à terres rares. Dans cette catégorie, ABB dispose aujourd'hui de deux moteurs alliant très haut rendement et densité de puissance élevée, sans les complications liées à ces métaux critiques : le moteur synchrone à réluctance variable SynRM et le moteur synchrone à réluctance avec aimants en ferrite SynRM².

Moteurs synchrones à réluctance pour la vitesse variable

Les moteurs à réluctance variable (MRV) fonctionnent selon un principe connu et apprécié de longue date, mais il a fallu attendre l'essor de la variation électronique de vitesse pour pleinement exploiter leurs très hauts rendements. Le rotor du SynRM est conçu pour produire la réluctance (résistance au flux d'un champ magnétique) la plus faible possible dans une direction, et la plus élevée

dans la direction perpendiculaire → 1 ; il tourne à la même fréquence que le champ statorique, comme dans un MSAP. Présentés à la Foire de Hanovre 2011, les SynRM d'ABB sont des moteurs dédiés à la vitesse variable. La même année, ils remportaient le prix de l'automatisation au Salon SPS/IPC/Drives de Nuremberg (Allemagne).

Plus performants que les asynchrones classiques, les SynRM sont conçus pour offrir un haut rendement ou une densité de puissance supérieure dans un encombrement moindre. Ils se démarquent également par une maintenance allégée, une inertie réduite et une fiabilité exceptionnelle.

Sans aimants ni cage, le rotor est plus simple que celui des MAS ou des MSAP.

Le fonctionnement à basse température d'un SynRM allonge la durée de vie de l'isolant et des roulements, permettant d'espacer les intervalles de lubrification : un atout décisif quand on sait que les défaillances de roulement figurent parmi les premières causes de panne moteur.

À l'exception du rotor, le moteur SynRM d'ABB est de construction identique à son homologue asynchrone ; la fourniture de pièces détachées et la mainte-



Les atouts des moteurs SynRM sont connus de longue date mais il a fallu attendre les progrès de la vitesse variable pour pleinement exploiter leurs très hauts rendements.

nance, tout comme le remplacement d'un MAS existant, s'en trouvent simplifiés.

Les gains en rendement des SynRM d'ABB ont été si rapides que la classifi-

rentiel applicable aux moteurs alimentés par le réseau, qui ne reflète pas convenablement le fonctionnement en vitesse variable, notamment les excellentes performances à charge partielle et les pertes

harmoniques nettement inférieures à celles des MAS pilotés par variateur.

Prolongement de l'offre de moteurs à réluctance variable SynRM, la gamme SynRM² a été lancée à Hanovre en 2014 avec un modèle de 15 kW, premier moteur IE5 d'ABB.

Deux gammes de moteurs à réluctance variable sont au catalogue ABB : SynRM IE4 (5,5 à 315 kW) et SynRM à haut rendement «HO» compact (1,1

cation IE a été largement dépassée → 2. Si l'Union européenne impose au minimum la classe IE3, ABB dispose d'ores et déjà d'une offre SynRM IE4 «super premium». Le potentiel de ces moteurs n'ayant pas encore été totalement exploré, des rendements supérieurs sont tout à fait envisageables.

Rappelons que la classification IE ne concerne que les moteurs fonctionnant en direct sur le réseau; les entraînements à vitesse variable en sont exclus. Dans ces conditions, quand les solutions moteur-variateur d'ABB sont soumises au classement «IEx», c'est selon le réf-

à 350 kW). L'offre se décline en plusieurs associations moteur-variateur → 3, 4 :

- SynRM IE4 + ACS880 pour les industriels et utilisateurs finaux ;
- SynRM IE4/HO + ACS850 pour les constructeurs de machines et équipementiers OEM ;
- SynRM IE4 + ACQ810 pour les métiers de l'eau et de l'assainissement ;
- SynRM IE4/HO + ACH580 pour les applications de chauffage, ventilation et climatisation (CVC).

Les SynRM affichent un haut rendement ou une densité de puissance supérieure tout en occupant moins de place qu'un moteur asynchrone équivalent.

5 Comparaison des performances des moteurs asynchrones, SynRM et SynRM²

Classe de rendement ²	IE2	IE3	IE4	IE5 ³
Données moteur¹ (essais avec variateur de fréquence)				
Modèle ABB	M3BP (160)	M3BP (160)	M3BL (160)	- (160)
Technologie de moteur	MAS	MAS	SynRM	SynRM ²
Puissance utile (kW)	15	15	15	15
Vitesse (tr/min)	1 500	1 500	1 500	1 500
Tension (V)	380	380	380	380
Intensité (A) ⁴	29,9	29,5	31,5	25,2
Facteur de puissance	0,845	0,838	0,763	0,949
Rendement (%)	90,6	92,2	94,7	95,2
Données variateur (tension réseau 400 V)				
Variateurs ABB utilisés lors des essais	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS850-035A	ACS880-087A
Variateurs ABB préconisés	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A	ACS880-032A
Commande moteur	DTC	DTC	DTC	DTC
Comparaison avec la solution moteur IE2 et variateur (référence)				
Charges à couple constant (75 %), utilisation 8 585 heures/an en cycle de marche				
Consommation électrique annuelle (kWh)	74 846	73 536	71 924	70 745
Économies d'électricité annuelles (kWh)	0	1 310	2 922	4 100
Économies annuelles sur la facture électrique ⁵ (€)	0	197	440	615
Puissance utile moyenne (kW)	7,6	7,6	7,6	7,6
Rendement moyen (%)	87,1	88,7	90,6	92,2
Amortissement (mois)	-	< 10	< 10	< 11
Charges à couple quadratique, utilisation 8 585 heures/an en cycle de marche				
Consommation électrique annuelle (kWh)	56 386	55 335	54 089	53 275
Économies d'électricité annuelles (kWh)	0	1 050	2 296	3 110
Économies annuelles sur la facture électrique ⁵ (€)	0	158	345	467
Puissance utile moyenne (kW)	5,7	5,7	5,7	5,7
Rendement moyen (%)	86,7	88,4	90,4	91,8
Amortissement (mois)	-	< 12	< 13	< 15

1 Essais au point de fonctionnement nominal

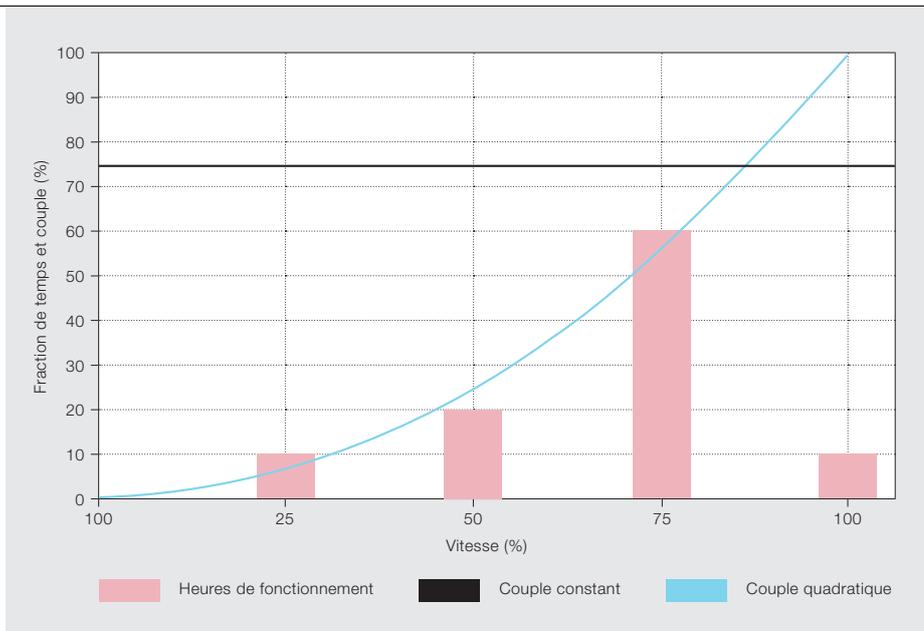
2 Seuils normalisés NF EN CEI 60034-30-1

3 En attente de spécification CEI (réduction des pertes estimée à 20 % par rapport à la classe IE4)

4 Valeurs mesurées mises à l'échelle pour harmonisation avec une tension égale de 380 V (pour comparaison seulement)

5 Au prix du kilowattheure industriel d'environ 0,15 € en Allemagne

5a Données d'essais



5b Bases de calcul de la consommation énergétique

Nous l'avons dit, le rendement énergétique est aujourd'hui un critère déterminant pour les fabricants de moteurs et de systèmes motorisés. La réglementation européenne, américaine et asiatique tendant à se durcir, non seulement pour les moteurs mais aussi pour le système auquel ils s'intègrent, ABB anticipe le mouvement avec sa technologie SynRM².

SynRM²

Prolongement de l'offre SynRM, la gamme SynRM² a été lancée à Hanovre en 2014 avec un modèle de 15 kW à hauteur d'axe CEI de 160 mm (« SH160 »), premier démonstrateur ABB de sa technologie de moteurs IE5. Cette classe de rendement, qui n'est pas encore définie par la CEI 60034-30-1, annonce une

Ce moteur se singularise par l'emploi d'aimants en ferrite (oxyde de fer Fe₂O₃), matériau normalement moins coûteux et moins vulnérable aux aléas d'approvisionnement que les terres rares; on gagne ainsi durablement sur les deux tableaux de l'économie et de l'écologie.

Par le passé, les ferrites étaient utilisées dans des applications de faible puissance. Dans l'industrie, un moteur à base de ferrite ne pouvait pas à lui seul rivaliser avec un MSAP. Pour développer assez de puissance, un moteur doit avoir une réluctance dominante, assistée par des aimants en ferrite. Les progrès rapides et l'«électronisation» croissante des variateurs de fréquence permettent aujourd'hui de maîtriser le pilotage et le

fonctionnement de ces moteurs, à l'instar des SynRM.

Le SynRM² IE5 vise les clients avides de rendement et de densité de puissance. De surcroît, ses niveaux de facteur de puissance, identiques à ceux

Après dix années de service, le coût à l'achat ne représente qu'environ 2 à 3 % de la facture électrique, tous systèmes moteur-variateur confondus.

diminution des pertes de 20 % par rapport à l'IE4, typique des baisses constatées au passage d'un niveau réglementaire à l'autre.

des MSAP, et ses excellentes propriétés d'affaiblissement du champ autorisent de nouvelles solutions moteur-variateur plus compactes. ABB travaille sur une gamme SynRM² de 0,55 à 15 kW, notamment pour la CVC. Cette technologie

ABB est en mesure de répondre aux exigences des moteurs directement couplés au réseau avec le dernier-né de sa gamme de moteurs à réluctance, DOLSynRM, présenté à la Foire de Hanovre 2015.

avantageuse est aussi proposée aux grands OEM d'autres segments applicatifs.

Comparatif des performances

Les classes de rendement IE normalisées CEI 60034-30-1 [2] sont spécifiées au point de fonctionnement nominal (c'est-à-dire à pleine charge et à vitesse maximale) des moteurs directement alimentés par le réseau. Naturellement, les valeurs de rendement des moteurs alimentés par des variateurs ne sont pas uniquement tirées de cette classification, puisque les performances à charge partielle et à vitesse variable, de même que les pertes harmoniques dans les moteurs dues aux convertisseurs de fréquence et les pertes dans ces derniers ne sont pas prises en compte. C'est pourquoi les rendements d'un système utilisant différents types de moteur et classes de rendement sont caractérisés lors d'essais, qui mettent en œuvre deux profils de charge typiques des applications industrielles à couple constant (convoyage, par exemple) et quadratique (pompage et ventilation) → 5b.

Les économies d'énergie sont également calculées sur la base d'un ensemble moteur asynchrone IE2-variateur installé en Allemagne, avec un kilowattheure industriel d'environ 15 centimes d'euros. Sachant que la facture énergétique représente l'essentiel du coût global (achat plus exploitation) d'un moteur durant son activité, la solution à haut

rendement est amortie en moins de 12 mois pour l'asynchrone IE3, 13 pour le SynRM IE4 et 15 pour le SynRM² IE5 → 5a, tous trois assistés du variateur ACS880-032A d'ABB. Au terme de cette période relativement courte, les systèmes à rendement élevé permettent de réaliser des économies durant tout le cycle de vie : après dix années de service, le prix d'achat de toutes les associations moteur-variateur du tableau ne représente qu'environ 2 à 3 % de la note électrique.

Exemple à l'appui

Au Royaume-Uni, les services de l'eau comptent parmi les activités les plus éco-énergétiques du pays. Malgré une dépense électrique annuelle totalisant quelque 13 millions de dollars, dont 90 % destinés au pompage, la station de Somerford de la société South Staffordshire Water ne fait pas exception. Pour accroître l'efficacité énergétique de ses installations, l'industriel a décidé de remplacer un moteur asynchrone de 115 kW âgé de 20 ans (piloté par un variateur ACS800 d'ABB plus moderne) par une solution associant un nouveau SynRM IE4 de 110 kW et un ACS850. Le système entraîne une pompe de forage qui débite 2,5 millions de litres par jour. Le client voulait à la fois améliorer le rendement et abaisser les coûts de maintenance en déployant le dernier cri de la technologie moteur-variateur. Les résultats ont largement dépassé ses attentes : économie d'énergie de 6 %, réduction de 58 % des points chauds sur la carcasse moteur, baisse de 28 % de la température des roulements côté commande et réduction de 75 % des nuisances sonores.

L'innovation en marche

L'offre de moteurs ABB satisfait à tous les besoins, usages et impératifs de l'industrie. Elle s'enrichit aujourd'hui de nouveaux modèles synchrones à réluctance offrant plus de puissance, de rendement et de facilité de maintenance, dans un encombrement réduit. Les vertus écologiques des moteurs SynRM et SynRM² ne se limitent pas aux économies d'énergie ; elles résident aussi dans le recours à des procédés de fabrication classiques et à des matériaux courants, à faible empreinte environnementale. ABB est également prêt à répondre aux exigences des moteurs directement couplés au réseau avec le dernier-né de la

gamme des moteurs à réluctance, DOLSynRM, présenté à la Foire de Hanovre 2015. Cette technologie associant une cage spéciale (semblable à celle des MAS) et une structure SynRM est encore à l'étude mais elle a déjà prouvé que l'on pouvait atteindre des rendements IE4, et même IE5 moyennant une optimisation soignée, sans utiliser d'aimants à terres rares ou d'autres matériaux spéciaux. Cette conception ultramoderne de moteur synchrone à réluctance est au fondement de la sobriété, de la robustesse et de la longévité des moteurs électriques du futur.

Freddy Gyllensten

Peter Isberg

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Västerås (Suède)
freddy.gyllensten@se.abb.com
peter.j.isberg@se.abb.com

Alessandro Castagnini

Giulio Secondo

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vittuone (Italie)
alessandro.castagnini@it.abb.com
giulio.secondo@it.abb.com

Jouni Ikäheimo

Ari Tammi

ABB Discrete Automation and Motion,
Motors and Generators
Vaasa (Finlande)
jouni.ikaheimo@fi.abb.com
ari.tammi@fi.abb.com

Bibliographie

- [1] Meza, M., « Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS », communication *Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology*, Orlando (Floride, États-Unis), 2014.
- [2] Norme NF EN CEI 60034-30-1, *Machines électriques tournantes – Partie 30-1 : classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau*, 2014.

LE RÉSEAU APPRIVOISÉ

Dossier *ABB review*
3^e partie

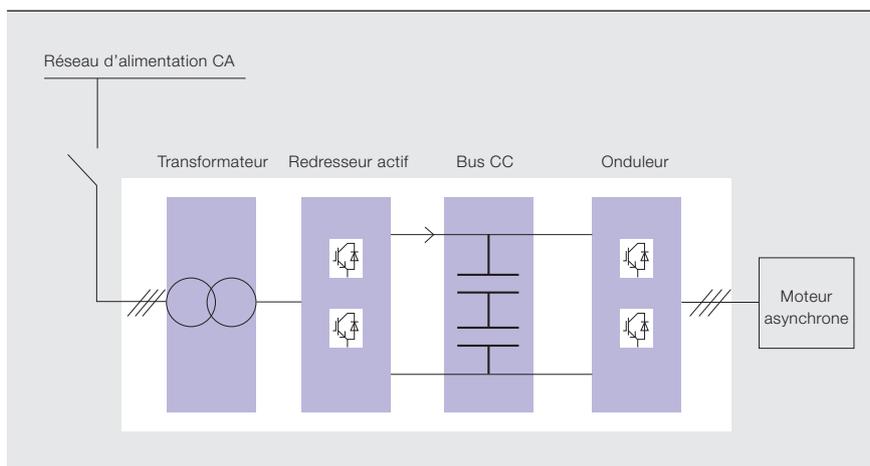


Au quart de tour

Amortissement des oscillations de torsion à l'intersection des variateurs de fréquence et des systèmes mécaniques élastiques

MEHMET MERCANGÖZ, SILVIA MASTELLONE, STEFAN ALMÉR, THOMAS BESSELMANN, PIEDER JÖRG, JOUKO NIIRANEN, LUCA PERETTI, VELI-MATTI LEPPÄNEN – Qui n'a pas en mémoire la chute d'ouvrages suspendus, au passage d'une colonne de soldats marchant au pas cadencé, ou celle du pont de Tacoma, aux États-Unis, qui s'effondra six mois après sa mise en service, sous l'effet des rafales de vent. Ces accidents sont dus à la «résonance», coïncidence d'une fréquence propre de structure et d'une fréquence d'excitation. Non amorti, ce phénomène n'épargne pas les entraînements électriques : les pulsations du couple moteur peuvent s'amplifier par résonance avec l'une des fréquences propres de la chaîne cinématique, créant des oscillations de torsion et de fortes variations de couple susceptibles de détruire les organes de transmission. Il y a trois façons de contrer ces vibrations : les éliminer par conception ; confiner le fonctionnement de la structure dans une plage de vitesse sans danger et compter sur l'inertie du système pour atténuer toute excitation ; opter pour une commande active de l'entraînement. À chaque solution, ses mérites, comme le démontrent des études de cas menées sur le terrain.

1 Exemple de système d'entraînement électrique à courant alternatif



Aujourd'hui omniprésents dans une foule d'applications industrielles, les entraînements électriques de puissance ont vocation à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur), ou l'inverse, c'est-à-dire convertir l'énergie cinétique en électricité (génératrice). Pour autant, toutes ces machines tournantes à vitesse variable subissent des vibrations de torsion au démarrage, en fonctionnement et à l'arrêt qui, en cas de réponse excessive aux forces d'excitation, peuvent augmenter d'amplitude au point d'entraîner l'usure des transmissions, voire la casse de l'arbre. D'où l'obligation d'analyser leurs caractéristiques de réponse en torsion et les boucles de régulation correspondantes pour vérifier la stabilité fonctionnelle du système. Cela vaut d'autant plus quand la puissance assignée est élevée puisqu'il est impossible d'accroître proportionnellement le diamètre de l'arbre et, donc, sa résistance mécanique. La défaillance mécanique d'un entraînement de forte puissance a également des conséquences plus importantes.

La gravité des vibrations dépend de l'amplitude de l'excitation de torsion et de la différence entre les fréquences d'excitation et les fréquences natu-

relles et déformées modales correspondantes (modes propres) du système d'entraînement et de leur amortissement. L'idéal est bien sûr d'éviter toute coïncidence d'une fréquence d'excitation et d'une fréquence naturelle de torsion. Il convient donc de calculer les fréquences naturelles du système et de déterminer les forces d'excitation dont il peut être le siège, ainsi que les fréquences résultantes. La tâche n'est pas simple pour les entraînements complexes aux multiples éléments. Dans certains cas, il faut même prendre en compte la raideur finie du banc moteur et d'autres pièces flexibles des structures voisines.

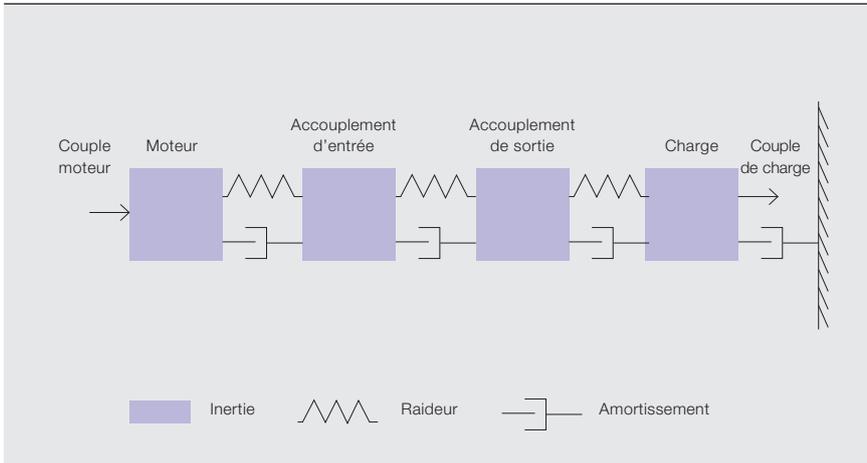
Autre difficulté propre aux systèmes électromécaniques : les éléments électriques et mécaniques sont traditionnellement conçus, étudiés et commandés séparément, sans se soucier de leur interaction mutuelle ou avec d'autres composants. Qui plus est, on ne dispose pas toujours à l'avance d'informations précises sur le système. Réduire cette part d'incertitude en bornant les paramètres du système tout en se donnant une marge de robustesse pour toute la plage, par une commande adaptée, est la solution pour garantir le fonctionnement stable de la chaîne d'entraînement.

Cinématique

Une chaîne d'entraînement électromécanique a trois grandes composantes : le réseau électrique, éventuellement complété de transformateurs et de filtres d'entrée/sortie ; le convertisseur de puissance et le moteur (ou

Photo p. 41

Les entraînements électriques de puissance peuvent être le siège d'oscillations potentiellement dangereuses. Comment y remédier ?



Les machines tournantes à vitesse variable sont soumises à des vibrations de torsion au démarrage, en fonctionnement et à l'arrêt.

la génératrice); la charge mécanique (ou la turbine) → 1. Chacune participe au comportement dynamique en torsion de l'ensemble. Les variations de l'alimentation électrique peuvent directement solliciter l'entraînement d'un moteur couplé au réseau. Certes, le convertisseur de puissance isole amplement le système de ces perturbations, mais la commutation de ses semi-conducteurs produit un ensemble de fréquences d'excitation qui sont fonction de la vitesse du moteur. Sur la plupart des moteurs électriques à courant alternatif alimentés par une

d'une génératrice varie selon l'application et s'avère dans certains cas difficile à prédire.

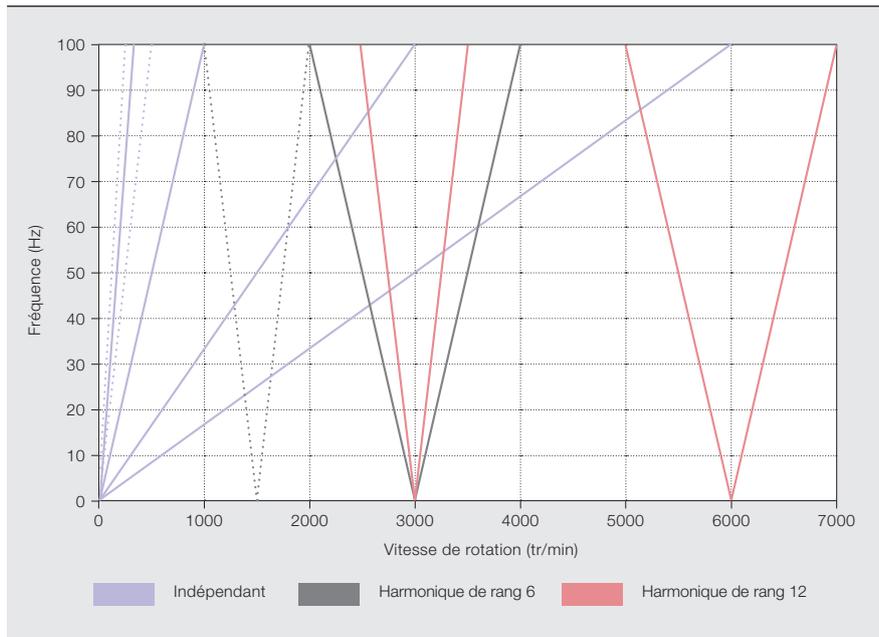
L'étude des résonances en torsion des chaînes cinématiques commence par une « analyse modale » qui consiste à rechercher les fréquences naturelles et à les comparer aux fréquences d'excitation possibles. Une étude plus approfondie passe par la modélisation du système électrique en éléments discrets résistifs, inductifs et capacitifs, et de la transmission mécanique sous forme d'inerties discrètes connectées aux éléments élastiques dépourvus d'inertie (arbres et accouplements) → 2. La réponse à diverses excitations peut être vérifiée et optimisée par les fonctions de transfert ou les équations différentielles du système de commande.

Dans les cas problématiques, le risque est de voir les oscillations de torsion s'amplifier au point d'user la transmission mécanique et même de casser l'arbre d'entraînement.

Dans l'idéal, la capture globale du comportement du système par le modèle permettrait d'élaborer une stratégie de commande appropriée et de garantir les performances. Mais c'est rarement le cas : d'ordinaire, seules les fortes inerties concentrées et l'élasticité principale sont connues avec une précision raisonnable ; les inerties plus faibles et distribuées (dans un réducteur, par exemple) sont plus difficiles à évaluer. Les coefficients d'amortissement sont une autre source d'imprécision car il est habituellement difficile, voire impossible, de les calculer pour un grand nombre d'éléments. Du coup, ils sont souvent négligés alors même que l'amortissement peut beaucoup influencer sur la fréquence de résonance et, en particulier, l'amplitude. À l'inverse, pas

tension sinusoïdale, le couple est très régulier. Par contre, des exécutions spéciales, comme certaines machines à aimants permanents, peuvent présenter de forts à-coups de couple. Enfin, la charge mécanique d'un moteur ou la puissance de la turbine

3 Exemple de diagramme de Campbell illustrant, pour un moteur à deux pôles, les fréquences excitées par un onduleur commuté par la charge, à certaines vitesses de rotation.



Il faut calculer les fréquences naturelles de torsion du système et déterminer les forces d'excitation qui peuvent s'y produire.

question d'éluder les caractéristiques électriques du moteur et de sa commande dans le modèle en torsion d'une ligne d'arbre, car elles peuvent beaucoup jouer sur les fréquences naturelles et l'amplification des excitations.

Compte tenu de l'interconnexion des composantes électriques et mécaniques de l'entraînement et des oscillations qui peuvent s'y propager, l'analyse ne peut pas toujours se limiter aux unes ou aux autres. Au contraire, elle doit englober toute la chaîne cinématique, du bout d'arbre au réseau électrique, sans oublier le convertisseur de fréquence éventuel. Cette précaution prise, on peut alors formuler des stratégies de réponse.

Passives, actives, hybrides

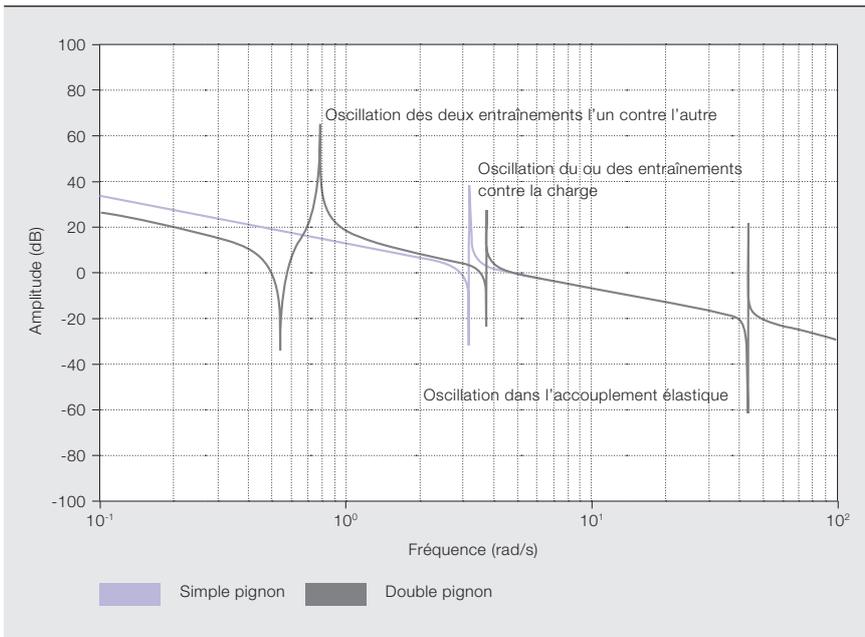
Plusieurs stratégies permettent de réduire, de limiter ou d'éviter les vibrations, selon leur nature. Elles sont généralement classées en trois catégories : la première intervient sur la structure du système, la seconde agit sur son fonctionnement et la troisième met en œuvre des techniques actives d'amortissement.

La première solution consiste à prévenir les vibrations par l'ajout de dispositifs amortisseurs (accouplements élastomère ou paliers hydrodynamiques, par exemple) qui diminuent l'ampli-

tude des vibrations en dissipant sous forme de chaleur l'énergie des excitations ou en modélant leur spectre avec des filtres sinus en sortie de convertisseur. Pratiques dans certains cas, ces mesures « passives » ont néanmoins deux défauts : l'énergie est dissipée en pure perte et le filtrage mécanique ou électrique ralentit la dynamique du système. Sans compter qu'elles coûtent souvent cher et que les accouplements élastomère vieillissent mal.

La deuxième solution a recours à l'analyse modale pour déterminer les plages de vitesse exemptes de résonance permettant un fonctionnement continu. Le nombre de pôles du moteur influant sur ces plages, on cherche son adéquation optimale aux besoins du procédé. Pratique et simple à mettre en œuvre, la méthode ne permet pourtant pas toujours de trouver des plages de vitesse suffisamment larges. De même, les accélérations et décélérations rapides pour franchir les vitesses de résonance interdites ne sont pas dans tous les cas acceptables.

Une troisième stratégie, cette fois logicielle, s'appuie sur l'émulation du comportement physique des amortisseurs ; les techniques « actives » d'amortissement à base de modèle et de résistance virtuelle en sont des



Une analyse modale détermine les fréquences naturelles de la chaîne cinématique et les compare aux fréquences d'excitation possibles.

exemples. Les méthodes d'espace d'état sont particulièrement avantageuses pour les systèmes de rang élevé; elles permettent de modéliser et de contrôler le système dans sa globalité, interconnexions comprises, en tenant compte des non-linéarités

Les méthodes hybrides combinant deux de ces stratégies ou plus sont également courantes. Elles permettent notamment de diminuer la raideur des arbres ou des accouplements de façon à déplacer la résonance du système dans une bande passante où un amortissement actif peut servir à contrer les oscillations. Autre exemple : l'utilisation de l'analyse fréquentielle pour fournir le spectre du système et le spectre cible désiré, suivie de méthodes temporelles pour modéliser le spectre du système. Ce couplage hybride temps-fréquence réunit le meilleur des deux mondes : il capte les comportements en fréquence et emploie des méthodes d'espace d'état.

Voyons des exemples applicatifs pour illustrer ces différentes approches.

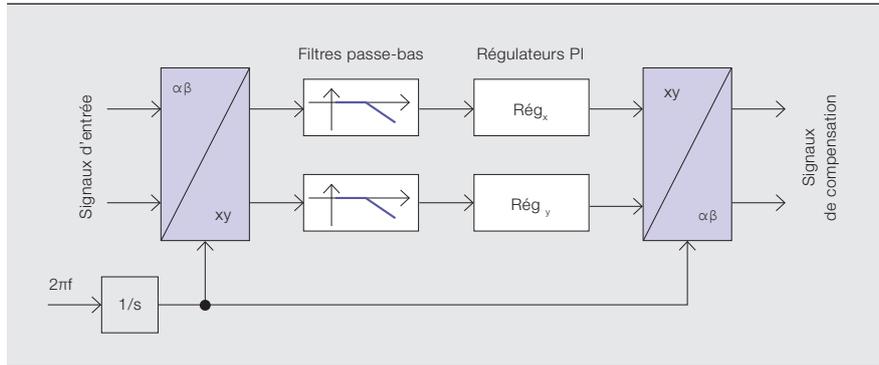
Compresseurs

Les variateurs de fréquence sont très répandus dans les stations de compression de gaz naturel. La plage de puissance est habituellement comprise entre 10 et 70 mégawatts, et le rotor tourne à une vitesse de quelques milliers de tours par minute. Un multiplicateur et un arbre d'entraînement relativement long et fin relient le variateur à plusieurs étages de compression. Le tout forme une structure plutôt flexible présentant une grande inertie de charge et différentes fré-

La réponse en torsion désirée est généralement celle qui évite toute coïncidence entre la vitesse de fonctionnement ou l'harmonique d'excitation de torsion et la fréquence naturelle de torsion.

comme le frottement et le jeu mécanique. Par ailleurs, les méthodes fréquentielles sont les mieux à même d'identifier les modes critiques.

5 Algorithme de compensation type d'une fréquence



Il existe de nombreuses stratégies de commande active pour amortir les oscillations de torsion ; une méthode propre aux entraînements à double pignon a été brevetée par ABB.

quences naturelles de torsion. Une excitation continue de ces fréquences, en provenance de l'un des étages de compression ou du variateur, est source d'oscillations de torsion de forte amplitude que la ligne d'arbre risque de ne pas encaisser. Les conséquences sont variables, de l'usure accrue et de la durée de vie réduite du multiplicateur à la destruction des accouplements ou de l'arbre.

En configuration classique, un système d'entraînement de fiabilité et d'efficacité éprouvées comme le MEGADRIVE-LCI d'ABB comprend une machine synchrone alimentée par un onduleur commuté par la charge. Or ce dernier peut engendrer des harmoniques dans le couple moteur, dont les fréquences dépendent du nombre d'impulsions du variateur et varient avec la vitesse de rotation → 3 ; à certaines vitesses, ces fréquences coïncident avec les fréquences propres de l'arbre. Une mesure radicale pour réduire les oscillations de torsion consiste à éviter, dans la mesure du possible, certaines plages de vitesse. Toute oscillation de torsion résiduelle excitée par le franchissement des fréquences propres, par exemple, est amortie soit par des techniques actives, soit naturellement jusqu'à ce qu'elle s'estompe d'elle-même.

Entraînements de broyeurs

Bien que relativement rares dans les broyeurs de minerai, les couples pulsatoires résonant avec l'une des fréquences propres de la chaîne cinématique peuvent, en l'absence d'amortissement, avoir des conséquences graves.

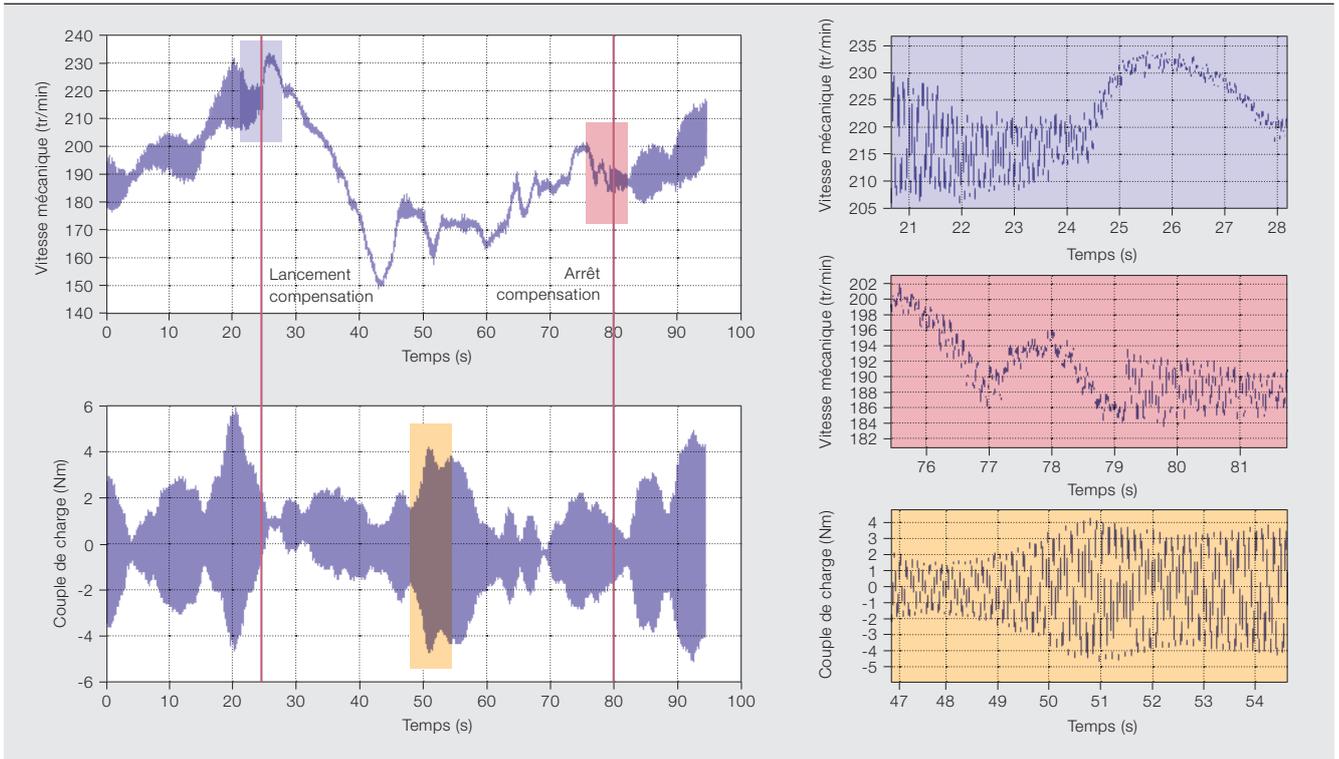
Si les solutions d'entraînement à couronne dentée et double pignon, par exemple, se prêtent très bien aux applications de broyage de moyenne puissance, leur profil de résonance en torsion pose problème et peut nécessiter une action préventive. Réduit à sa plus simple expression, le système à double entraînement s'apparente à une chaîne d'éléments à couplage flexible formée par les deux moteurs et le broyeur, donnant lieu à deux modes propres d'oscillation de torsion → 4 :

- Un premier mode dans lequel les moteurs oscillent en phase contre le broyeur, à une fréquence avoisinant souvent 0,5 à 0,6 Hz ;
- Un second dans lequel les moteurs oscillent l'un contre l'autre, la vitesse de l'un augmentant quand celle de l'autre décroît, puis inversement *ad infinitum*. Les moteurs fonctionnent donc en alternance pour entraîner le broyeur à une vitesse constante. Sur des lignes d'arbres relativement longs avec des accouplements élastiques, la fréquence naturelle de ce mode est autour de 0,1 à 0,2 Hz.

Ce second mode mérite une attention particulière car des problèmes, comme l'usure des engrenages, peuvent créer des excitations dans la plage correspondante. De nombreuses stratégies de commande active permettent d'amortir ces oscillations de torsion ; une méthode spécifique aux entraînements à double pignon a d'ailleurs donné lieu à un brevet ABB (WO/2012/020031).

Dans ce cas précis, les mesures effectuées sur les deux entraînements servent à calculer des actions distinctes de commande anticipatrice

6 Exemple en laboratoire de compensation d'harmonique de rang 3



pour amortir les deux modes propres, tandis que la vitesse du broyeur est régulée dans une configuration traditionnelle maître/esclave.

Éoliennes

Décrire les interactions aérodynamiques entre les éléments constitutifs d'un aérogénérateur ne va pas toujours de soi. L'interaction du vent et des pales engendre des phénomènes tels que le cisaillement et l'effet d'ombre du mât au passage des pales, qui se manifestent sous forme d'harmoniques de couple dans l'arbre en rotation. Ce dernier est en outre un système à plusieurs masses dont les résonances naturelles ne peuvent être négligées. Même les résonances naturelles du mât contribuent aux oscillations du couple en régime transitoire. En bout d'arbre, le couple de la génératrice peut aussi présenter des ondulations de différentes sources selon le type de machine : à-coups de couple dans les génératrices synchrones à aimants permanents, asymétrie de la tension réseau dans les génératrices asynchrones à double alimentation.

L'amortissement des oscillations de torsion dans ces systèmes ne peut pas toujours s'appuyer sur une connais-

sance préalable des harmoniques ; il faut parfois avoir recours à une analyse temps réel des signaux mesurés ou estimés (courant, vitesse). Pour autant, cette analyse doit toujours être suivie d'une classification automatique (en s'interrogeant sur la source de l'harmonique, par exemple) et, à l'évidence, d'une action compensatrice exécutée par la commande de l'entraînement. Un algorithme type de compensation d'une fréquence est donné en → 5. Une émulation en laboratoire de la compensation de l'harmonique de rang 3 sur le banc d'essai d'un petit aérogénérateur est reproduite en → 6 : la turbulence émulée du vent fait évoluer la vitesse moyenne tout en générant des couples de charge d'amplitude variable.

La multiplication des applications utilisant des entraînements électromécaniques et le risque de détérioration résultant de l'absence de contrôle des oscillations de torsion obligent à rechercher des solutions pour supprimer ces effets dommageables. Les techniques de conception et d'analyse rigoureuses d'ABB s'y emploient et ont déjà donné des résultats concluants.

Mehmet Mercangöz

Silvia Mastellone

Stefan Almér

Thomas Besselmann

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

mehmet.mercangoez@ch.abb.com

silvia.mastellone@ch.abb.com

stefan.almer@ch.abb.com

thomas.besselmann@ch.abb.com

Pieder Jörg

ABB Discrete Automation and Motion,

Drives and Controls

Turgi (Suisse)

pieder.joerg@ch.abb.com

Jouko Niiranen

ABB Discrete Automation and Motion,

Drives and Controls

Helsinki (Finlande)

jouko.niiranen@fi.abb.com

Luca Peretti

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

luca.peretti@se.abb.com

Veli-Matti Leppänen

ABB Oy

Helsinki (Finlande)

veli-matti.leppanen@fi.abb.com





Visionnaire

La visualisation 3D au service de la production

MARIA RALPH, ALVARO ARANDA MUÑOZ, SUSANNE TIMSJÖ, MATS LUNDEMALM – Malgré l'impact de la révolution informatique dans l'industrie, les documents papier occupent encore beaucoup le terrain de l'usine. Or ce mode de communication prend du temps, s'avère souvent inefficace et complique le suivi des problématiques et de l'état du procédé. ABB a mis au point un prototype de visualisation 3D qui aide les équipes de production à lever ces obstacles et à gagner en efficacité. Outil numérique de consultation et d'analyse des informations vitales de l'usine, ce prototype pallie les inconvénients des procédures papier et améliore la productivité.

Photo

Afficher la bonne information, à la bonne personne et au bon endroit, comme ici sur une ligne d'appareillages à isolation gazeuse, améliore grandement les performances de production.

ABB procède à une étude approfondie de la production en menant une campagne d'entretiens avec le personnel et d'observations sur site.

1 Vue d'ensemble de l'état de la production : des filtres permettent de sélectionner des informations comme la sécurité, la qualité, etc.



2 Suivi de l'avancement de la production par rapport aux objectifs



En production, chaque minute compte : il faut livrer en temps et en heure, dans le respect du budget. Pour y parvenir, le personnel doit pouvoir accéder immédiatement aux bonnes informations pour comprendre et réagir vite, à bon escient. Il est donc crucial d'affiner sa compréhension du procédé afin de mieux évaluer la situation en toutes circonstances.

Des outils technologiques y contribuent, mais leur mise au point requiert au préalable une connaissance approfondie du procédé. C'est pourquoi ABB commence par réaliser des entretiens et par observer le travail de chaque intervenant afin d'identifier les défis, les objectifs, les besoins et les problèmes rencontrés au quotidien : autant d'informations indispensables à la création d'une interface homme-machine. Dans le cas du prototype 3D présenté ici, ABB a consulté et suivi aussi bien des responsables de production que des opérateurs. Cette démarche lui a permis de dégager plusieurs exigences essentielles :

- La faculté de comprendre et d'analyser avec rapidité et précision le flux de production (par exemple, la relation logique entre différentes chaînes) ;
- L'accès aux principales données d'état de la fabrication, à chaque étape du *process* ;

- La capacité de détecter, de cerner et de régler rapidement les problèmes (identifier et traiter les goulets d'étranglement, par exemple) ;
- La mise à disposition et l'exploitation d'informations sur la production du jour et sur les équipes en poste (cadence, débit, rendement, etc.) ;
- La consultation des informations sur tous types de supports (tablette, smartphone, etc.) pour améliorer la mobilité du personnel ;
- L'utilisation d'un système efficace de suivi des ordres de fabrication ;
- La fourniture de données de qualité pour étayer les réunions de production du matin ;
- Un affichage de la progression vers les différents objectifs de production.

Étapes et principes de conception

Après cette phase d'identification des besoins, un premier prototype a été mis au point sur la base du moteur de jeu vidéo Unity 3D. Il a permis de recueillir des informations primordiales, telles que le nombre de pièces en entrée et en sortie d'une chaîne dans le flux. L'outil 3D cartographie l'ensemble du procédé et localise les éventuels goulets d'étranglement afin de les identifier et de les traiter au plus vite, évitant les retards ou arrêts de production.

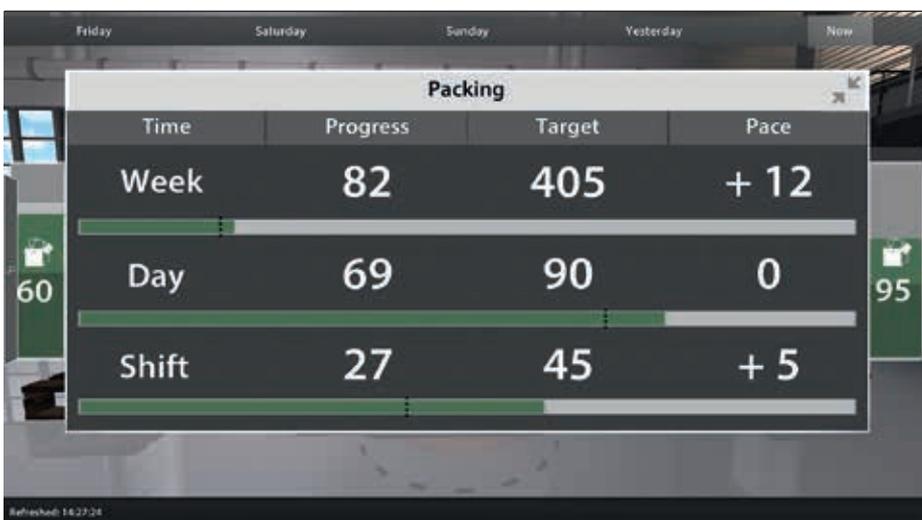
Sa conception s'apparente beaucoup à celle du « tableau de bord » collaboratif *ABB Collaboration Table* qui se connecte et interagit avec le système d'automatisation étendue 800xA. Il hérite ainsi d'une interface 3D intégrée pour le suivi des indicateurs clés de performance (KPI) et d'un grand écran tactile ; la différence tient dans le détail des données *process*.

3 Historique retraçant l'évolution des KPI: ici, le nombre de commandes en cours, de modèles et de clients pour un pays donné



On navigue facilement entre différents niveaux d'information, de la vue globale du process au détail de chaque ligne et stock tampon.

4 Informations détaillées sur l'avancement d'une tâche (le conditionnement, par exemple)



Navigation aisée

Il est facile de passer d'un niveau d'information à l'autre, de la vue d'ensemble du site au détail de chaque ligne et stock tampon. Le personnel de production suit ainsi de près la progression de chaque commande client jusqu'à son expédition. Il peut également rechercher des commandes à l'aide de filtres, visualiser l'évolution de certains KPI, etc.

Le personnel peut suivre l'avancement de la production par rapport aux objectifs fixés par équipe, jour et semaine, sur chaque ligne.

Nombreuses sont les fonctionnalités de ce prototype :

Vue panoramique

L'utilisateur peut consulter l'ensemble des informations clés de production et les relations entre lignes (stocks tam-

pons et encours), suivre d'un coup d'œil le déroulement des opérations et obtenir un bilan de production → 1,2.

Des filtres permettent de sélectionner les commandes en fabrication par pays, client et modèle, ou référence → 3. Le résultat s'affiche dans le flux de production, avec la référence de la commande et sa localisation dans la chaîne ou le tampon. Il est également possible d'affiner les critères de sélection pour obtenir le détail d'une commande spécifique.

Les opérateurs peuvent visualiser l'état d'avancement de la production sur chaque ligne par rapport aux objectifs fixés pour la journée, la semaine ou l'équipe en poste → 4 : de quoi s'assurer qu'aucune ligne n'accuse de retard ou de surproduction, et anticiper les éventuels goulets d'étranglement → 5.

Code couleur

Chaque indicateur KPI est repéré par une couleur associée à une valeur de seuil de façon à pouvoir identifier immédiatement les alertes et les situations critiques en cours de production.

L'avancement de la production, la qualité des commandes en fabrication, les niveaux de sécurité de l'usine et le planning des futures commandes sont représentés sous forme de diagrammes à barres 3D de différentes couleurs. Cet affichage permet aux responsables d'identifier rapidement les anomalies en cours ou potentielles, et fournit des informations sur l'évolution des KPI et l'historique de production, par exemple : des données précieuses pour remonter à la source des problèmes et y remédier.

Chaque indicateur clé de performance (KPI) est repéré par un code couleur selon ses valeurs de seuil.

5 Localisation d'un goulet d'étranglement



Communication

Le prototype accompagne et facilite la communication et la collaboration entre équipes. Ainsi, différents filtres permettent d'afficher les données qui viennent enrichir chaque matin les réunions de production fixant les objectifs du jour en fonction de la sécurité, de la qualité, de l'avancement et des KPI des précédentes équipes.

Résolution des problèmes

Des marqueurs, placés en différents endroits du process, permettent de localiser l'origine d'un problème (goulet d'étranglement, par exemple), facilitant sa résolution.

Mobilité renforcée

Multi-support, l'application a été conçue pour fonctionner aussi bien sur PC que sur tablette. Une connexion Internet et les bons paramètres de sécurité suffisent pour accéder de partout et en direct aux données de l'usine.

Management visuel de la fabrication

À l'heure actuelle, le déploiement du prototype dans un procédé réel se limite à un sous-ensemble de fonctionnalités, comme l'affichage de la localisation de chaque article d'une commande client dans le flux de production et le suivi des commandes. Le projet est donc toujours en développement et de nouvelles fonctions tirées du prototype sont régulièrement intégrées au process pour évaluation.

Ce prototype 3D fournit une vue d'ensemble de la fabrication et en améliore la connaissance globale à un moment

donné. Les opérateurs disposent ainsi des bonnes informations au bon moment, dans un format intuitif et aisément compréhensible pour mieux appréhender l'état de la production. Il leur est également plus facile d'identifier les opérations nécessitant une attention immédiate pour intervenir dans les meilleurs délais.

Maria Ralph

Alvaro Aranda Muñoz

Susanne Timsjö

ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

maria.ralph@se.abb.com

alvaro.aranda@se.abb.com

susanne.timsjo@se.abb.com

Mats Lundemalm

ABB Discrete Automation and Motion, Robotics
Västerås (Suède)

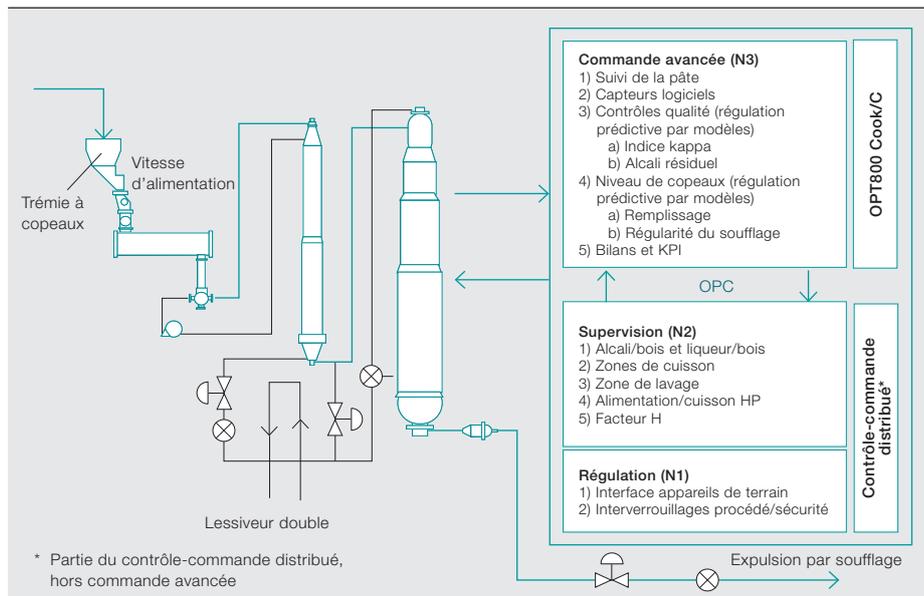
mats.lundemalm@se.abb.com



ABB met la main à la pâte

Stabiliser et optimiser la production de pâte à papier de qualité avec la commande avancée ABB

ABHIJIT BADWE, RAMESH SATINI – Lorsque le géant mondial de la fabrication de papiers et de cartons Mondi décida de moderniser sa plus grosse usine de pâte à papier en Pologne, c'est à ABB qu'il confia la tâche d'améliorer et d'optimiser ses deux lignes de production. ABB développa pour cela une solution de commande avancée bâtie sur un régulateur prédictif par modèles et des capteurs logiciels. Résultats : une qualité de pâte améliorée de 56 % et une offre de régulation standardisée applicable à d'autres sites papetiers.



En 2011, l'usine papetière de Mondi Świecie, au nord de la Pologne, qui fabrique des produits de haute technicité (cartons plats et ondulés pour emballages, papiers kraft pour sacs industriels), se lance dans un vaste projet de modernisation, porté par trois objectifs : améliorer la qualité des produits, diminuer l'empreinte écologique de l'activité en réduisant la consommation de réactifs chimiques et d'énergie thermique, augmenter les volumes de production tout en abaissant les coûts.

Un survol des grands principes et étapes de fabrication de la pâte à papier permet de mieux saisir les enjeux du contrat remporté par ABB.

Mise en pâte

Les copeaux de bois sont la matière première du papier et du carton. Dans la fabrication de la pâte, la lignine et les hémicelluloses, deux polymères constituant le liant naturel du bois, doivent être

éliminées des copeaux afin d'obtenir les précieuses fibres de cellulose. Autrefois mécanique, par cisaillement du bois, ce procédé de « délignification » est aujourd'hui chimique, avec l'avantage de mieux préserver l'intégrité de la cellulose.

Les copeaux sont produits à partir de troncs d'arbres écorcés passés par des déchiqueteuses, triés en fonction de leur taille, puis imprégnés de produits chimiques et enfournés dans un immense autoclave chauffé à la vapeur produite par des chaudières à charbon, le « lessiveur ».

Dans le procédé au sulfate alcalin (kraft) utilisé à Świecie, les copeaux sont mélangés à une solution aqueuse d'hydroxyde et de sulfure de sodium appelée « liqueur blanche ». La cuisson se fait sous haute pression à une température voisine de 160 °C, pendant plusieurs heures ; la concentration en alcali de l'hydroxyde de sodium diminue à mesure qu'il se transforme en sulfates et en carbonates par réaction avec la lignine du bois.

En fin de cuisson, la pâte est soufflée hors du lessiveur dans une cuve de décharge. Cette dépressurisation brutale provoque une rapide expansion des fibres de cellulose, qui favorise leur séparation. On obtient une suspension de couleur brune, ou « pâte écrue ».

L'étape suivante consiste à séparer la pâte délignifiée des produits chimiques résiduels de cuisson (« liqueur noire ») et des matières organiques dissoutes (lignine et hémicelluloses). Après passage par une succession de cuves et de matériels de lavage, le liquide extrait est concentré pour en récupérer le sodium et le soufre, les régénérer et fabriquer plus de liqueur blanche. Entre-temps, la pâte écrue est au besoin blanchie, puis pressée en plaques, égouttée et séchée. Elle peut ensuite être découpée en feuilles et roulée en balles pour stockage et expédition vers la fabrique de papier.

Améliorer le procédé

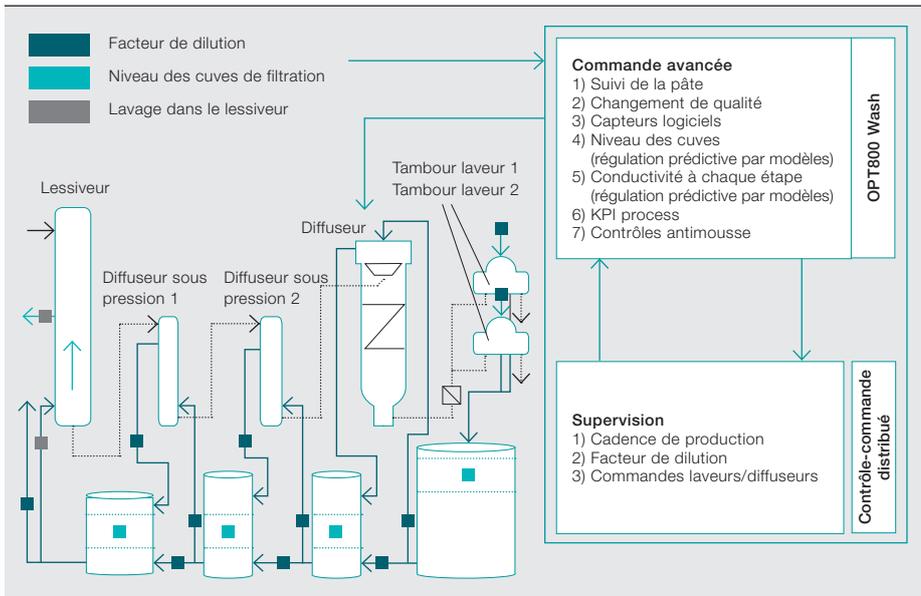
L'enjeu était d'optimiser le *process* et d'en augmenter les tolérances sans rien remplacer, hormis le système de contrôle-

L'une des priorités de Mondi Świecie était d'améliorer la fabrication de pâte à papier.

commande de l'installation. Deux opérations étaient visées : la cuisson des copeaux dans le lessiveur et le lavage de la pâte écrue. On commença par auditer et par analyser les boucles de régulation pour élaborer un programme de commande avancée du procédé, fondé sur la régulation prédictive par modèles et des capteurs logiciels.

Photo p. 53

À l'œuvre dans la plus grande usine papetière de Pologne, la commande avancée ABB a amélioré la productivité du site et stabilisé les étapes de cuisson et de lavage de la pâte, surpassant les méthodes classiques de contrôle-commande distribué.



En 2011, Mondi Świecie confie à ABB le soin d'améliorer la qualité des produits et le rendement de son usine.

Il fallait optimiser le *process* et en augmenter les tolérances sans rien remplacer, hormis le système de contrôle-commande.

Cuisson

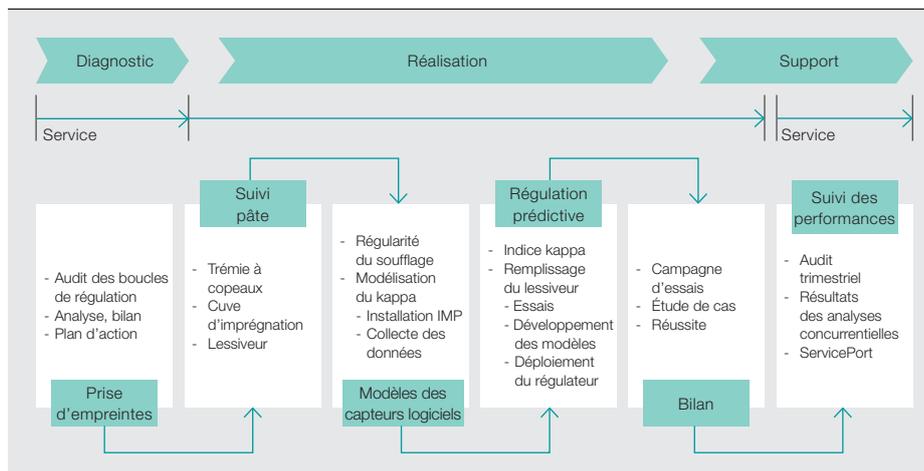
Au niveau du lessiveur, la variable déterminante de la qualité du produit est l'indice kappa, qui mesure la lignine résiduelle de la pâte et renseigne donc sur son degré de délignification : plus il est faible, moins il y a de lignine et meilleure est la cuisson. Pourtant, cet indice est difficile à évaluer, pour deux raisons. D'abord, tous les copeaux chargés dans le lessiveur n'ont pas les mêmes caractéristiques hygrométriques et physiques. Ensuite, le kappa ne peut pas être mesuré physiquement dans le lessiveur, mais seulement au niveau de l'installation de soufflage. Or c'est impérativement en amont qu'il faut connaître la teneur en lignine résiduelle. Comme dans toute cuisson au four, le temps de séjour de la pâte est décisif : il doit être assez long pour produire le plus de cellulose possible, mais pas trop pour éviter de briser les fibres.

Afin de maintenir la stabilité du procédé et limiter la variance de la qualité du produit, l'indice kappa doit être obtenu en prélevant en continu des mesures des diverses variables process, avant que les copeaux ne pénètrent dans le lessiveur ; ces données renseignent ensuite un modèle mathématique (capteur logiciel) qui tient compte des multiples non-linéarités du process.

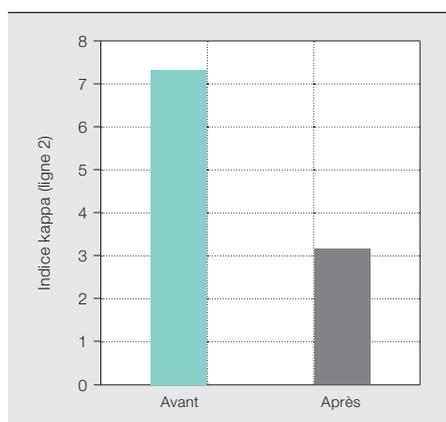
C'est la solution retenue par ABB → 1 : un capteur logiciel, basé sur sa plateforme de modélisation inférentielle IMP (*Inferential Modeling Platform*), fournit des mesures logiques de l'indice kappa à partir d'une série de relevés des variables process. Ces valeurs sont suivies à la trace par une fonction qui crée un modèle virtuel des copeaux au fil de leur progression dans le lessiveur ; ainsi déduites des caractéristiques des copeaux, elles sont introduites dans le modèle pour prédire l'indice kappa dans chaque compartiment du lessiveur. Le capteur logiciel, déployé en ligne, fournit en temps réel des mesures virtuelles des variables de qualité (dont le kappa), qui sont ensuite utilisées par un régulateur prédictif par modèles pour optimiser la cuisson, déterminer le temps d'exposition des copeaux à une concentration d'alcali donnée et maintenir cette dernière constante dans tout le lessiveur. La commande avancée peut également réguler la cadence de production de la pâte. Les données collectées sont journalisées pour établir des bilans de synthèse, complétés de

La commande avancée ABB maintient le niveau de remplissage du lessiveur en calculant la vitesse optimale du racleur de fond et le débit d'expulsion de la pâte.

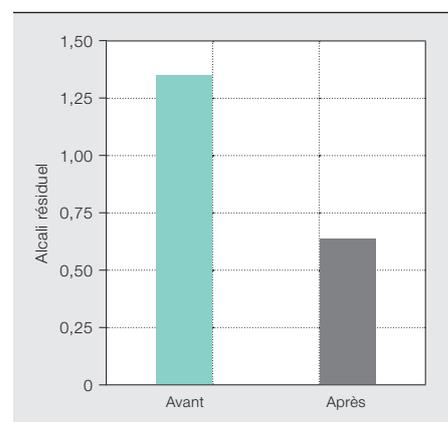
3 Mise en œuvre de la commande avancée



4 Réduction des variations d'indice kappa (2 sigma) avec la commande avancée ABB



5 Réduction des variations d'alcali résiduel (2 sigma)



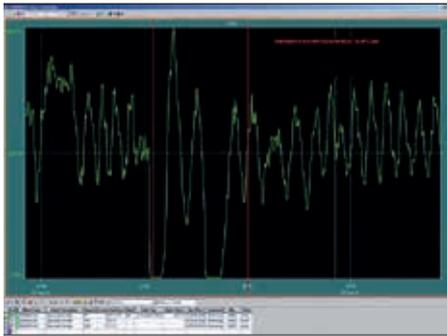
mesures d'indicateurs clés de performance (KPI).

Autre variable importante de la cuisson en continu : le niveau de copeaux dans le lessiveur. Des variations peuvent en effet entraîner une cuisson hétérogène, un déséquilibre global liqueur/matière et un flux de pâte irrégulier en sortie. La régulation prédictive d'ABB optimise le remplissage du lessiveur en agissant sur la vitesse du racleur de fond et sur le débit de soufflage de la pâte délignifiée dans la cuve de décharge.

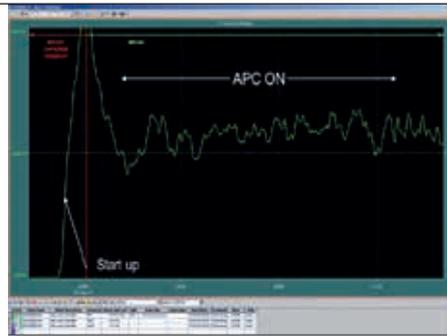
Pendant que la commande traite ces mesures complexes pour effectuer des prédictions en temps réel et mettre en œuvre une régulation optimale du procédé, le système d'automatisation éten-

ABB commença par auditer et analyser les boucles de régulation pour élaborer un plan d'action portant sur la commande avancée des procédés à base de régulation prédictive par modèles et de capteurs logiciels.

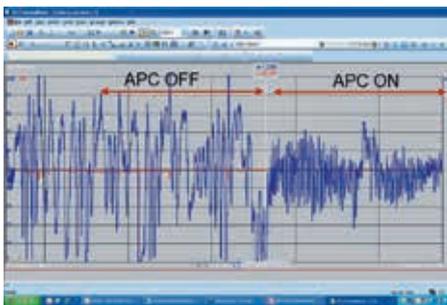
due 800xA d'ABB gère les commandes de base comme le réglage des débits de liqueur et de copeaux, de la température et de la pression, etc. Il agit également sur un autre paramètre décisif : le taux de



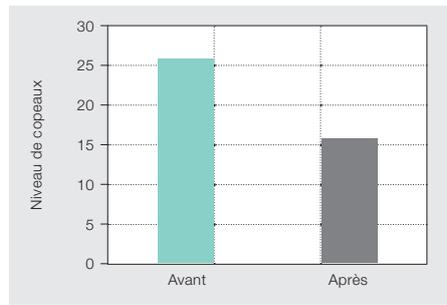
6a Avant



6b Après



6c Amélioration de la stabilité du procédé



6d Réduction du niveau de remplissage

La démarche suivie pour atteindre les objectifs du papier s'est fondée sur l'offre de services avancés ABB : diagnostic, réalisation, support.

dissolution de la lignine ou « facteur H ». Celui-ci étant amplement fonction de la température, l'apport de chaleur dans le lessiveur doit être étroitement contrôlé. Un écart d'un ou de deux degrés par rapport à l'optimum peut beaucoup jouer sur la qualité du produit.

À ce stade du processus, la régulation prédictive et le contrôle-commande distribué donnent des résultats conformes aux exigences du client. En injectant juste ce qu'il faut de vapeur, de liqueur blanche ou d'alcali, on réduit au minimum les déchets du process; en produisant un maximum de fibres cellulosiques de qualité, on remplit les critères tant quantitatifs que qualitatifs du cahier des charges.

Lavage de la pâte écrue

C'est la deuxième étape du procédé optimisée par la commande avancée ABB. Comme dans le lessiveur, les données sont collectées en continu pour que les capteurs logiciels puissent fournir des mesures prédictives sur le déroulement de l'opération.

Le but est ici de réguler les niveaux dans les nombreuses cuves de filtration de façon à ajouter les bons volumes d'eau douce pour chaque tonne de pâte écrue à laver, ce que l'on appelle le « facteur de dilution ». Si la valeur optimale de cette

variable est connue en permanence, il est alors possible de récupérer le maximum de produits chimiques de cuisson et d'utiliser le minimum d'énergie dans les évaporateurs. Les pertes d'alcali seront également réduites. Pour cela, un régulateur prédictif calcule le facteur de dilution optimal à chaque étape de l'opération de lavage, à partir des mesures de conductivité de la pâte en plusieurs endroits du process, et s'assure que les niveaux des cuves sont dans les tolérances prescrites → 2. Comme à l'étape précédente du lessiveur, l'information recueillie est affichée en salle de commande sous forme d'indicateurs KPI.

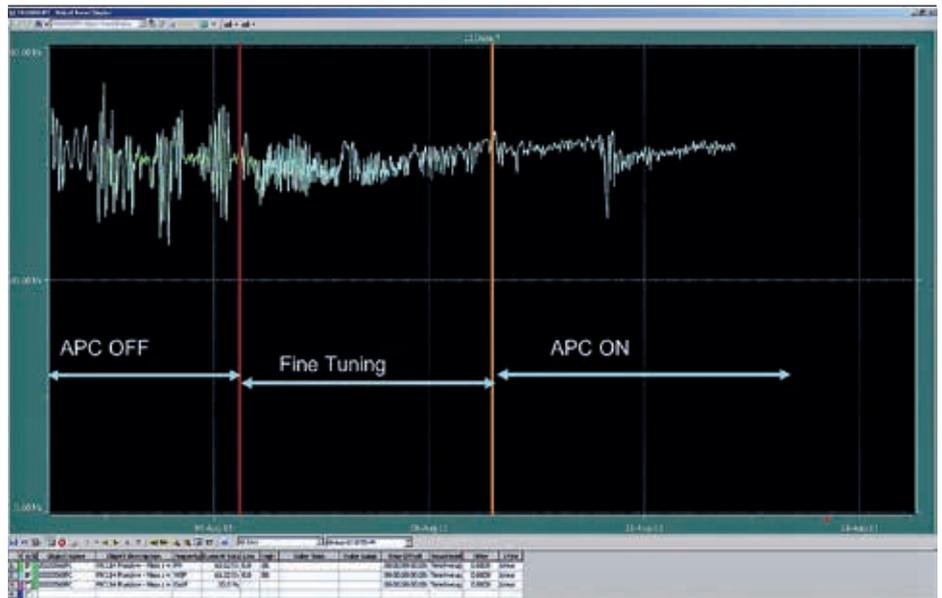
Méthodologie

La démarche suivie pour atteindre les objectifs de Mondi Świecie s'est appuyée sur les trois volets de l'offre *Advanced Services* d'ABB : diagnostic, réalisation, support → 3. La phase de diagnostic se concrétisa par un audit approfondi du procédé et des boucles de régulation, qui permit d'élaborer un plan d'action spécifique pour mettre en œuvre la régulation prédictive.

La phase de réalisation impliqua le déploiement de la fonction de suivi de la pâte dans le contrôle-commande distribué, puis le développement des capteurs logiciels en ligne pour modéliser l'indice kappa. Des essais furent menés

Pendant que la commande avancée ABB effectue des mesures complexes, réalise des prédictions en temps réel et exécute les ordres d'optimisation du procédé, le système 800xA traite les commandes de base.

7 Stabilisation du flux de pâte expulsée du lessiveur



sur chaque étape du process pour mettre au point les modèles mathématiques du régulateur prédictif, qui fut ensuite mis en service, réglé et livré au papetier.

Pour l'heure, la commande avancée est en phase de support et d'optimisation, moyennant des audits trimestriels, une télésurveillance et des réglages fins en ligne effectués par ABB.

La même démarche fut appliquée à la commande avancée de l'étape de lavage de la pâte écrue.

Des résultats chiffrés

Le chantier s'est échelonné d'août 2011 à décembre 2013, date à laquelle le système était complètement installé et testé. Tout au long du projet, les ingénieurs de l'usine n'ont pas ménagé leurs efforts pour se familiariser avec la commande prédictive et adapter leurs méthodes de travail et leur formation afin d'en faire le meilleur usage.

Une fois le système complet opérationnel, il fut possible de quantifier les améliorations obtenues avec la régulation prédictive :

- Réduction de 56 % des variations kappa dans le lessiveur → 4, preuve

que la commande avancée permettait de produire une pâte de qualité constante ;

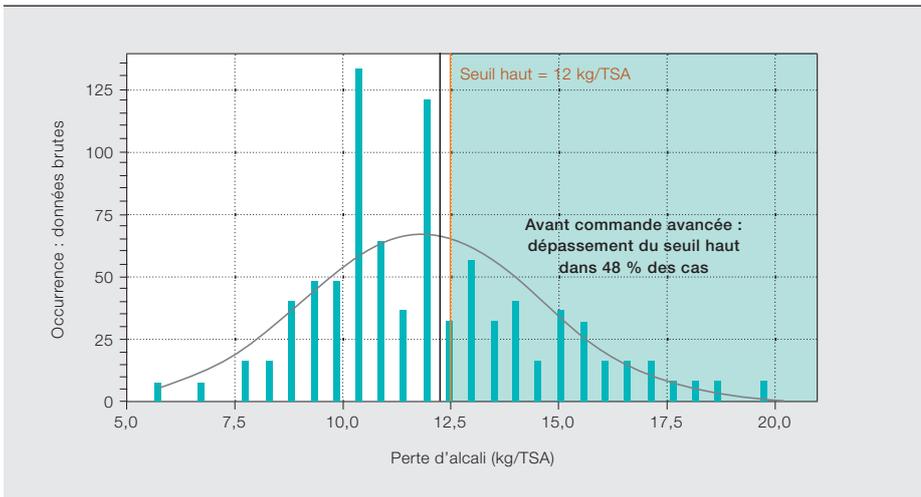
- Chute de 48 % des variations d'alcali résiduel → 5, signe d'une meilleure utilisation de la liqueur blanche de cuisson ;
- Diminution de 40 % des variations de niveau de copeaux dans le lessiveur → 6, réduisant les variations de débit de soufflage → 7 et stabilisant grandement les opérations de mise en pâte et de lavage ;
- Réduction de 30 % des pertes d'alcali au lavage → 8 ;
- Baisse du volume d'eau de lavage et de la consommation de vapeur par les évaporateurs ;

Commande avancée et contrôle-commande distribué cumulent les avantages pour satisfaire à toutes les exigences du client.

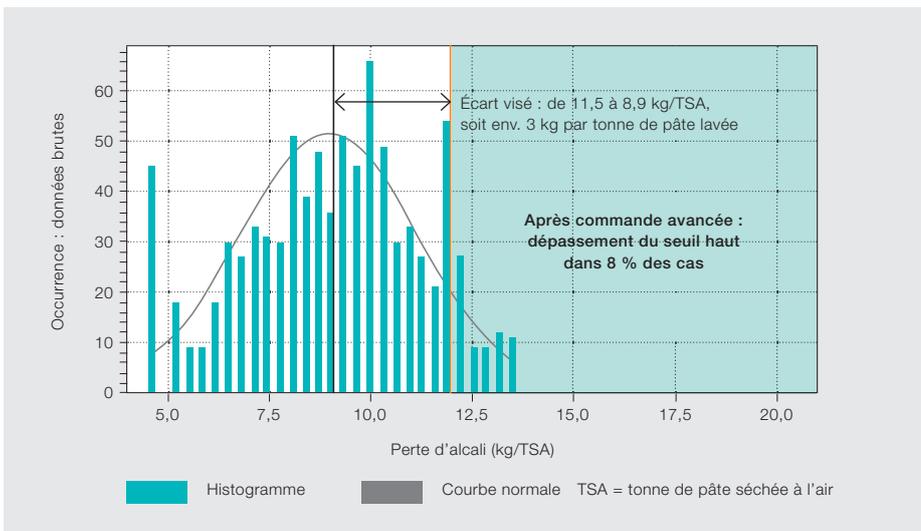
- Stabilisation des niveaux de la cuve de décharge et des filtrats de lavage avec diminution des émissions de CO₂ et des rejets d'effluents.

Ce problème d'optimisation étant résolu et validé par le papetier lui-même, ABB a pu proposer à d'autres usines de pâte à papier des solutions standardisées, à

8 Réduction des pertes d'alcali (lavage) avec la commande avancée ABB



8a Avant



8b Après

savoir *OPT800 Cook/C* pour la cuisson continue et *OPT800 Wash* pour le lavage de la pâte écrue.

Cette réussite a servi de tremplin au déploiement de la commande avancée ABB mais aussi de sa plate-forme d'automatisation étendue 800xA. En témoigne une récente commande pour le plus grand complexe papetier au monde, construit à l'heure actuelle en Indonésie. Le client voulait une solution éprouvée, mariant contrôle-commande distribué et régulation prédictive : Mondi Świecie est à cette fin la meilleure vitrine technologique d'ABB.

Abhijit Badwe

Ramesh Satini

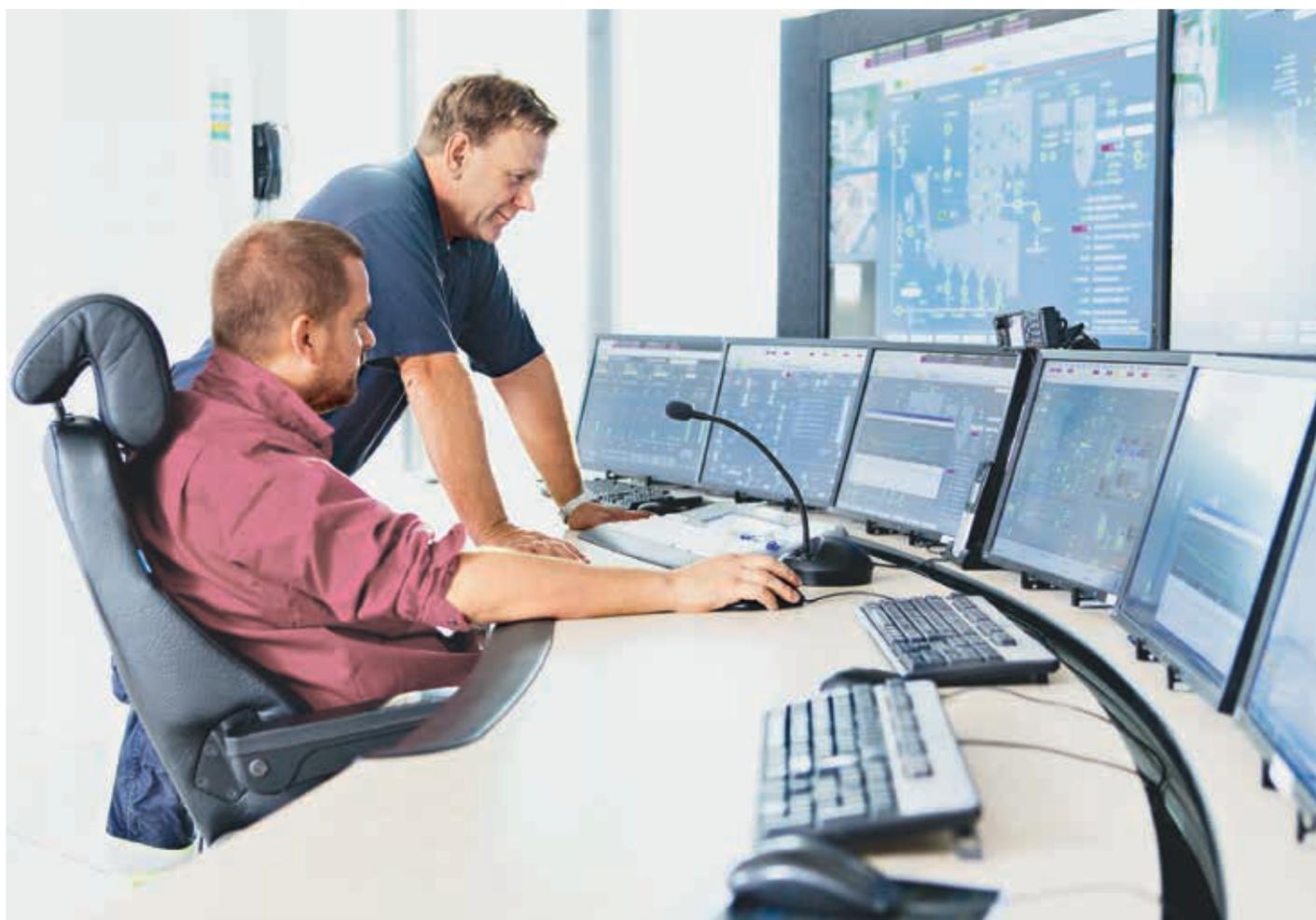
ABB Pulp and Paper Control Systems

Technology Center

Singapour

abhijit.badwe@sg.abb.com

ramesh.satini@sg.abb.com



Alarmer, informer, guider

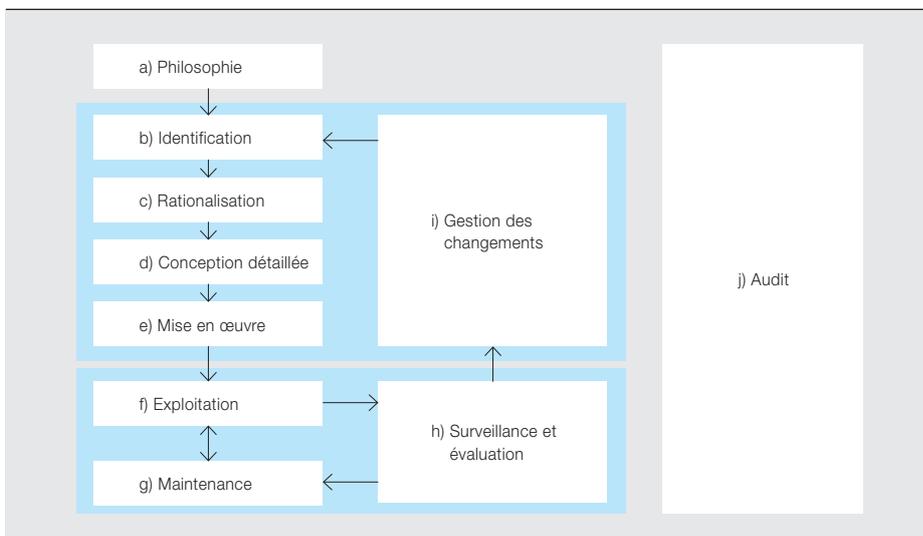
Une plus grande efficacité opérationnelle par la gestion de cycle de vie des systèmes d'alarme

MARTIN HOLLENDER, JOAN EVANS, THOMAS-CHRISTIAN SKOVHOLT, ROY TANNER – Interrogé en novembre dernier sur les principales difficultés rencontrées lors de ses entraînements sur simulateur à la Cité des étoiles (banlieue de Moscou), l'astronaute britannique Tim Peak avait répondu : « *Le plus grand écueil, ce sont les défaillances multiples* » [1]. Il en va de même des sites industriels pilotés par des systèmes de contrôle-commande distribué : la surabondance d'alarmes reste la bête noire des opérateurs de conduite. Pour maîtriser ces « avalanches » de données, il faut avoir facilement accès aux principes et critères qui ont présidé, en amont, à la conception des alarmes : un préalable indispensable pour décider en connaissance de cause des méthodes de traitement évoluées, telles que la suppression. Une bonne gestion des changements et du cycle de vie permet de maintenir le système d'alarme en phase avec la dynamique évolutive de l'usine, suivant une démarche d'amélioration continue normalisée CEI 62682 et ANSI/ISA 18.2.

1 Approche « cycle de vie » de la sécurité fonctionnelle et de la gestion d'alarme

	Sécurité fonctionnelle		Gestion d'alarme
1996	ANSI/ISA 84.01	2009	ANSI/ISA 18.2
2003	CEI 61511	2014	CEI 62682

2 Cycle de vie d'une gestion d'alarme CEI 62682



Si la nécessité d'une gestion d'alarme efficace fait consensus, des accidents comme celui survenu en 2010 dans l'usine de DuPont à Belle (États-Unis) [2] nous rappellent que même des chantres de la sécurité comme ce géant de la chimie ont encore des lacunes en la matière. Dans l'industrie, la généralisation du contrôle-commande distribué, configurable par logiciel, a permis de multiplier les alarmes, sans qu'il en coûte beaucoup à l'utilisateur : un excès qui nuit à la performance. En témoigne l'explosion en 1994 de la raffinerie Texaco de Milford Haven (Grande-Bretagne) [3], où les deux opérateurs en poste ont dû faire face à 275 alarmes au cours des 11 minutes précédant l'accident. Un exemple classique de système saturé d'alarmes aussi inutiles qu'inacceptables, qui empêche l'opérateur de convenablement appréhender la situation, de la diagnostiquer et d'y remédier. Ces événements sont à l'origine d'une démarche de gestion d'alarme systématique, formalisée en 1999 par le guide EEMUA 191 (*Engineering Equipment and Materials Users Association*).

Photo p. 60

Des méthodes de traitement d'alarme évoluées apportent une aide considérable à la conduite des sites industriels modernes.

Dix ans plus tard, le standard ISA 18.2 lui ajoutait une approche « cycle de vie », à l'image de la normalisation ISA 84 et CEI 61511, déjà bien établie, qui impose de maîtriser toutes les étapes de définition, de réalisation et de maintien de la fonction sécurité dans l'industrie. En clair, il s'agit de mettre en place une gestion continue du système d'alarme pour garantir à vie la sécurité d'un site.

En 2014, la première norme internationale CEI 62682, inspirée de l'ISA 18.2, fait de cette gestion d'alarme au long cours une priorité → 1. Elle oblige notamment à recueillir et à documenter systématiquement toutes les informations nécessaires à la conception d'alarmes (études de sécurité, spécifications d'équipement, etc.). Si, en cours d'exploitation, des informations viennent les compléter ou les réviser, il est indispensable de mettre à disposition et d'assimiler parfaitement la totalité des informations ayant motivé ces préceptes d'origine afin d'éviter tout « effet second-

taire » potentiellement dangereux que pourraient occasionner les modifications [4].

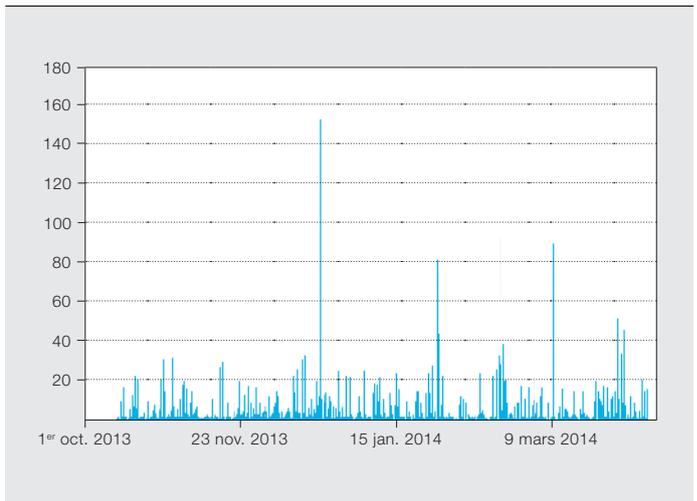
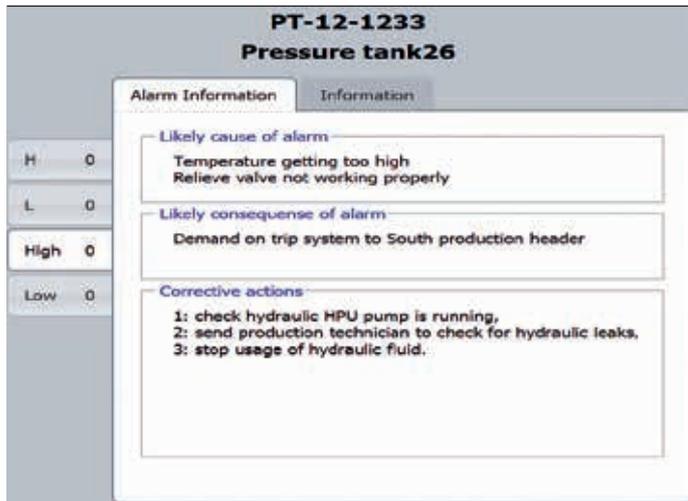
L'explosion de la raffinerie Texaco de Milford Haven en 1994, où les opérateurs ont dû faire face à 275 alarmes au cours des 11 minutes précédant l'accident, est un exemple classique d'« avalanche » d'alarmes.

Les principaux jalons du cycle de vie CEI 62682 permettent de développer et de maintenir un système d'alarme conforme à la norme et aux bonnes pratiques industrielles → 2.

Méthodologie

Première étape du cycle de vie d'une gestion d'alarme, un plan, appelé « philosophie » dans la norme, qui définit :

- les rôles et responsabilités ;
- les exigences de système d'alarme ;
- les processus et procédures de travail pour satisfaire à ces exigences.



Les principes de la gestion d'alarme doivent être transposés dans les tâches concrètes du projet.

La CEI 62682, entre autres référentiels, est un guide utile à la définition du contenu et de la structure d'une philosophie d'alarme appropriée.

ABB sait d'expérience que la difficulté de l'exercice ne réside pas dans l'élaboration du document mais dans son application au cycle de vie du projet. C'est pourquoi les spécialistes ABB du domaine se concentrent sur la transposition des principes de gestion d'alarme dans les tâches concrètes du projet et ses « livrables », tout en communiquant l'impact des exigences du système d'alarme à l'équipe projet étendue.

Cette étape est capitale pour garantir que l'objet et l'intention première des alarmes sont identifiés et documentés lors de revues de projet (études de dangers HAZOP, analyses de risques LOPA et revues sur schémas de tuyauterie et d'instrumentation, par exemple).

Ces informations de conception disponibles, il faut ensuite savoir comment et où stocker et gérer les données correspondantes. La CEI 62682 instaure pour cela le principe d'une base de données maître, définie comme une « liste autorisée d'alarmes rationalisées et d'attributs associés ». ABB le concrétise par un outil de rationalisation d'alarme ART (*Alarm Rationalization Tool*) aux nombreux avantages :

- Fonctionnalité complète de base de données pour collecter et manipuler rapidement toutes les informations associées de conception et de configuration d'alarme ;
- Formulaire de saisie recensant sur un seul écran tous les paramétrages d'une alarme pour accompagner et faciliter les réunions de rationalisation ;
- Fonctions de copie contrôlée autorisant la réutilisation des configurations existantes pour des cas similaires.

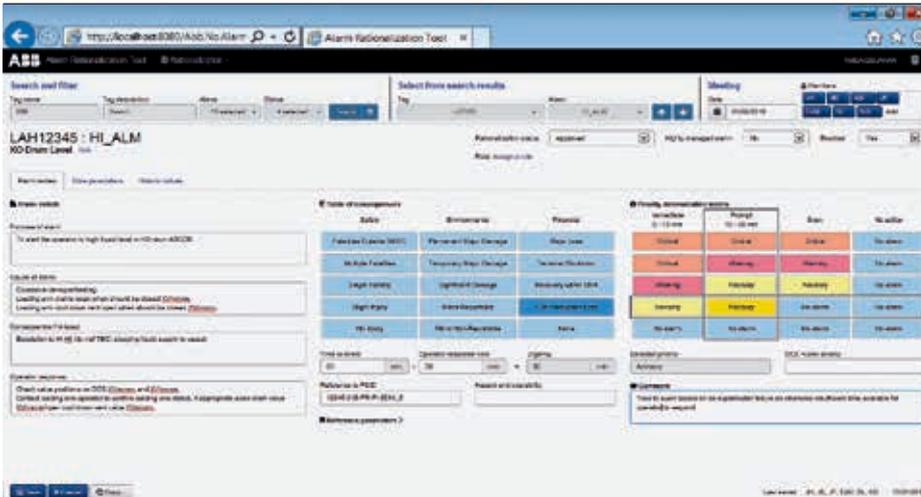
Rationalisation

À ce stade, la norme CEI 62682 [5] impose d'identifier pour chaque alarme :

- l'action opérateur recommandée ;
- la conséquence de l'absence d'action ou d'une action incorrecte ;
- la cause probable de l'alarme.

Une fois les informations de conception d'alarme disponibles, reste à déterminer comment et où stocker et gérer les données correspondantes.

La mise à disposition de ces informations en exploitation améliore la cohérence des actions opérateur et permet aux novices de se construire une base de connaissances et de gagner en confiance. Quand des installations existantes sont en cours de modernisation, le personnel de production est la source



d'informations la plus fiable. Par contre, pour les nouvelles usines, la définition complète des alarmes requises est plus épineuse : leur configuration doit beaucoup s'appuyer sur les informations des concepteurs et des fournisseurs.

Choisir les bons paramétrages de seuil, d'hystérésis ou de temporisation ne suffit pas pour éviter la surcharge.

Outre la saisie des exigences et des données de conception d'alarme, l'outil ART d'ABB se singularise par sa capacité à exporter les réponses de l'opérateur aux alarmes vers l'assistant en ligne *Alarm Helper* → 3, qui transmet le tout au poste du système d'automatisation étendue 800xA d'ABB. Alarm Helper et ART sont deux composantes de la solution de gestion d'alarme *AlarmInsight* d'ABB → 5, développée et testée pour fonctionner avec les systèmes 800xA d'aujourd'hui et de demain.

L'accès rapide à cette aide en ligne, primordial pour les alarmes critiques (« *intensément gérées* » dans le jargon CEI [6]), est de plus en plus demandé par les organismes de réglementation sur la sécurité. Dans les usines où il est déjà implanté, Alarm Helper apporte une aide précieuse à la conduite, très appréciée des opérateurs.

Amélioration continue

En phase d'exploitation, la gestion du cycle de vie est au centre de la normalisation CEI 62682/ISA 18.2 mais aussi partie intégrante de la troisième édition de l'EEMUA 191. La gestion d'alarme exige

des efforts continus pour pérenniser les bonnes pratiques et garantir la cohérence de la démarche.

À l'heure actuelle, nombreux sont les sites industriels à

afficher en temps normal de faibles fréquences moyennes d'alarme. Reste que les cas d'avalanches sont toujours aussi problématiques.

Le graphe → 4 reproduit la fréquence d'alarme d'une usine pétrochimique sur six mois : si la moyenne est inférieure à une alarme toutes les dix minutes, signe d'une situation maîtrisée, on constate également la survenue ponctuelle de plus d'une centaine d'alarmes et l'afflux régulier d'une vingtaine d'alarmes, toujours sur dix minutes.

Facteur aggravant, ces surcharges ont souvent lieu pendant les phases d'exploitation les plus délicates, au moment même où les opérateurs ont le plus besoin d'assistance (démarrage ou arrêt, par exemple). Deux scénarios se dégagent :

- Alarmes dues à l'arrêt de parties du *process* (alarmes « débit faible » après arrêt du pompage, par exemple), à différents modes de marche (nettoyage, par exemple) ou lors de l'étalonnage

d'instruments. Ces alarmes posent problème si elles se produisent en même temps qu'une anomalie du procédé et si des alarmes importantes sont noyées sous un flot d'alarmes inutiles ;

- Alarmes en cascade tout au long de la chaîne de causalité qui suit un dysfonctionnement du procédé : une seule cause de défaillance peut engendrer quantité d'alarmes consécutives. Or la première de la liste n'est pas forcément la plus proche de la cause de défaillance : selon la dynamique du process et le paramétrage des seuils, des alarmes secondaires et de fausses alarmes peuvent très bien figurer en tête de liste.

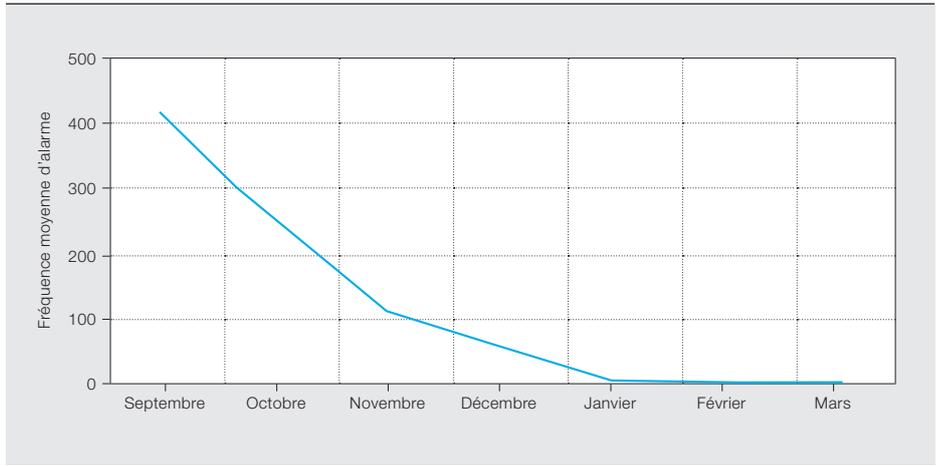
Choisir les bons paramétrages de seuil, d'hystérésis ou de temporisation ne suffit pas pour éviter la surcharge. Des techniques avancées comme le masquage (dénommé « suppression par conception » dans la CEI 62682) et le groupement d'alarmes entrent alors en jeu. Le système 800xA d'ABB dispose à cette fin d'une puissante panoplie d'outils de groupement, de masquage dynamique et de suspension d'alarmes (suppression temporaire, sur ordre de l'opérateur), aux niveaux automate, serveur et poste de travail.

Compromis

Toute la difficulté est d'arbitrer entre les risques potentiels que comporte la suppression d'une alarme au cours d'un scénario donné et la nécessité de réagir aux pics de fréquence d'alarme en situation anormale. La meilleure façon d'atténuer ces risques est d'associer une gamme complète d'outils éprouvés de gestion

ABB a fait chuter la fréquence moyenne d'alarme d'un site gazier de Rashpetco, ramenant le nombre d'arrêts de production de 25 à 6 par an.

6 Réduction de la fréquence d'alarme sur la plate-forme gazière de Rashpetco avec AlarmInsight



d'alarme comme AlarmInsight d'ABB et une démarche robuste de gestion des changements avec le niveau approprié de révision et de validation.

À titre prospectif, les premières revues de rationalisation peuvent identifier les alarmes candidates à la suppression de base (groupement d'alarmes à masquer en cas d'équipements hors service, par exemple). Par la suite, les études sur les avalanches d'alarmes en exploitation tâcheront d'aller plus loin et de tirer parti de toute la palette fonctionnelle AlarmInsight :

- Commentaires opérateur sur les réponses aux alarmes, consignés et affichés dans Alarm Helper ;
- Analyse détaillée des alarmes avec les outils *Expert Tool* et *Alarm Analysis* ;
- Attributs d'alarme en cours, puisés dans la base de données ART.

L'ensemble facilite l'identification des scénarios potentiels de suppression d'alarme fondés sur l'analyse des données réelles du site. En supprimant le besoin d'analyse manuelle *ad hoc*, on réduit énormément le risque d'erreur humaine dans la déduction des liens de cause à effet. De même, les conclusions peuvent s'appuyer sur des séries de données beaucoup plus longues, s'étalant au besoin sur plusieurs années. Après avoir identifié, revu et validé un scénario spécifique, la solution peut servir à explorer d'autres instances d'alarme relevant de la même logique. L'intégration 800xA-AlarmInsight est gage d'optimisation, d'adéquation et de surveillance continues des alarmes.

La démarche s'est avérée fructueuse à plus d'un titre :

- Identification des alarmes consécutives à un arrêt particulier ;
- Analyse d'événement critique soulignant les déclenchements d'événement avec possibilités de réponse et d'intervention anticipées de l'opérateur, et diminution des arrêts d'équipement et dysfonctionnements d'usine.

Les principaux apports de cette panoplie d'outils d'amélioration continue sur le cycle de vie sont :

- la diminution des arrêts de production ;
- la réduction du risque législatif et réglementaire (opérations plus sûres et écocompatibles) ;
- l'amélioration de l'efficacité opérationnelle.

La courbe → 6 montre comment ABB a fait chuter la fréquence moyenne d'alarme sur une plate-forme de production de gaz de la compagnie Rashid Petroleum Company (Rashpetco). Les arrêts sont ainsi passés de 25 à 6 par an, avec d'importantes économies globales à la clé.

De l'excès à la modération

La sécurité est un sujet de préoccupation grandissant pour les régulateurs, les organismes publics et la société en général. Tous plaident pour une gestion d'alarme sur le cycle de vie et une amélioration continue des processus et procédures afin de sécuriser les activités industrielles. La CEI 62682 est aujourd'hui le référentiel international des meilleures pratiques dans ce domaine. Avec son offre complète d'outils procurant des économies chiffrées et des bilans documentés qui font autorité auprès des instances régle-

mentaires, ABB fait beaucoup progresser la gestion d'alarme.

Martin Hollender

ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)
martin.hollender@de.abb.com

Joan Evans

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals
Billingham (Royaume-Uni)
joan.evans@gb.abb.com

Thomas-Christian Skovholt

ABB Process Automation, Oil, Gas & Chemicals
Oslo (Norvège)
thomas-christian.skovholt@no.abb.com

Roy Tanner

ABB Process Automation, Control Technologies
Wickliffe (Ohio, États-Unis)
roy.tanner@us.abb.com

Bibliographie

- [1] Shukman, D., *Tim Peake: British astronaut's training nears end*, BBC News, disponible en ligne sur : <http://www.bbc.com/news/science-environment-34788169>, 11 novembre 2015.
- [2] Smith, S., « Did DuPont Prioritize Cost Over Safety at Belle, West Virginia, Facilities? Chemical Safety Board Investigation Indicates It Did », *EHS Today*, 13 juillet 2011.
- [3] « The explosion and fires at the Texaco refinery, Milford Haven, 24 July 1994 », Health and Safety Executive, Norwich (Royaume-Uni), 1997.
- [4] Norme CEI 62682, *Gestion de systèmes d'alarme dans les industries de transformation*, octobre 2014.
- [5] Norme CEI 62682, paragraphe 6.2.1, tableau 3, p. 116, *Contenu exigé et recommandé de la philosophie d'alarme*.
- [6] Norme CEI 62682, paragraphe 6.2.9, p. 118, *Alarmes intensément gérées*.

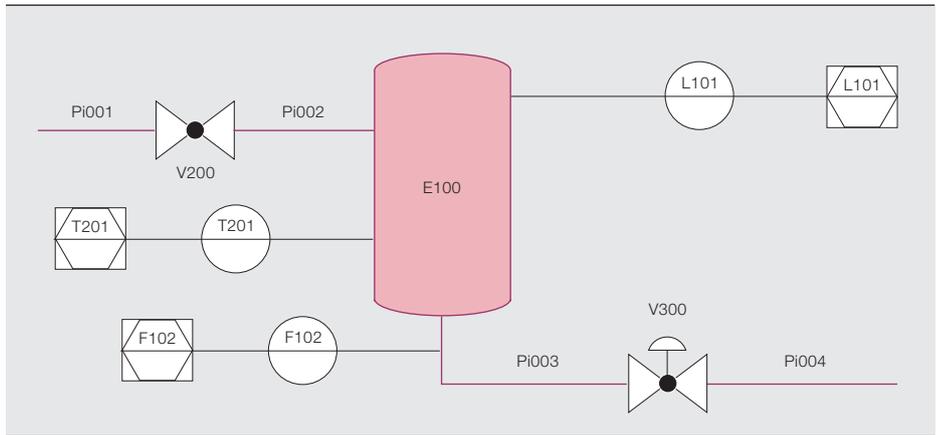


Vers le papier connecté

Un projet de recherche pour extraire des descriptions orientées objets des schémas de tuyauterie et d'instrumentation

ESTEBAN ARROYO, ALEXANDER FAY, MARIO HOERNICKE, PABLO RODRÍGUEZ, STEVE ROYSTON – Dans l'industrie des procédés, la documentation peut prendre des proportions impressionnantes et emprunter de multiples formes, du papier traditionnel aux représentations numériques élémentaires. Regrouper cette information éclectique dans un même format accessible et à jour, notamment en vue de moderniser un site, est une tâche titanesque.

ABB a donc cherché un moyen efficace d'extraire automatiquement et de façon cohérente des modèles de ces données techniques. Un projet de recherche mené avec l'université Helmut Schmidt de Hambourg (Allemagne) a débouché sur une méthode couplant reconnaissance optique et analyse sémantique pour convertir des schémas de tuyauterie et d'instrumentation (TI) en modèles orientés objets.



Pour y remédier, ABB et l'université Helmut Schmidt (HSU) ont mis au point des méthodes d'extraction de représentations orientées objets (OO) à partir des documents de conception existants, en particulier les schémas TI [2].

Des précédents travaux de recherche ont montré que l'emploi de schémas TI pouvait accompagner les différentes tâches qui jalonnent le cycle de vie de l'usine, telles que les études de danger automatisées HAZOP (*HAZard and OPerability*) [3], la détection de modèles de conception [4], l'obtention de modèles de simulation [5], la recherche de défauts et le diagnostic [6]. Les méthodes existantes ont toutes un prérequis: les schémas TI doivent être décrits au format OO, normalisé CEI 62424 CAEX/AML [7,8] → 4 ou ISO 15926 [9], par exemple. Or ce n'est malheureusement pas le cas dans le *process* où la majorité des schémas TI est archivée sous des formes inintelligibles pour l'informatique.

Donner du sens à une mosaïque de points

La méthode développée par ABB et HSU extrait des modèles OO des documents textuels et graphiques que constituent les schémas TI → 1, par la reconnaissance des textes, des formes symboliques et des liaisons entre éléments. Elle part du principe que les documents d'entrée ont quatre composantes fonda-

mentales: des formes paramétriques, des formes non paramétriques, des annotations textuelles et un contenu sémantique sous-jacent → 2.

Le processus de conversion suppose que les schémas TI soient stockés dans des fichiers PDF/bitmap ou PDF/SVG dont on peut extraire les images matri-

Les documents d'entrée ont quatre grandes composantes: les formes paramétriques, les formes non paramétriques, les annotations de textes et le contenu sémantique sous-jacent.

cielles. Pourtant, dans certains cas, il faut passer par des étapes préalables pour obtenir une image matricielle, surtout quand il s'agit d'archives papier ou de fichiers CAO → 3. Ensuite, la méthode exécute trois procédures pour générer le modèle interprétable par l'ordinateur:

- Reconnaissance optique OSR pour les symboles, OCR pour le texte;
- Analyse sémantique: interprétation de la connotation fonctionnelle des formes graphiques pour améliorer la procédure de reconnaissance et les capacités expressives de la description de modèle;
- Représentation et vérification: description des informations saisies sous forme de modèle OO, puis contrôle visuel.

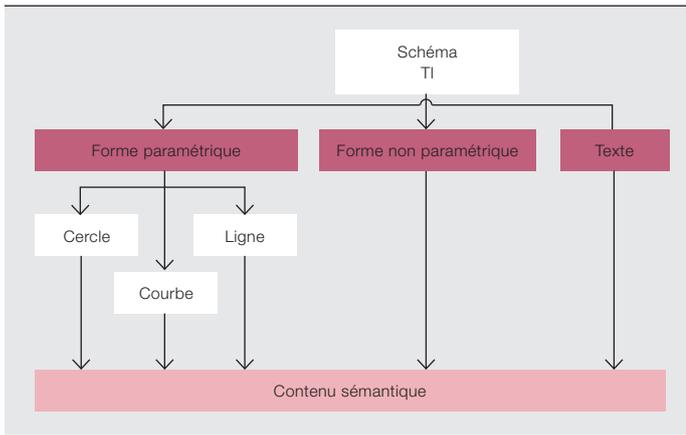
Le gigantisme et la complexité des usines de transformation, de même que la multitude de modifications et d'ajouts effectués tout au long de leur cycle de vie, font exploser les volumes d'informations engrangées: modèles structurels, descriptions fonctionnelles, schémas TI, spécifications d'équipements. Même si cette documentation est un précieux atout pour la planification et l'exploitation d'un site, il est toujours difficile de la localiser au bon moment pour en extraire la bonne information [1].

Numérisation par scanner, stockage et indexation à la main sont aujourd'hui des pratiques courantes dans l'industrie pour convertir les classeurs papier existants en une bibliothèque technique informatisée. Les fichiers obtenus renferment des informations non structurées dont le contenu sous-jacent, faute de répondre à un modèle de données, se prête difficilement aux tâches d'automatisation.

Photo p. 65

La documentation technique dans l'industrie des procédés revêt de multiples formes hétéroclites (papier, fichiers électroniques, etc.). Comment convertir le tout dans un format standardisé orienté objet ?

2 Composantes d'un schéma TI type



Reconnaissance optique

Ce processus déploie des techniques éprouvées de traitement de l'image pour identifier les formes géométriques et les identifiants textuels. On utilise pour cela deux méthodes récursives : la reconnaissance de symboles OSR et la reconnaissance de caractères OCR.

Symboles (OSR)

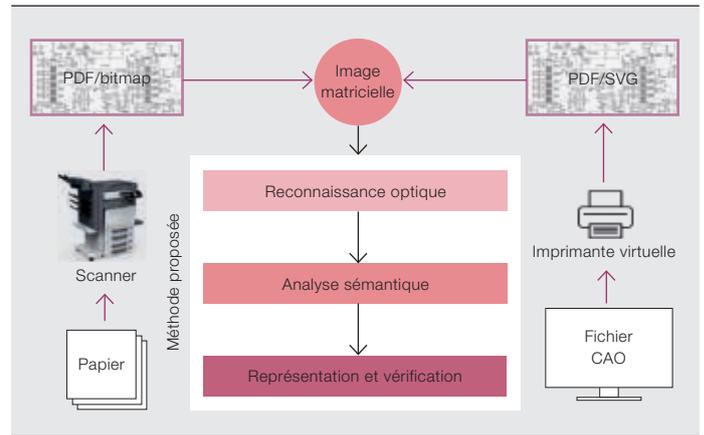
Première étape, les formes « non paramétriques », c'est-à-dire constituées de multiples courbes comme la cuve notée *E100* et la vanne *V300* → 1, sont localisées et comparées à des bibliothèques prédéfinies de symboles. Une bibliothèque peut répertorier, par exemple, tous les équipements de production ou les jeux de symboles usuels représentant des appareils ou processus spécifiques

exhaustive des correspondances possibles : la rotation, la mise à l'échelle et l'occlusion.

Des scores de ressemblance entre candidats identifiés et objets prédéfinis (modèles) permettent de définir plusieurs niveaux de confiance dans la méthode et d'en évaluer la fiabilité. Les objets reconnus sont supprimés de l'image pour faciliter la poursuite du processus.

Vient ensuite l'identification des symboles « paramétriques », c'est-à-dire des formes mathématiques de type cercle ou ligne, telles que la conduite *Pi002* et le capteur *L101* → 1. Les méthodes de reconnaissance utilisées à ce stade sont capables d'identifier les candidats potentiels indépendamment de leur taille et

3 Processus de numérisation



de leur orientation. Il est possible de fixer des seuils de dimensions minimales pour éviter de confondre caractères et symboles. Là encore, la fiabilité de la reconnaissance est réglable selon les scores de correspondance calculés ; de même, les coordonnées de position des objets reconnus sont supprimées pour faciliter l'identification des autres éléments.

Caractères (OCR)

Partant du principe que l'identifiant textuel d'un objet figure autour ou dans l'objet, les coordonnées des formes identifiées servent à générer des fenêtres de recherche → 6, de taille habituellement proportionnelle aux dimensions de l'image

4 Terminologie

AML	<i>Automation Markup Language</i> : format de données neutre intégrant les principales informations utilisées depuis la conception et la planification jusqu'au lancement de la fabrication.
CAEX	<i>Computer-Aided Engineering eXchange</i> : format d'échange de données techniques utilisé dans l'ingénierie des systèmes d'automatisation industrielle.
CAO	Conception assistée par ordinateur
OCR	<i>Optical Character Recognition</i> : reconnaissance optique de caractères
OO	Orienté objet
OSR	<i>Optical Symbol Recognition</i> : reconnaissance optique de symboles
PDF	<i>Portable Document Format</i> : format de fichier qui préserve les polices de caractères, les images, les objets graphiques et la mise en forme d'un document source, quelle que soit la plate-forme matérielle et logicielle utilisée pour l'imprimer ou le visualiser.
SVG	<i>Scalable Vector Graphics</i> : format d'images vectorielles basé sur le langage de balisage XML.
TI	Tuyauterie et instrumentation

Une règle sémantique peut stipuler, par exemple, qu'une conduite d'écoulement est raccordée à un maximum de deux éléments, un à chaque extrémité.

dans les schémas TI. La définition de bibliothèques est non seulement gage de modularité, ce qui optimise les procédures de recherche, mais aussi d'efficacité pour la saisie et la réutilisation des connaissances structurelles au sein de projets. Le critère de correspondance employé se fonde sur les caractéristiques structurelles des formes analysées. Trois propriétés géométriques fondamentales → 5 concourent à la recherche

Au-delà de la détection de connectivité, d'autres règles sont testées pour corriger automatiquement les erreurs et en avertir l'utilisateur.

analysée mais aussi paramétrable par l'utilisateur. Un algorithme OCR y recherche le texte : s'il trouve plus d'un mot-clé ou « étiquette » (*tag*), des règles de nomenclature (expressions régulières, par exemple) sont utilisées pour écarter les chaînes erronées et attribuer une étiquette unique à chaque objet. Les ambiguïtés (telles deux caractères accolés) sont signalées à l'utilisateur pour être levées manuellement.

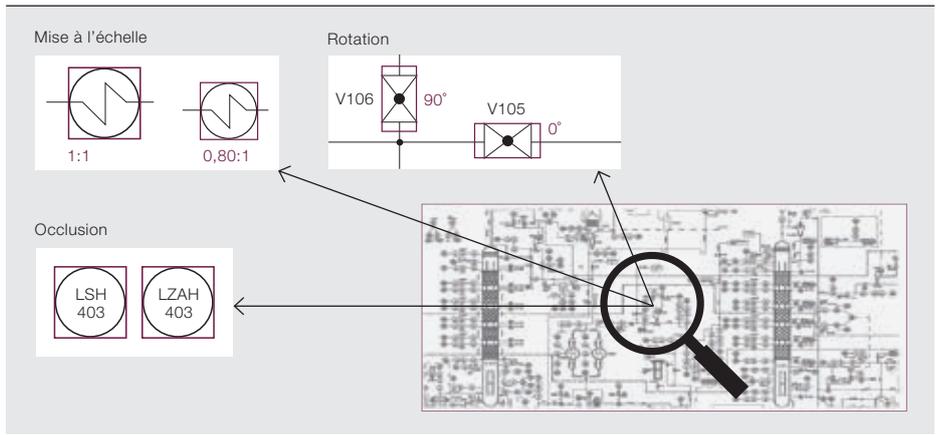
Analyse sémantique

Dans le cadre de notre méthode, on entend par là l'incorporation d'un savoir « métier » spécifique au domaine, en particulier un contenu fonctionnel et structurel, à la reconnaissance des formes graphiques et à leurs interrelations. Entre autres objectifs, cette étape sert à détecter la connectivité et à améliorer les capacités expressives de la modélisation par la définition de types spécifiques d'interface.

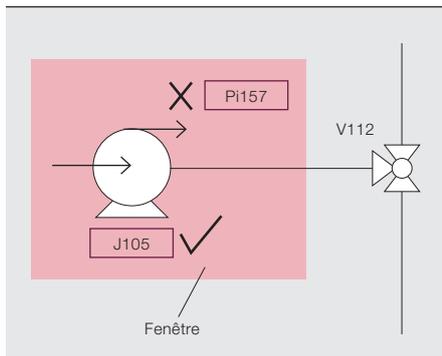
Détection de connectivité

En dessin industriel, les liaisons caractéristiques sont basées sur des segments chaînés multiples ou « polyignes ». La détection de connectivité doit donc commencer par unifier ces lignes contiguës en des éléments à liaison simple. La proximité de ces éléments avec les formes structurelles est analysée pour déduire la connectivité sous-jacente du schéma. Des règles sémantiques sont appliquées pour garantir la cohérence des liens : il est possible de stipuler, par exemple, qu'une conduite peut être raccordée à deux autres éléments au maximum, un à chaque extrémité. Si des instances potentielles ne remplissent pas cette condition, d'autres règles sont testées pour corriger automatiquement les erreurs de détection et en avertir l'utilisateur.

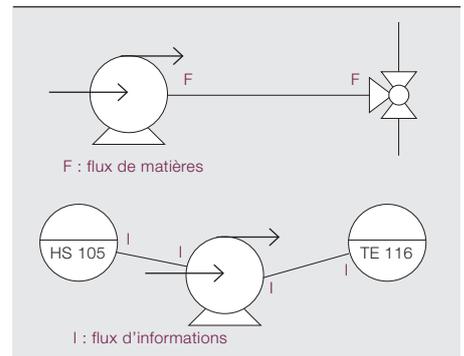
5 Propriétés intervenant dans le processus de correspondance géométrique



6 Fenêtre de recherche et attribution d'identifiants (étiquettes)



7 Types d'interface



8 Exemple de matrice de connectivité

	Cuve E100	Conduite Pi002	Capteur L101
Cuve E100		F	I
Conduite Pi002	F		
Capteur L101	I		

9 Exemple de table de coordonnées

Équipement	Coordonnées TI (X,Y)	Dimensions (L,I)
Cuve E100	(81,123)	(123, 57)
Conduite Pi002	(59,142)	(22,1)
Capteur L101	(105, 126)	(18,18)

Définition de types d'interface

La génération de modèles OO détaillés oblige à distinguer plusieurs types de connectivité. Un exemple : la sémantique d'une liaison cuve-capteur est foncièrement différente de celle d'une liaison cuve-conduite → 1 ; en effet, la première transmet des informations sur des fils électriques, quand la seconde véhicule des flux matières. Cette distinction est cruciale dans plusieurs cas de figure, comme la recherche de défauts et le diagnostic, où l'analyse des causes de défaillance est étroitement liée au milieu dans lequel se propagent les variables perturbatrices du procédé → 7.

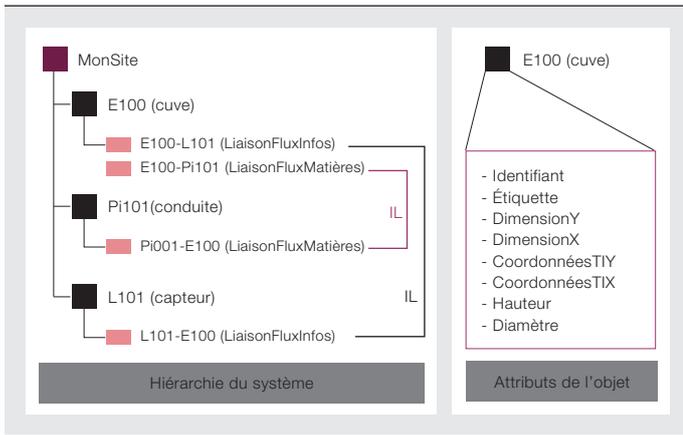
Représentation et vérification

Les informations obtenues par les algorithmes de traitement d'image passent par une étape intermédiaire de description structurelle, avant de donner un modèle OO. Le processus s'achève par un contrôle sur interface utilisateur pour vérifier *de visu* la cohérence des éléments numérisés.

Description structurelle intermédiaire

Pour fournir une première représentation de l'information rassemblée, les liaisons ainsi que la position et les dimensions des éléments trouvés sont stockées dans une « matrice de connectivité » et une table de coordonnées.

10 Exemple de modèle OO obtenu



En première colonne et en première ligne de la matrice → 8 figure la liste des éléments reconnus, répertoriés et nommés (cuve E100, etc.). Les données saisies à l'intersection ligne-colonne représentent les liaisons entre éléments, repérées par une lettre: *F* pour flux matières, *I* pour flux d'informations.

La table de coordonnées → 9 recense la position et les dimensions des objets.

Cette description structurelle intermédiaire peut être codée dans un tableur bureautique (Microsoft Excel ou formulaire C# Windows Forms), consultable à volonté pour obtenir les modèles OO visés. Elle peut également servir à des tâches élémentaires comme la création de nomenclatures ou la réponse à des requêtes sur la présence d'un article ou d'un type d'article donné.

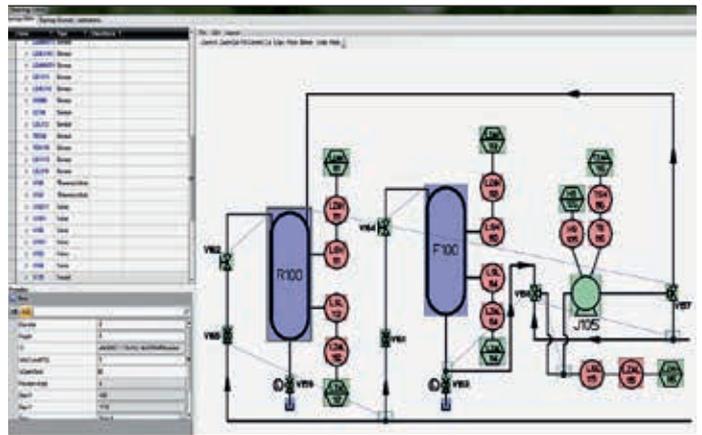
Modélisation objet

De ces données collectées est déduit un modèle OO, notamment CAEX/AML normalisé CEI 62424 [7,8]. On commence par créer un objet pour chaque entrée figurant dans la première colonne de la matrice de connectivité, auquel on ajoute des interfaces : dans l'exemple → 10, deux interfaces sont créées pour la cuve E100, l'une de type F (flux matières), l'autre de type I (infos). La procédure s'achève par l'affectation d'attributs (position et dimensions, par exemple). On obtient ainsi un modèle OO décrivant la connectivité et la sémantique du schéma TI.

Contrôle visuel

Dernière étape, une représentation graphique couleur des informations déduites → 11 est superposée à l'original TI

11 Contrôle visuel



en noir et blanc. L'utilisateur peut alors visualiser les objets identifiés, les comparer au schéma d'origine et, au besoin, apporter des modifications. Les corrections effectuées dans l'interface graphique sont directement reproduites dans le modèle OO, évitant le recours à d'autres outils de développement. Des avertissements générés au préalable peuvent servir à fixer les priorités de ce dernier pointage.

Le meilleur de la documentation

C'est en améliorant l'exploitation de la documentation existante et en automatisant sa numérisation et sa modélisation que l'on accroît l'efficacité de l'ingénierie des projets de construction et de modernisation de sites industriels. Nombreux sont les secteurs qui peuvent en tirer bénéfice, comme la chimie, la pharmacie, le pétrole et le gaz, l'eau et l'énergie.

Esteban Arroyo

Alexander Fay
Helmut Schmidt University
Hambourg (Allemagne)
esteban.arroyo@hsu-hh.de
alexander.fay@hsu-hh.de

Mario Hoernicke

Pablo Rodríguez
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)
mario.hoernicke@de.abb.com
pablo.rodriguez@de.abb.com

Steve Royston

ABB Process Automation,
Oil, Gas & Chemicals
St Neots (Royaume-Uni)
steve.royston@gb.abb.com

Bibliographie

- [1] Arroyo, E., et al., « Integrating Plant and Process Information as a Basis for Automated Plant Diagnosis Tasks », *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Barcelone (Espagne), 2014.
- [2] Norme NF EN 10628, *Schémas de procédé pour l'industrie chimique et pétrochimique*, 2001.
- [3] Fay, A., et al., « Knowledge-based support of HAZOP studies using a CAEX plant model », *Inside Functional Safety*, vol. 2, p. 5–15, 2009.
- [4] Drath, R., et al., « Computer-aided design and implementation of interlocking control code », *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design (CACSD)*, p. 2653–2658, 2006.
- [5] Barth, M., et al., « Object-oriented engineering data exchange as a base for automatic generation of simulation models », *35th Annual Conference of IEEE, Industrial Electronics (IECON'09)*, Porto (Portugal), 2009.
- [6] Yim, S. Y., et al., « Using process topology in plant-wide control loop performance assessment », *Computers and Chemical Engineering*, vol. 31, p. 86–99, 2006.
- [7] Norme CEI 62424, *Représentation de l'ingénierie de commande de processus – Demandes sous forme de diagrammes P&I et échange de données entre outils P&I et PCE-CAE*, août 2008.
- [8] Drath, R., *Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Allemagne), 2010.
- [9] Holm, T., et al., « ISO 15926 vs. IEC 62424 – Comparison of Plant Structure Modeling Concepts », *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Cracovie (Pologne), 2012.

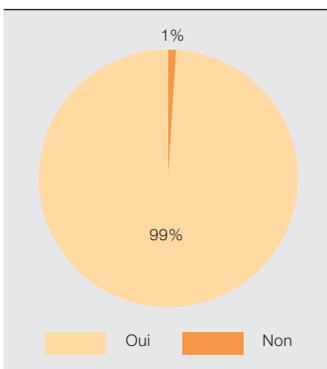
Nos lecteurs ont la parole

Verdict de notre enquête de satisfaction

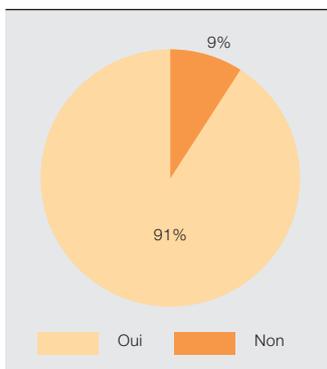
L'équipe éditoriale d'ABB review a le plaisir de vous livrer les résultats → 1-7 de l'enquête annoncée dans le troisième numéro 2015 et vous remercie d'avoir été nombreux à y répondre. Toutes nos félicitations aux cinq gagnants du tirage au sort,

Isidro Fraga Hurtado (Cuba), John Grant et Nasos Bardis (États-Unis), Tamer Mahmoud (Égypte) et Walter Heinrich (Allemagne), qui recevront un sac à dos et une casquette à l'effigie de l'avion solaire *Solar Impulse*.

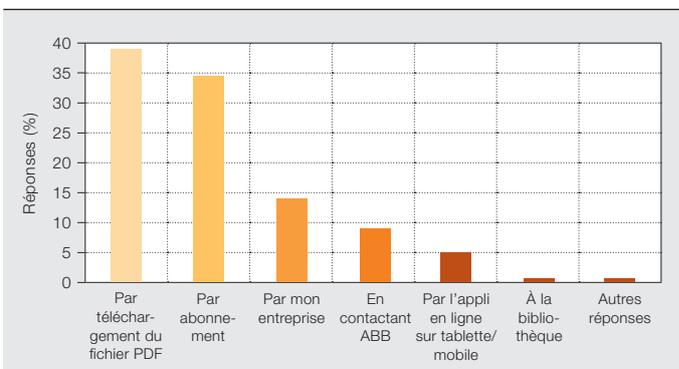
1 Lisez-vous des articles d'ABB review ne relevant pas de vos domaines d'expertise ?



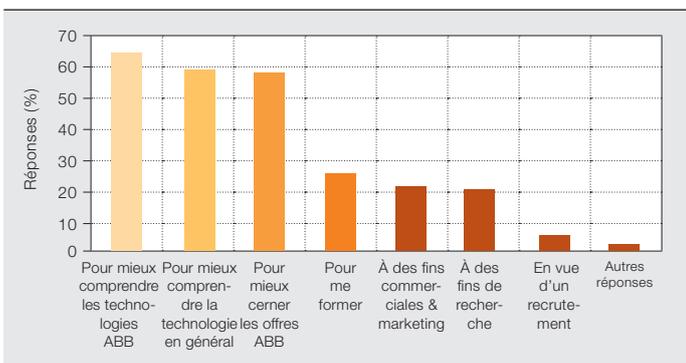
2 Recommanderiez-vous la revue à un collègue ?



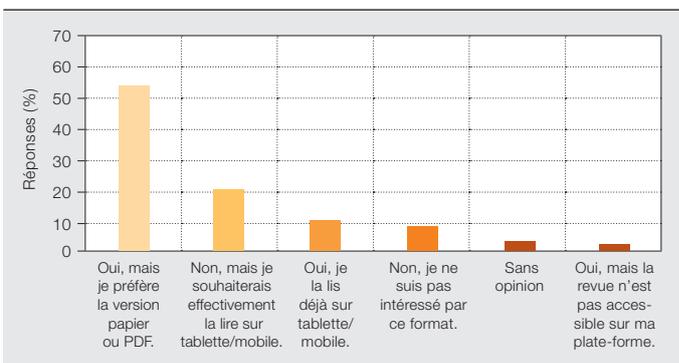
3 Comment avez-vous obtenu cet exemplaire ?



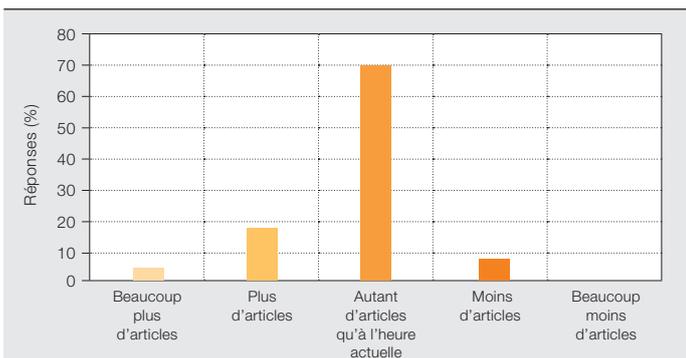
4 Lisez-vous ABB review : (plusieurs réponses possibles)



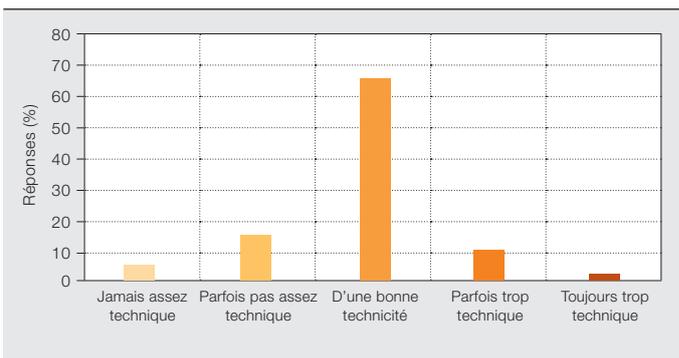
5 Savez-vous que la revue est consultable en ligne sur tablette/mobile ?



6 Souhaiteriez-vous qu'ABB review publie :



7 Jugez-vous son contenu :



Rédaction

Bazmi Husain

Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Christoph Sieder

Head of Corporate Communications

Ernst Scholtz

R&D Strategy manager
Group R&D and Technology

Andreas Moglestue

Chief Editor, ABB review
andreas.moglestue@ch.abb.com

Édition

ABB review est publiée par la direction
R&D and Technology du groupe ABB.

ABB Technology Ltd.
ABB Review/REV
Affolternstrasse 44
CH-8050 Zurich (Suisse)

ABB review paraît quatre fois par an en anglais, français, allemand et espagnol. La revue est diffusée gratuitement à tous ceux et celles qui s'intéressent à la technologie et à la stratégie d'ABB. Pour vous abonner, contactez votre correspondant ABB ou directement la rédaction.

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

Édition et droits d'auteur ©2016
ABB Technology Ltd.
Zurich (Suisse)

Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

Maquette

DAVILLA AG
Zurich (Suisse)

Traduction française

Dominique Helies
dhelies@wanadoo.fr

Avertissement

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

ISSN : 1013-3119

www.abb.com/abbreview



Dans le numéro 2116

Du pain sur la planche

ABB review a souvent abordé au fil des ans des thématiques propres à l'existence même de l'homme, que ce soit l'énergie, la production manufacturière, l'exploitation minière et les transports. Mais il en est une encore plus directement et intrinsèquement liée aux besoins vitaux de l'humanité, même si elle n'est pas toujours immédiatement associée au nom d'ABB : l'agroalimentaire.

Les produits et technologies ABB jouent un rôle important dans la fabrication agroalimentaire, aussi bien sous la forme d'instruments individuels que de systèmes de contrôle-commande à l'échelle d'un site et d'équipements de manutention motorisés et robotisés. À telle enseigne que ce secteur industriel est aujourd'hui l'un des leviers de croissance stratégiques du Groupe.

Il sera donc au menu de notre deuxième numéro de l'année.



À vos tablettes

Retrouvez l'application *ABB review* sur notre site www.abb.com/abbreviewapp.



Gardez le contact

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

Dès votre enregistrement effectué, vous recevrez un e-mail avec un lien permettant de confirmer votre abonnement.



Grand angle
Explorez toute l'innovation ABB, en quatre langues.

Téléchargement
Un accès hors ligne pour les jours sans connexion internet, dans le train, en avion... ou au sommet du Kilimandjaro!

Médiathèque
Certes, *un dessin vaut mieux qu'un long discours*, mais parfois cela ne suffit pas. Rien de tel que des vidéos, des animations et des photos pour aller plus loin.

À portée de main, à tout moment et partout

Retrouvez-nous sur l'appli *ABB review* pour tablette et smartphone. Polyglotte, riche en fonctionnalités et contenus interactifs (recherche intégrale, galeries photos, vidéos, animations, etc.), elle est téléchargeable sur votre magasin d'applications préféré.

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

